

陈锐丹, 温之平, 陆日宇, 等. 2012. 华南 6 月降水异常及其与东亚—太平洋遥相关的关系 [J]. 大气科学, 36 (5): 974–984, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11209. Chen Ruidan, Wen Zhiping, Lu Riyu, et al. 2012. Variation of South China rainfall in June and its association with the East Asia–Pacific teleconnection [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 974–984.

华南 6 月降水异常及其与东亚—太平洋遥相关的关系

陈锐丹^{1,2} 温之平² 陆日宇¹ 吴丽姬³

1 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

2 中山大学季风与环境中心/大气科学系, 广州 510275

3 华南农业大学农学院, 广州 510642

摘 要 利用 1959~2010 年共 52 年的大气环流和降水资料, 我们分析了华南前汛期季风降水 (6 月降水) 的变化特征, 发现 6 月华南降水与同期 EAP (East Asia–Pacific, 东亚—太平洋) 遥相关型有显著的相关关系, 两者之间的相关系数为 0.35。EAP 指数为正时, 长江中下游以南的地区降水偏多, 而长江以北和黄河之间的地区降水偏少。将华南 6 月降水分为与 EAP 相关的降水序列和与 EAP 独立的降水序列, 比较了二者所对应环流异常的异同点。结果表明, 与 EAP 相关的降水异常对应着 EAP 相关型的环流异常分布特征, 降水为正异常时, 850 hPa 风场从低纬度到高纬度呈现“反气旋、气旋、反气旋”的异常分布, 湿的偏南风 and 干的偏北风在华南上空交汇, 降水增多; 而整个淮河流域上空为偏北风异常, 导致南风带来的水汽输送减少, 降水偏少, 因此降水异常呈现偶极子分布。相比之下, 与 EAP 独立的降水正异常对应的环流异常表现为热带西北太平洋上空的反气旋性环流异常, 华南地区上空为显著的西南风异常, 输送到华南地区的水汽增多, 导致降水偏多。

关键词 华南前汛期季风降水 东亚—太平洋遥相关 年际变化 环流异常

文章编号 1006-9895(2012)05-0974-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11209

Variation of South China Rainfall in June and Its Association with the East Asia–Pacific Teleconnection

CHEN Ruidan^{1,2}, WEN Zhiping², LU Riyu¹, and WU Liji³

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

2 Center for Monsoon and Environment Research/ Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

3 School of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642

Abstract Based on the atmospheric circulation and rainfall data from 1959 to 2010, the variations of summer monsoon rainfall in the pre-rainy season in South China, i.e., rainfall in June, are analyzed in this study. The results show that the South China rainfall anomaly in June is significantly related to the East Asia–Pacific (EAP) teleconnection pattern with a correlation coefficient of 0.35. When the EAP index is positive, above-normal rainfall occurs over the areas south of the middle and lower reaches of the Yangtze River, and below-normal rainfall occurs over the areas between the Yangtze River and the Yellow River.

收稿日期 2011-10-30, 2012-04-10 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40730951, 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421404, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201006021, 国家自然科学基金资助项目 40905025

作者简介 陈锐丹, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候动力学研究。E-mail: chenrd10@hotmail.com

通讯作者 陆日宇, E-mail: lr@mail.iap.ac.cn

Furthermore, the South China rainfall in June is divided into two time series: one is dependent on the EAP pattern and the other is independent of the EAP pattern. Comparisons between the two corresponding atmospheric circulation anomalies are followed up. The atmospheric circulation anomalies corresponding to rainfall time series dependent on the EAP pattern are similar to the distributions of EAP related circulation anomalies. When the EAP rainfall is above-normal, there is a combination of anti-cyclonic, cyclonic, and anti-cyclonic anomalies from low latitudes to high latitudes over the tropical western North Pacific and East Asia in the lower troposphere. The southerly and northerly anomalies meet over South China, leading to above-normal rainfall there. Meanwhile, the Huaihe River basin is occupied by northerly anomalies, resulting in below-normal rainfall. By contrast, the atmospheric anomalies corresponding to the above-normal rainfall time series that is independent of the EAP pattern are characterized by an obvious anti-cyclonic anomaly over the tropical western North Pacific and southwesterly anomalies over South China, which favor water vapor transportation and resultant above-normal rainfall.

Key words summer monsoon rainfall in the pre-rainy season in South China, East Asia-Pacific teleconnection, interannual variation, circulation anomaly

1 引言

华南地区是我国雨量最充沛的区域, 平均年雨量最大, 暴雨次数多, 雨季汛期长, 从 4 月初开始直到 9 月底才结束。每年 4~6 月为华南经历的第一个多雨期, 称为华南前汛期, 这一时期的降水主要发生在副热带高压北侧的西风带中。4 月初降水量开始缓慢增大, 5 月中旬雨量迅速增多, 进入华南前汛期盛期。5 月中旬之前, 雨带位于华南北部, 主要表现为北方冷空气侵入形成的锋面降水。5 月中旬之后, 受东亚季风影响, 雨带移至华南沿海, 降水量增大。7 月开始, 华南降水进入后汛期, 主要表现为副高季节性北跳之后其南侧热带辐合带、热带云团和热带气旋、台风等天气系统造成的降水(朱乾根等, 2007)。平均而言, 前汛期的降水量占全年降水量的 40%~50%, 而后汛期一般占 30%左右, 而且华南前汛期暴雨日数占全年暴雨日数的一半以上(周秀骥等, 2003)。前汛期造成的水灾程度较为严重, 给人民的生命财产和社会经济的各个方面带来重大的损失, 因此对华南前汛期降水的研究历来受到重视。

一些研究分析了影响华南降水异常的物理因子。梁建茵和吴尚森(1999)分析了夏季风对广东汛期(4~9 月)不同阶段降水的影响, 指出广东前汛期(4~6 月)降水与西南季风有一定的正相关关系, 但不显著, 5~6 月份甚至出现相反的情况, 此时主要的影响来自于副热带季风的加强, 如 6 月份强降水由副高南撤西伸造成。邓立平和王谦谦(2002)通过对华南前汛期(4~6 月)降水异常与前期太平洋海温异常的相关分析, 找到一个稳定影响华南前汛期降水的敏感海区, 其位置在西太平洋

暖池北部, 主要影响时段为上年 6~8 月。陈艺敏和钱永甫(2005)在此基础上, 利用全球大气环流模式讨论了该敏感海区海温异常对后期华南地区环流场和降水的影响, 指出前期冷(暖)海温异常可以导致华南地区上升(下沉)气流和降水增强(减弱)。马慧等(2009)也表明华南前汛期降水与前一年 5~8 月西太平洋海温密切相关。Chan and Zhou(2005)、Zhou et al.(2006)指出 ENSO 和太平洋年代际振荡(PDO)的共同作用对华南地区 5~6 月降水的年代际变化产生影响, 当 ENSO 和 PDO 同为正(负)位相时, 华南地区的夏季风降水偏少(多), 而这种关系是由于 ENSO 和 PDO 对副高强度共同作用引起的。Mao et al.(2011)指出在不同的 PDO 位相中, 华南前汛期(5~6 月)降水的年际变化特征明显不同。Li et al.(2011)通过分析华南夏季水汽输送通量的长期变化, 指出华南夏季降水的年代际变化和四个边界水汽通量的变化关系密切, 而各个边界的水汽输送特征则受到西太副高南北位置的影响。

夏季东亚气候异常和西北太平洋气候异常的密切联系表现为不同纬度间强烈的相互作用(陆日宇和富元海, 2009)。东亚—太平洋遥相关型(EAP)(Huang and Li, 1987; Nitta, 1987)是北半球夏季重要的遥相关型, 由位于西太平洋—东亚沿岸的三个正负异常相间的中心构成, 分别位于副热带西太平洋地区(WP 中心)、东亚中纬度地区(EA 中心)和雅库茨克及鄂霍次克海地区(YO 中心)。因此, EAP 遥相关的异常反映了西太平洋—东亚沿岸各纬度环流系统异常的配置。Huang(2004)根据夏季 EAP 遥相关活动异常中心定义了一个衡量东亚夏季风强度的 EAP 指数, 这个指数能很好地反映东

亚尤其是江淮流域夏季降水、气温的年际变率。

EAP遥相关的形成与来自低纬度的外强迫密切相关。观测资料和数值模拟分析表明西太平洋暖池对流活动异常可激发出向北传播的Rossby波,从而在东亚地区形成EAP型(Huang and Li, 1987; Huang, 1992; Huang and Sun, 1992; 陆日宇和黄荣辉, 1998)。宗海峰等(2008)指出前期热带太平洋海温异常影响夏季EAP遥相关型的形成和发展。

许多研究表明,华南前汛期降水可以分为锋面性质的降水和热带夏季风降水(罗会邦, 1999; 郑彬等, 2006, 2007; 吴丽姬等, 2007)。郑彬等(2006, 2007)以100 hPa的高层纬向风由西风转为东风并持续5天以上为标准,划分华南前汛期锋面降水和季风降水,得到气候平均的华南夏季风降水开始日期为5月24日,并分别讨论了这两类降水年际变化的主要模态,指出它们的第一模态空间分布具有明显的不同。吴丽姬等(2007)的研究结果也表明南海夏季风爆发(大致与华南季风降水开始时间相同)前后华南持续性暴雨的时空变化特征显著不同。由于前后两个时段影响降水的天气系统不同,降水分布特征和影响机理均可能有较大差异,因此有必要分时段研究华南前汛期降水。

6月份是华南气候平均月降水量最多的月份,是华南持续性暴雨多发、大范围洪涝灾害发生的主要时段(张振清, 2007)。例如2005年6月,华南降水量普遍有200~500 mm,部分地区超过800 mm,广东省龙门县的降水总量高达1637.7 mm,造成广西、广东部分地区发生严重洪涝及滑坡、泥石流等灾害(司东等, 2008)。2008年6月,华南大部分地区降水量在400 mm以上,其中广东大部、广西东部达到500~1000 mm,珠三角地区超过1000 mm,广东、广西的月雨量分别为1951年以来历史同期最多值和次多值,出现了严重的洪涝灾害(饶晓琴, 2008)。

然而,目前针对华南6月降水异常的研究还比较少。吴晓彤等(1995)对6月份南海海温对华南地区降水的影响进行了数值模拟,结果表明南海初夏海温增暖后,华南地区水汽辐合和上升运动增强,华南降水增多。梁建茵(1994)和张振清(2007)分析了华南6月份降水异常与西太副高的关系,指出副高脊线偏北(南)、菲律宾东面的副高偏弱(强)的异常与华南降水偏少(多)相对应。杨辉(2011)

分析了华南6月降水变化的特征及其大气环流条件,指出初夏华南沿海低空西南气流和副高西北侧西风槽带来的冷空气辐合,有利于华南降水增多。姚才等(2011)表明华南6月降水和菲律宾以东与华南之间的850 hPa涡度差关系密切。

本文将针对华南6月降水异常进行研究。首先,我们分析了EAP遥相关和华南地区降水的关系。进而,把华南降水分为与EAP相关和与EAP独立的两个序列,进一步研究了大气环流异常影响华南降水的物理机制。

2 资料

本文采用的数据资料主要包括:

(1) 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)发布的第一套全球逐月再分析数据。采用1959年~2010年共52年的月平均再分析资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直方向从1000 hPa到10 hPa共17个气压层。包括位势高度场、水平风场资料。

(2) 1979年~2010年共32年的NOAA(美国国家海洋和大气局)Interpolated OLR(Outgoing Longwave Radiation)的向外长波辐射月平均资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

(3) 1979年~2010年共32年的GPCP V2.2(Global Precipitation Climatology Project)全球格点降水资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

(4) 1959年~2010年国家气候中心160个站点逐月降水资料。选取广东、广西、海南省共14个站点代表华南地区。

3 华南降水异常的年际和年代际变化特征

华南位于我国东部沿海季风区,降水具有明显的季节变化。图1a是1959~2010年华南地区月平均降水量的逐月变化,呈现出双峰型。冬春季华南降水量少,逐月变化缓慢。4~9月份是降水充沛期,总降水量占全年的78.9%。从4月份开始降水迅速增加,对应华南前汛期开始;6月份达到峰值,降水量占全年的17.3%,对应前汛期的后期。7月份降水量有明显的回落,这是因为副高在6月下旬至7月上旬有一次明显的北跳过程,之后副高主体控制华南东部地区,高温少雨,降水量减少(朱乾根等, 2007)。由于受到台风雨的影响,8月份降水量

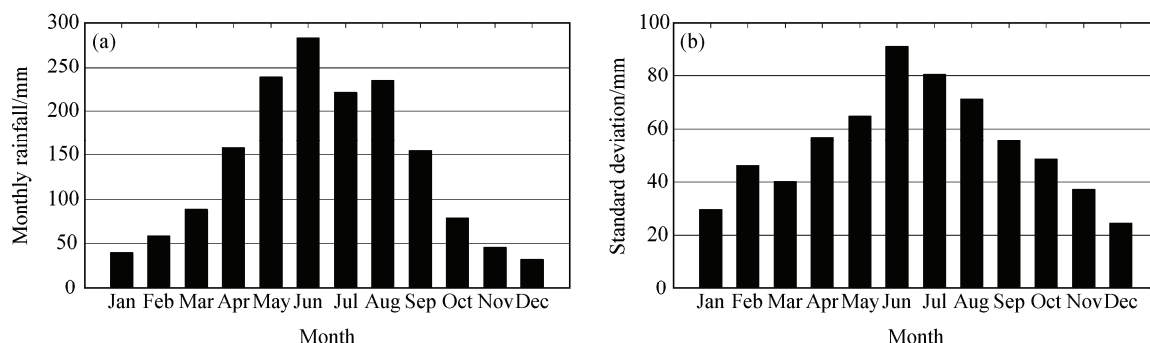


图1 华南月平均降水量的逐月变化 (a) 以及标准差的逐月变化 (b) (单位: mm)

Fig.1 (a) Monthly South China rainfall amount and (b) its standard deviation from Jan to Dec

出现次峰值, 降水量占全年的 14.3%, 9 月份之后降水迅速减少, 对应华南后汛期的结束。本文的结果与吴尚森和梁建茵 (1992) 的结果基本一致, 尽管两者分析的时间段长短有显著的差异。吴尚森和梁建茵 (1992) 分析的时间段为 1951~1986 年, 他们选取的华南站点仅比本文多一个站点 (厦门)。

华南月平均降水标准差的逐月分布呈现单峰型 (图 1b)。6 月份降水的标准差最大, 达到 91.3 mm, 表明 6 月的降水最多, 年际变化也最强。然而, 尽管 7 月降水比 5 月和 8 月少, 但 7 月标准差却比 5 月和 8 月大, 表明 7 月降水的年际变化相对较大, 这可能与华南地区进入后汛期的早晚年际变化较大有关。8 月降水比 5 月稍少, 但是 8 月标准差比 5 月大, 这可能与后汛期台风活动的年际变化较大有关。

图 2 是 1959~2010 年华南 6 月降水异常的变化曲线。由图可见, 降水不仅具有明显年际变化, 还存在显著的年代际变化。从降水异常的变化趋势看, 20 世纪 70 年代之前, 降水的变化趋势不明显; 70~80 年代降水有明显的下降趋势, 绝大部分年份降水异常为负值; 从 20 世纪 90 年代初开始, 降水呈现出明显的上升趋势, 上升幅度明显比 70~80 年代的下降幅度大。

我们的这一结果与以往的结果符合。Kwon et al. (2007) 指出华南夏季 (6~8 月) 降水在 1993/1994 年发生明显增加, Wu et al. (2010) 也指出华南夏季降水在 1992/1993 年有显著增加的年代际变化趋势。然而, 关于降水增加的年代际变化产生的原因, 目前却存在较大的差异。Kwon et al. (2007) 认为与经过我国东南部台风个数的显著增加有关, 而西

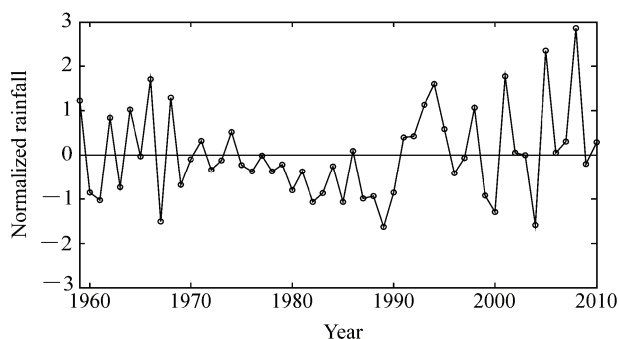


图2 1959~2010 年华南 6 月标准化降水序列

Fig.2 Normalized series of the South China rainfall in Jun from 1959 to 2010

太平洋海温的增暖可能是引起台风活跃的重要原因。Wu et al. (2010) 认为与赤道印度洋海温温度的增暖和冬春季青藏高原雪盖面积的减少有关, 指出这两者分别引起南海—副热带西北太平洋地区反气旋性环流异常和华北—蒙古反气旋性环流异常, 进而有助于华南降水。此外, 一些对华南极端降水的研究也表明 20 世纪 90 年代初以来有明显增加的趋势。钱维宏等 (2007) 通过对中国近 40 年来降水极值事件的分析, 指出在 1991 年华南地区出现了转湿的突变, 降水增多。张婷和魏凤英 (2009) 分析了华南地区近 46 年汛期极端降水的概率分布特征, 也指出 1992 年华南地区降水发生了由减少趋势到增多趋势的突变。此外, 我们的结果 (图 2) 表明从 20 世纪 90 年代开始, 华南 6 月降水也表现出明显增加的趋势。

图 2 还表明降水异常的波动幅度存在明显的年代际振荡。20 世纪 70~80 年代降水的波动很小, 尤其 70 年代的降水异常值均在零值附近。70~80 年代 (1970~1989 年) 年际变化的标准差为 50.5 mm,

而 70 年代之前 (1959~1969 年) 的标准差为 104.8 mm, 80 年代之后 (1990~2010 年) 为 105.6 mm。李丽平等 (2010) 指出华南前汛期 (4~6 月) 近 40 年来的降水可以分为 1969~1984 年、1985~1991 年、1992~2008 年三个时段, 第二个时段降水明显偏少, 而第一、第三时段降水偏多。此外, 该文还给出了三个时段的标准差, 分别为 67.6 mm、56.0 mm 和 87.1 mm, 相互之间的差别不大, 表明华南前汛期 (4~6 月) 降水异常的波动幅度没有明显的年代际变化。这些年代际变化特征与本文给出的华南 6 月降水的情况差别很大。之所以产生上述的标准差差异, 是因为本文分析的是 6 月降水, 而李丽平等 (2010) 分析的是 4~6 月降水。为了进一步验证这一点, 我们用 160 站降水资料也计算了 1969~2008 年华南前汛期 (4~6 月) 降水的变化 (图略), 得到的结果与李丽平等 (2010) 一致。由此可见, 华南 6 月降水异常的年代际变化特征与前汛期总体降水有很大差别, 这也再一次说明了针对华南 6 月降水进行研究的必要性。

4 6 月东亚—太平洋遥相关型

Huang (2004) 定义的 EAP 遥相关中心位于 WP(20°N, 125°E)、EA(40°N, 125°E)、YO(60°N, 125°E), 采用该方法计算出的 6 月 EAP 指数和华南降水的相关系数为 0.27, 通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。Huang (2004) 的定义是针对夏季 (6~8 月) 平均的, 而东亚夏季风环流系统在夏季有明显的季节演变。比如, 副高有两次明显的北跳过程, 伴随

着我国雨带由南至北的推进。由于遥相关波列与平均气候态环流关系密切, 因而可以推测针对 6 月的 EAP 遥相关型可能有别于夏季平均的情况, 特别是三个中心所在的位置可能与整个夏季平均的情况有一定差异。因此, 本文先从初夏 6 月份的 500 hPa 位势高度场出发, 定义 6 月份的 EAP 遥相关中心, 以更好地反映初夏东亚上空环流场的配置特征。为了确定 EAP 遥相关中心, 我们参考 Huang and Li (1987) 的做法, 将菲律宾附近区域 (10°N~15°N, 115°E~125°E) 平均的 OLR 值与西太平洋—东亚地区 500 hPa 高度场求相关, 将得到的相关极值中心定义为 EAP 遥相关中心。图 3a、b 分别为针对初夏 6 月份和夏季 (6~8 月) 平均的相关图, 由图可见, 相关场的分布自热带西北太平洋向北都呈现“+、-、+”的 EAP 波列。然而, 与夏季相比, 6 月 EAP 遥相关中心位置明显偏南。以位于东亚的负异常为例: 6 月, 该负异常主体位置位于 35°N (图 3a), 而在夏季平均的结果中, 其中心位置位于 40°N。EAP 遥相关中心位置在 6 月和夏季之间的这种差异符合初夏环流系统位于较低纬度的特点, 说明 EAP 遥相关在夏季确实存在一定的季节内差异, 定义 6 月的 EAP 遥相关中心正是出于这个考虑。事实上, EAP 遥相关型是 6 月重要的遥相关型之一 (施能等, 1993; Shi and Zhu, 1993)。

根据图 3a, 选取 WP (15°N, 115°E)、EA (35°N, 125°E)、YO (55°N, 135°E) 三个中心为初夏 6 月 EAP 遥相关中心, 并参考 Wallace and Gutzler (1981) 的做法, 定义 6 月 EAP 遥相关强度

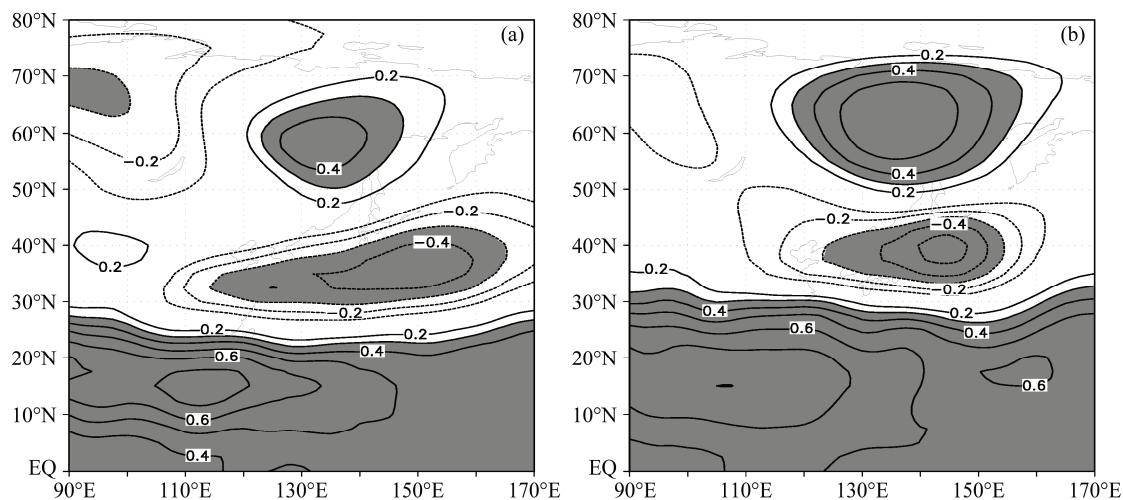


图 3 菲律宾周围 OLR 与西太平洋—东亚 500 hPa 位势高度场相关图: (a) 6 月; (b) 6~8 月。阴影: 相关系数超过 0.3, 通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验
Fig.3 The correlation coefficients of OLR averaged over the region (10°N–15°N, 115°E–125°E) and the geopotential height at 500 hPa from the western Pacific to East Asia in (a) Jun and (b) Jun–Aug (Areas with values above 0.3, i.e. significance level at $\alpha=0.05$ are shaded)

指数为: $EAPI=0.25 \times Z_{WP}-0.5 \times Z_{EA}+0.25 \times Z_{YO}$ (Z 为标准化之后的位势高度异常)。

图 4 为 6 月 EAP 指数的变化曲线。与华南 6 月降水变化 (图 2) 相比, EAP 指数也存在明显的年际振荡, 但是年代际变化不明显。我们还分别分析了三个中心点位势高度的变化趋势 (图略), 它们都呈现上升趋势, 但与降水的年代际变化明显不同。这说明华南 6 月降水年代际变化不能通过 EAP 指数或者其中一个中心点的变化给予解释, 应该是由另外的环流异常所导致。6 月 EAP 指数与华南降水的相关系数为 0.35, 通过 $\alpha=0.02$ 的显著性检验。与用 Huang (2004) 的方法定义的指数相比, 显著水平有一定提高, 说明本文定义的 EAP 指数能更好地反映华南 6 月降水异常的年际变化。本文的 EAP 指数和利用 Huang (2004) 方法定义的 EAP 指数之间的相关系数为 0.75, 两者之间能相互解释略多于 50% 的方差, 说明二者之间具有较明显的差别。

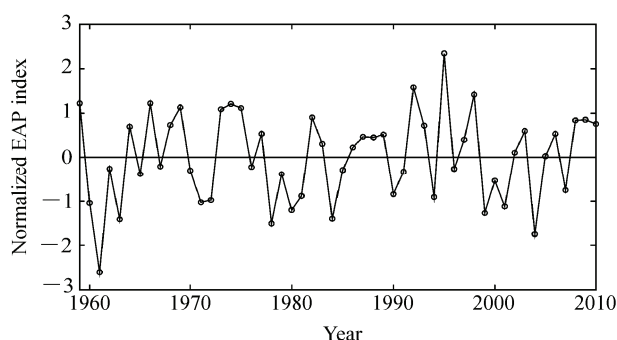


图 4 同图 2, 但为 EAP 遥相关指数

Fig.4 Same as Fig.2, but for the EAP (East Asia-Pacific) teleconnection index

5 降水与 EAP 遥相关的关系

图 5a 是我国东部地区站点降水对华南 6 月降水的回归场。由图可见, 高的正相关区集中在广东、广西地区, 长江中游地区有微弱的负相关区, 其它地区几乎没有信号。这一结果说明华南 6 月降水与我国其他地区降水没有明显的关联, 华南降水表现出显著的区域特性。

EAP 遥相关对我国东部地区降水有重要的影响。研究指出, 当 500 hPa 位势高度场在西太平洋和东亚地区呈现为“热带正异常、中纬度负异常、高纬度正异常”的 EAP 遥相关波列时, 副高偏南, 江淮流域的降水偏多, 黄河流域的降水偏少 (Huang and Li, 1987; Huang, 1992; Huang and Sun, 1992)。这是夏季平均的情况。下面, 我们针对 6 月份进行分析。

图 5b 是我国东部地区站点降水对 6 月 EAP 指数的回归场, 可以发现, 与 EAP 波列相关联的降水异常分布和与华南降水时间序列相关联的降水异常分布 (图 5a) 差异很大。与 EAP 指数呈显著正相关的区域位于长江中下游以南的广大地区, 同时在长江和黄河之间为大范围的负相关区域。由此可见, 6 月 EAP 遥相关不仅可以影响华南降水异常, 而且还可以影响到我国东部其他许多地区的降水异常, 说明 EAP 遥相关作为一种大尺度环流异常型, 它所影响的降水异常也覆盖广泛的地区。

上述与 6 月 EAP 波列相关联的雨带异常位置与 Huang (1992) 的结果相比偏南, 这是因为初夏 6 月副热带高压位于较低纬度, 江南地区位于副高西北侧的西南风中, 偏南偏强的副高有利于低纬度的

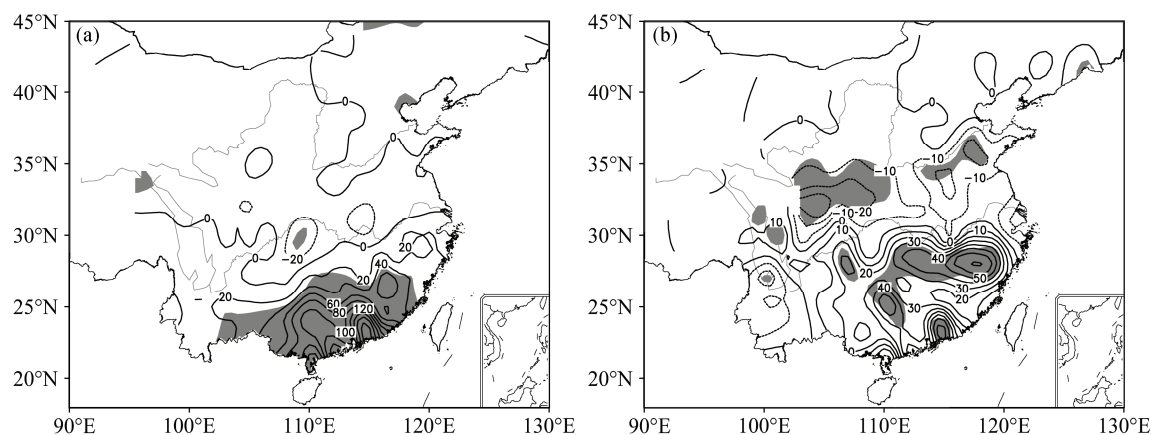


图 5 我国东部地区站点降水对标准化的 (a) 华南 6 月降水以及 (b) 6 月 EAP 指数的回归场 (单位: mm)。阴影: 通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验

Fig.5 The regression of station rainfall anomalies in eastern China onto the normalized (a) South China rainfall in Jun and (b) EAP index in Jun (units: mm). Areas with significance level at $\alpha=0.05$ are shaded

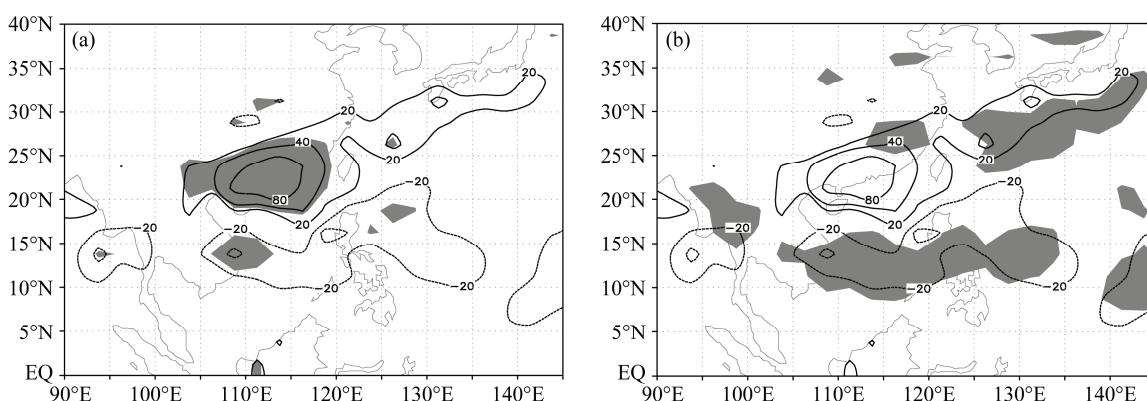


图6 同图5, 但为 GPCP 降水

Fig.6 Same as Fig.5, but for GPCP rainfall

水汽辐合异常,使江南地区降水增多,而淮河流域降水减少。随着季节推移,副高向北移动,夏季平均的副高位置位于长江以南,江淮流域位于副高的西北侧,副高的偏南偏强有利于该地区降水增多,而华南地区和黄河及以北地区降水减少。

以上的结果是基于台站降水资料得到的,因而无法得到海洋上的降水异常分布。下面我们利用 GPCP 全球降水资料重复上述分析。图 6a 是 GPCP 资料的降水场对华南 6 月降水时间序列的回归场,最显著的正相关区依然明显集中在华南地区。这一正相关区域向东北延伸至日本南部,而且在长江中游和南海、菲律宾海有负相关区,但都不显著。尽管我们使用的 GPCP 资料和台站资料时间长度有很大的区别(GPCP 资料为 1979~2010 年,而台站资料为 1959~2010 年),然而,在我国东部地区,根据这两套资料得到的结果非常相近(图 5a 和图 6a),说明我们的结果具有比较好的稳定性和可信度。

类似地,图 6b 给出了利用 GPCP 降水资料对 EAP 指数回归的降水异常场。当 EAP 指数为正时,经向上自南向北呈现出来的“一、+”降水异常分布非常明显,呈现出相间分布的带状降水异常,长江中下游以南地区和日本南部海域为显著的正相关区,在这个正相关区的北面,即在长江、黄河之间地区淮河流域、韩国、日本海南部为一弱的负相关区。同样地,根据 GPCP 资料和台站资料得到的结果在我国东部地区相近(图 5b 和图 6b)。

6 与 EAP 相关/独立的降水序列对应的环流异常比较

前面的分析得到 6 月 EAP 指数与华南降水的关系系数为 0.35,尽管通过了 $\alpha=0.02$ 的显著性检

验,但 EAP 指数的变化只能解释华南降水变化总方差的 10%左右,也就是说,华南降水变化的大部分方差是独立于 EAP 遥相关的。那么,与 EAP 相关的降水和与 EAP 独立的降水异常的环流背景有何异同?下面针对这个问题进行具体的分析。我们将华南 6 月降水分为与 EAP 相关的降水序列和与 EAP 独立的降水序列,具体的做法是,先将降水对 EAP 指数做线性回归得到与 EAP 线性相关的降水序列(以下称为“EAP 降水”),然后用原始降水序列减去相关序列得到独立于 EAP 的降水序列(以下称为“非 EAP 降水”)。为了更好地比较两个降水序列对应的环流异常,将两个序列各自进行标准化,再分别对位势高度场和风场进行回归,并比较两个序列对应的环流异常。

图 7 是 500 hPa 位势高度对两个降水序列的回归场。图 7a 是对 EAP 降水的回归,在 500 hPa 高度场有比较强的异常信号,降水偏多时,在西太平洋和东亚呈现出显著的“+、-、+”相间的分布,与 EAP 正异常型的分布相像,异常中心均能通过显著性检验。图 7b 是对非 EAP 降水回归的 500 hPa 高度场,异常信号较弱,只有华南地区上空有微弱的负异常中心能通过显著性检验,而且异常的整体分布与 EAP 相关型有明显的差异。

华南地区作为季风区,其 6 月降水和低层水汽输送有密切的联系。因而,下面比较两个降水序列对应的低层风场异常特征。对 EAP 降水回归的 850 hPa 风场(图 8a)从低纬度到高纬度依次呈现出反气旋、气旋、反气旋异常,且三个中心与 500 hPa EAP 遥相关中心位置相近,说明 EAP 遥相关型具有准正压的垂直分布特征。上述 850 hPa 风场异常表明,当 EAP 降水偏多时,副高的位置偏南偏西,

强度偏强, 湿的偏南风 and 干的偏北风在华南上空交汇, 降水增多。同时, 整个淮河流域上空为偏北风异常, 导致南风带来的水汽输送减少, 使淮河流域的降水偏少。因而, 图 8a 给出的 850 hPa 风场异常可以很好地解释图 6b 所显示的降水异常分布。

图 8b 为非 EAP 降水回归的 850 hPa 风场, 其主要异常信号为热带西北太平洋上空的反气旋性环流异常。该反气旋性环流异常在华南地区表现为显著的西南风异常, 使输送到华南地区的水汽增多, 最终导致华南降水偏多。在中高纬地区, 850 hPa 风场异常的信号很弱。值得一提的是, 淮河流域上

空没有出现偏北风异常, 这与图 8a 显示的结果不同。杨辉 (2011) 对引起华南 6 月降水异常的大气环流条件进行了分析, 指出中纬度西风槽带来的偏北风对华南降水偏多有重要作用。而本文的研究结果表明, 华南降水偏多之所以对应偏北风异常, 实际上是由于华南降水变化中与 EAP 遥相关型关联的降水分量所引起的。

热带西北太平洋对流层低层的反气旋性环流异常可以为华南地区输送更多的水汽, 在一年中的四个季节均是如此 (Zhang, 2001; Zhang and Sumi, 2002)。此外, Zhang (2001) 指出印度夏季风通过

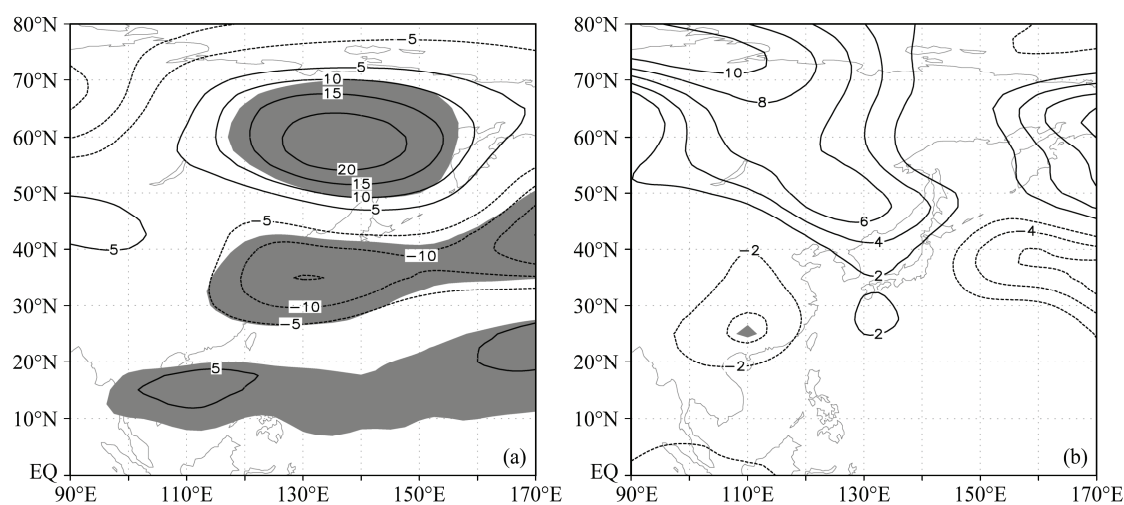


图 7 西太平洋—东亚 500 hPa 高度场对 (a) EAP 和 (b) 非 EAP 降水的回归 (单位: gpm)。阴影: 通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验

Fig.7 The regression of geopotential height at 500 hPa from the western Pacific to East Asia onto the Jun rainfall in South China (units: gpm): (a) EAP rainfall; (b) non EAP rainfall. The two rainfall time series are normalized, respectively, prior to the regression; areas with significance level at $\alpha=0.05$ are shaded

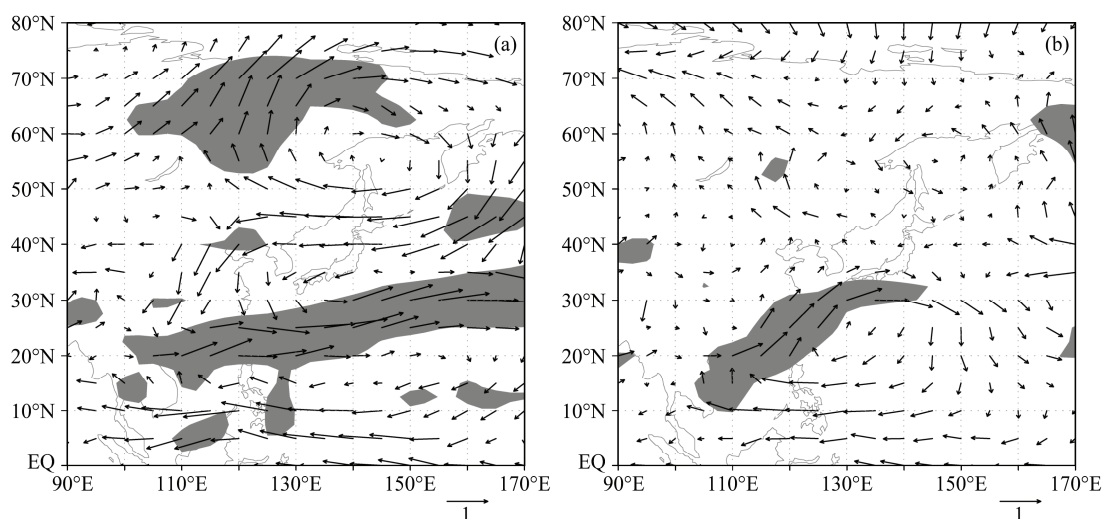


图 8 同图 7, 但为 850 hPa 风场异常 (单位: m/s)。阴影: 纬向风或经向风通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验

Fig.8 Same as Fig.7, but for 850-hPa wind anomalies with units in m/s. Areas with significance level at $\alpha=0.05$ for zonal or meridional wind anomalies are shaded

水汽输送可以影响到东亚夏季风。我们分析了华南 EAP 降水和非 EAP 降水与印度夏季风的关系。当 EAP 降水偏多时,印度洋北部有偏东风异常(图略,但在图 8a 中可以部分看出),对应印度夏季风偏弱,这与 Zhang (2001) 的结论一致。然而,非 EAP 降水异常对应的印度洋风场异常很微弱。我们利用描述印度夏季风强度的动力季风指数,进一步定量地分析了华南降水和印度夏季风的关系,发现动力季风指数和 EAP 降水的相关系数为 -0.37 ,通过 95% 的显著性检验,而和非 EAP 降水的相关系数仅为 0.05。由此可见,印度夏季风对 EAP 降水有重要影响,但不是影响非 EAP 降水的主要因子。

7 结论

6 月降水代表华南地区前汛期季风降水,该月份华南降水量最多,年际变化的幅度也最大。本文分析了 6 月华南降水变化特征及其与 EAP 遥相关型的关系,并研究了华南降水变化中与 EAP 遥相关型线性相关和独立的分量各自对应的降水和环流异常。

首先,考虑到初夏副高等环流系统位于较低纬度的特征,我们对原有的针对夏季(6~8 月)的 EAP 遥相关型定义稍做了调整,给出了针对 6 月份的 EAP 遥相关型定义,所得到的 EAP 指数与 6 月华南降水的相关系数为 0.35,通过 $\alpha=0.02$ 的显著性检验。

尽管 6 月华南降水和 EAP 指数显著相关,然而两者所对应的降水异常具有明显的差别。6 月华南降水变化表现出显著的区域特性,即华南降水变化与我国其他地区的降水没有明显的关系。但 EAP 遥相关型却对应我国东部地区大范围的降水异常。当 EAP 指数为正时,我国长江中下游以南的广大地区降水偏多,而在长江和黄河之间为降水偏少。尽管 EAP 指数对应显著的华南降水异常,但江西南部、浙江西南部的降水异常更为明显。

因而,我们将 6 月华南降水分 EAP 降水序列和非 EAP 降水序列,比较了二者所对应的环流异常的异同点。结果表明,这两个降水序列的正异常均对应华南地区对流层低层的西南风异常。这一西南风异常使输送到华南地区的水汽增多,从而降水偏多。然而,这两个降水序列对应的环流异常具有很明显的差异。EAP 降水异常对应的环流异常呈现出 EAP 相关型的分布特征,而非 EAP 降水异常则基

本上只与局地的环流异常有关。特别地,江淮流域偏北风异常只出现在 EAP 降水偏多时所对应的环流异常之中,进而和华南上空的偏南风共同构成南北风异常交汇的分布特点;而非 EAP 降水偏多时所对应的环流异常只有华南上空的偏南风,其北侧没有偏北风。

致谢 两位审稿人详细地指出了文稿中不足之处和修改建议。在此表示感谢。

参考文献 (References)

- Chan J C L, Zhou W. 2005. PDO, ENSO and the early summer monsoon rainfall over South China[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L08810.
- 陈艺敏, 钱永甫. 2005. 西太平洋暖池海温对华南前汛期降水影响的数值试验 [J]. *热带气象学报*, 21 (1): 13–23. Chen Yimin, Qian Yongfu. 2005. Numerical study of influence of the SSTA in western Pacific warm pool on precipitation in the first flood period in South China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21(1): 13–23.
- 邓立平, 王谦谦. 2002. 华南前汛期(4—6 月)降水异常特征及其与我国近海海温的关系 [J]. *热带气象学报*, 18 (1): 45–55. Deng Liping, Wang Qianqian. 2002. On the relationship between precipitation anomalies in the first raining season (April–June) in Southern China and SST over offshore waters in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 18 (1): 45–55.
- Huang G. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon — the EAP index [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21 (1): 41–52.
- Huang R H. 1992. The East Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 6 (1B): 25–37.
- 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]. *Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia*, April 10–15: 40–51.
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70 (1): 243–256.
- Kwon M H, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L21706.
- 李丽平, 章开美, 王超, 等. 2010. 近 40 年华南前汛期极端降水时空演变特征 [J]. *气候与环境研究*, 15 (4): 443–450. Li Liping, Zhang Kaimei, Wang Chao, et al. 2010. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (4): 443–450.
- Li X Z, Wen Z P, Zhou W. 2011. Long-term change in summer water vapor transport over South China in recent decades [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89A (1): 271–282.
- 梁建茵. 1994. 6 月西太平洋副高脊线的年际变化及其对华南降水的影响

- [J]. 热带气象学报, 10(3): 274–279. Liang Jianyin. 1994. The interannual variations of the subtropic high ridge position over western Pacific in June and its influence on precipitation in south of China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 10 (3): 274–279.
- 梁建茵, 吴尚森. 1999. 夏季广东降水异常变化与夏季风 [J]. 热带气象学报, 15 (1): 38–47. Liang Jianyin, Wu Shangsen. 1999. Variations of rainfall anomalies in Guangdong associated with summer monsoon [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 15 (1): 38–47.
- 陆日宇, 富元海. 2009. 夏季东亚和西北太平洋地区的气候变异及其机理 [J]. 地球科学进展, 24 (2): 123–131. Lu Riyu, Fu Yuanhai. 2009. Summer climate variability in East Asia and the western north Pacific and its mechanisms [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (2): 123–131.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1998. 东亚—太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响 [J]. 大气科学, 22 (5): 727–734. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1998. Influence of East Asia/Pacific teleconnection pattern on the interannual variations of the blocking highs over the northeastern Asia in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (5): 727–734.
- 罗会邦. 1999. 南海夏季风爆发及相关雨带演变特征 [M]// 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 423pp. Luo Huibang. 1999. The onset of South China Sea monsoon and evolutions of its associated rainbands (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 423pp.
- 马慧, 陈桢华, 姜丽萍, 等. 2009. 华南前汛期降水与我国近海海温的 SVD 分析 [J]. 热带气象学报, 25 (2): 241–245. Ma Hui, Chen Zhenhua, Jiang Liping, et al. 2009. SVD analysis between the annually first raining period precipitation in the South of China and the SST over offshore waters in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25(2): 241–245.
- Mao J Y, Chan J C L, Wu G X. 2011. Interannual variations of early summer monsoon rainfall over South China under different PDO backgrounds [J]. International Journal of Climatology, 31 (6): 847–862.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 65: 373–390.
- 钱维宏, 符娟兰, 张玮玮, 等. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. 地球科学进展, 22 (7): 673–684. Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. 2007. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (7): 673–684.
- 饶晓琴. 2008. 华南持续暴雨洪涝灾害严重华北阵雨频繁雨量多气温高—2008 年 6 月 [J]. 气象, 34 (9): 117–123. Rao Xiaojin. 2008. Durative rainstorms during pre-rainy season over South China with severe flood disasters, frequent rain showers in North China with excessive rainfall and high temperature [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (9): 117–123.
- Shi N, Zhu Q G. 1993. Studies on the northern early summer teleconnection patterns, their interannual variations and relation to drought/flood in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 10 (2): 155–168.
- 施能, 朱乾根, 古文保, 等. 1994. 夏季北半球 500 hPa 月平均场遥相关型及其与我国季风降水异常的关系 [J]. 南京气象学院学报, 17 (1): 1–10. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Gu Wenbao, et al. 1994. Northern summer 500 hPa monthly mean field teleconnection patterns and its relation to monsoon rainfall anomaly in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 17 (1): 1–10.
- 司东, 温敏, 徐海明, 等. 2008. 2005 年 6 月华南暴雨期间西太平洋副高西伸过程分析 [J]. 热带气象学报, 24 (2): 169–175. Si Dong, Wen Min, Xu Haiming, et al. 2008. Analysis of the westward extension of the western Pacific subtropical high during the heavy rain period over the southern China in June 2005 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (2): 169–175.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109 (4): 784–812.
- 吴丽姬, 温之平, 贺海晏, 等. 2007. 华南前汛期区域持续性暴雨的分布特征及分型 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 46 (6): 108–113. Wu Liji, Wen Zhiping, He Haiyan, et al. 2007. The distribution features and patterns of regional durative rainstorm during pre-rainy season over South China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 46 (6): 108–113.
- Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2010. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. J. Climate, 23 (9): 2389–2403.
- 吴尚森, 梁建茵. 1992. 华南前汛期旱涝时空分布特征 [J]. 热带气象学报, 8 (1): 87–92. Wu Shangsen, Liang Jianyin. 1992. Temporal and spatial characteristics of the drought and flood during the rainy season in South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 8 (1): 87–92.
- 吴晓彤, 梁必骥, 王安宇. 1995. 初夏南海海温对华南降水影响的数值模拟 [J]. 海洋学报, 17 (2): 38–43. Wu Xiaotong, Liang Biqi, Wang Anyu. 1995. Numerical study of influence of the SSTA in South China Sea on precipitation in the pre-rainy season in South China [J]. Acta Oceanological Sinica (in Chinese), 17 (2): 38–43.
- 杨辉. 2011. 中国华南地区 6 月降水变化特征及大气环流条件分析 [J]. 第四纪研究, 31 (1): 81–87. Yang Hui. 2011. Characteristics of precipitation in South China in June and atmospheric circulation analyses [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 31 (1): 81–87.
- 姚才, 钱维宏, 林振敏, 等. 2011. 华南季风降水对应的环流指数 [J]. 应用气象学报, 22 (3): 302–311. Yao Cai, Qian Weihong, Lin Zhenmin, et al. 2011. A circulation index reflecting the monsoon precipitation of South China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22 (3): 302–311.
- Zhang R H. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (5): 1005–1017.
- Zhang R H, Sumi A. 2002. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern winter, spring and autumn [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80 (2): 213–227.
- 张婷, 魏凤英. 2009. 华南地区汛期极端降水的概率分布特征 [J]. 气象学报, 67 (3): 442–451. Zhang Ting, Wei Fengying. 2009. Probability distribution of precipitation extremes during raining seasons in South China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 442–451.
- 张振清. 2007. 华南地区 6 月份降水异常的统计分析 [J]. 气象与环境科学, 30 (3): 78–80. Zhang Zhenqing. 2007. Statistical analysis on

- precipitation anomaly over South China in June [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 30 (3): 78–80.
- 郑彬, 梁建茵, 林爱兰, 等. 2006. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水 I. 划分日期的确定 [J]. 大气科学, 30 (6): 1207–1216. Zheng Bin, Liang Jianyin, Lin Ailan, et al. 2006. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. Part I: Determination of the division dates [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1207–1216.
- 郑彬, 谷德军, 李春晖, 等. 2007. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水 II. 空间分布特征 [J]. 大气科学, 31 (3): 495–504. Zheng Bin, Gu Dejun, Li Chunhui, et al. 2007. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. Part II: Spatial patterns [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 495–504.
- Zhou W, Li C, Chan J C L. 2006. The interdecadal variations of the summer monsoon rainfall over South China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 93 (3–4): 165–175.
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. “98” 华南暴雨科学试验研究 [M]. 北京: 气象出版社, 220pp. Zhou Xiuji, Xue Jishan, Tao Zuyu, et al. 2003. Numerical Study on Rainstorms over South China in 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 220pp.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 (第四版) [M]. 北京: 气象出版社, 649pp. Zhu Qian’gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Theories and Techniques of Synoptic Meteorology (The fourth edition) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 649pp.
- 宗海峰, 张庆云, 陈烈庭. 2008. 东亚—太平洋遥相关型形成过程与 ENSO 盛期海温关系的研究 [J]. 大气科学, 32 (2): 220–230. Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Chen Lieting. 2008. A study of the processes of East Asia–Pacific teleconnection pattern formation and the relationship to ENSO [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 220–230.