

郭恒, 张庆云. 2016. 北方雨季中国东部降水异常模态的环流特征及成因分析 [J]. 大气科学, 40 (5): 946–964. Guo Heng, Zhang Qingyun. 2016. The dominant modes of precipitation anomalies over eastern China during the northern China rainy season and the possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 946–964, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1510.15218.

北方雨季中国东部降水异常模态的环流特征及成因分析

郭 恒^{1,2} 张庆云¹

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 根据 1958~2011 年中国东部 (105°E 以东) 316 站逐日降水资料及 NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 利用统计分析、物理量诊断等方法, 探讨北方雨季 (7 月 11 日至 8 月 31 日) 中国东部降水异常模态及同期、前期的大气环流特征。分析发现, 北方雨季中国东部降水异常表现为三个相互独立的降水模态: 第一模态为偏西型, 当其时间系数为正 (负) 时, 河套地区降水偏多 (少), 江淮流域上游降水偏少 (多), 南方大部降水偏多 (少); 第二模态为北方一致型, 当其时间系数为正 (负) 时, 北方降水一致偏多 (少), 长江流域降水偏少 (多); 第三模态为偏东型, 当其时间系数为正 (负) 时, 东北南部至长江中游降水偏多 (少), 华东沿海降水偏少 (多)。研究发现, 造成北方雨季三个降水异常模态的环流特征各不相同: 偏西型降水主要受西亚高空副热带西风急流位置南北偏移影响; 北方一致型降水主要由东亚—太平洋遥相关波列导致; 偏东型降水主要与海陆气压异常对比造成的东亚夏季风变化有关。此外, 三个模态与前期环流异常有密切联系。第一模态的正 (负) 异常由 7 月上旬 200 hPa 来自北大西洋的异常波列造成乌拉尔山位势高度负 (正) 异常和巴尔喀什湖以南位势高度正 (负) 异常引起。第二模态的正 (负) 异常与前期 7 月上旬 200 hPa 北大西洋上位势高度负 (正) 异常产生的沿中纬度 (高纬度) 路径向下游传播的波列有关。第三模态的正 (负) 异常由春季 3 月份低层蒙古上空异常的气旋 (反气旋) 持续至同期造成。

关键词 北方雨季 降水异常 西风急流 副热带高压

文章编号 1006-9895(2016)05-0946-19

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1510.15218

The Dominant Modes of Precipitation Anomalies over Eastern China during the Northern China Rainy Season and the Possible Causes

GUO Heng^{1,2} and ZHANG Qingyun¹

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on the daily mean rainfall data at 316 China meteorological stations and the NCEP–NCAR reanalysis dataset for 1958–2011, the dominant modes of precipitation anomalies over eastern China (east of 105°E) during the northern China rainy season (11 July to 31 August) and the accompanying circulation as well as precursors, are

收稿日期 2015-06-24; 网络预出版日期 2015-10-09

作者简介 郭恒, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事天气动力学与短期气候预测研究。E-mail: hnkfgh2011@sina.cn

通讯作者 张庆云, E-mail: zqy@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375055, 国家重点基础研究发展计划 2014CB954301、2012CB957803

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41375055), National Basic Research Programs of China (Grants 2014CB954301, 2012CB957803)

investigated with EOF and composite analysis, along with other methods. The results show that there are three dominant modes—the first EOF mode (EOF1) depicting a meridional tripole pattern, the second EOF mode (EOF2) depicting a seesaw precipitation anomaly between northern China and the Yangtze River valley, and the third EOF mode (EOF3) depicting a seesaw precipitation anomaly between areas from Northeast China to the upper reaches of the Yangtze River and coastal areas in East China. The major circulation characteristics resulting in the three modes are different. EOF1 is attributed to the meridional displacement of the West Asian subtropical westerly jet stream (WAJS), EOF2 is attributed to the East Asian–Pacific (EAP) teleconnection pattern, and EOF3 is attributed to the anomalous East Asian summer monsoon (EASM) due to an anomalous sea level pressure gradient between East Asia and the western North Pacific. Possible causes of the above anomalous circulation are also analyzed. For EOF1, the 200 hPa wave train from the North Atlantic causes the seesaw geopotential height anomalies between the Ural mountains and Balkhash Lake in early July, leading to the meridional displacement of the WAJS. For EOF2, the EAP teleconnection pattern is closely associated with the geopotential height anomaly over the North Atlantic and corresponding wave train dating from early July. For EOF3, the anomalous cyclonic/anticyclonic circulation over Mongolia beginning from March is the precursor of stronger/weaker EASM.

Keywords Northern China Rainy Season, Anomalous precipitation, Westerly jet stream, Western Pacific subtropical high

1 引言

受东亚热带、副热带季风环流强弱及其相互作用和季节内进退快慢影响, 夏季我国东部降水不但有显著的年代际、年际、季节内变化, 还有显著的空间变化。近几十年来我国东部夏季降水年代际变化的主要特征表现为 20 世纪 70 年代末之后夏季江淮流域降水增多而华北降水明显减少 (黄荣辉等, 1999; Wang, 2001), 1992/1993 年之后降水在华南明显增多 (Kwon et al., 2007; Ding et al., 2008; Wu et al., 2010), 进入 21 世纪前 10 年夏季淮河流域降水明显增多、长江中下游降水减少 (Zhu et al., 2011; 张庆云和郭恒, 2014)。异常降水事件引发旱涝灾害, 给当地工农业生产及人民生活造成极大影响。

夏季我国东部降水的年代际变化受东亚夏季风年代际变化影响 (王会军和范可, 2013; 丁一汇等, 2013)。20 世纪 70 年代后期, 青藏高原前冬和春季积雪呈现年代际偏多而热带中东太平洋海表温度则发生年代际增温, 由此减小了亚洲地区夏季海陆热力对比, 使得东亚夏季风发生了年代际减弱 (Ding et al., 2009; 邓伟涛等, 2009); 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 青藏高原春季积雪继续维持偏多的状态, 日本以南西北太平洋海温异常偏暖, 进一步减小了亚洲地区夏季海陆热力对比, 使得东亚夏季风继续维持年代际减弱。东亚夏季风从 20 世纪 70 年代后期开始的年代际减弱导致亚洲夏季风水汽输送也同时发生了年代际减弱 (陈际龙和黄荣辉, 2008), 使得我国东部夏季雨带在 21 世纪前不断南移 (丁一汇等, 2013)。

夏季我国东部降水年际、季节、月际变化与东亚夏季风环流系统多时间尺度变化关系的研究也取得了一系列有应用价值的成果, 相关研究主要集中在东亚夏季风环流系统, 如东亚季风槽、梅雨锋、西太平洋副热带高压、南亚高压及北方冷空气和南半球环流系统异常等方面 (Tao and Chen, 1987; 张庆云和陶诗言, 1998; 徐海明等, 2001; 张琼和吴国雄, 2001; 张庆云等, 2003; 据建华等, 2005; 陈烈庭等, 2007; 贾燕和管兆勇, 2010; 马音等, 2011; 刘屹岷等, 2013)。陶诗言和卫捷 (2006) 总结认为, 东亚夏季风环流系统的梅雨锋、副热带高压、南亚高压活动与亚洲上空副热带西风急流中的准静止波列有关, 指出亚洲副热带高空西风急流区 Rossby 波活动应作为东亚夏季风系统的一个重要成员。亚洲高空副热带西风急流区准静止波列的活动与东亚季风环流系统及东亚天气气候异常关系受到高度关注并取得一系列有应用价值的成果。杨莲梅和张庆云 (2007) 研究发现, 夏季东亚副热带西风急流 Rossby 波扰动偏强 (偏弱) 年伴随的急流位置偏南 (北) 会导致南海季风槽减弱 (加强)、梅雨锋加强 (减弱), 进而造成中国东部降水呈现出 “—+—” (“+—+”) 的异常分布; 杜银等 (2009) 研究指出, 在讨论东亚高空副热带急流位置与中国东部降水关系时, 要综合考虑急流的南北偏移、急流中心的東西偏移和急流形态的变化; 宣守丽等 (2011) 探讨了东亚高空西风急流在夏季 6、7、8 各月南北偏移对我国东部降水异常分布的影响及可能成因; 黄荣辉等 (2013) 认为沿亚洲副热带急流传播的 “丝绸之路” 遥相关型对 20 世纪 90 年

代末我国东部夏季降水格局的变化有重要作用。陆日宇等 (2013) 总结了近年来夏季东亚高空急流变化成因及其对东亚夏季风环流和降水影响的研究成果。

综上可见, 中国东部降水年代际、年际、季节、季节内异常成因机理的研究, 大多集中在夏季 (6~8 月平均) 或 6、7、8 逐月降水异常方面, 这对于了解我国东部夏季平均降水及月际变化特征是十分必要的。但 Tao and Chen (1987) 曾指出, 东亚夏季风环流系统的演变以及我国东部夏季雨带向北推进过程的阶段性特征并不是以月为单位完成的, 比如华南前汛期盛期开始的标志是 5 月中下旬的南海夏季风爆发 (何金海和罗京佳, 1999; 梁建茵和吴尚森, 2002), 梅雨期的开始则发生在东亚高空西风急流 6 月上旬迅速北跳之后 (葉篤正等, 1958; 李崇银等, 2004)。这些研究说明, 我国东部区域性降水集中时段与东亚夏季风环流系统阶段性演变密切相关, 以月份的划分研究夏季平均或逐月降水异常的环流特征及机理, 不能客观反映我国东部夏季降水随东亚夏季风环流系统阶段性向北推进的事实, 同时也掩盖了各个区域主雨季降水的主要环流特征。为了更客观细致的了解夏季我国东部不同区域主雨季降水异常的成因机理, 需要按照东亚夏季环流季节内推进的自然阶段及其主雨带的演变规律进行研究。

我国东部夏季降水主雨带的自然演变时段, 按照降水集中程度基本可分为华南前汛期、梅雨期及华北东北雨季 (江志红等, 2006; 王遵娅和丁一汇, 2008)。Zhang et al. (2006) 研究指出, 气候平均的东亚高空西风急流中心在一年的第 37~39 候 (7 月第 1 候~第 3 候) 很短时间内从 140°E 附近迅速西移至 90°E 附近青藏高原上空, 之后我国长江流域变为急流出口区而局地上升气流受到抑制导致江淮梅雨结束 (杜银等, 2008), 随之我国北方如黄河下游、华北、东北进入雨季。因此, 讨论我国北方雨季降水异常的研究时段始于 7 月中旬比 7 月上旬更为合理。有关北方降水取得的有应用价值的研究成果, 主要集中在降水的长期变化趋势、空间分布特征、水汽输送异常、外强迫因子以及季节内振荡等方面 (张人禾, 1999; 孙淑清等, 2002; 陆日宇, 2002; 据建华等, 2006; 武炳义等, 2008; 刘海文和丁一汇, 2010; 沈柏竹等, 2011; 王晓芳等, 2013; 丁婷等, 2015)。实际天气过程表明, 北方

雨季也是我国华南的后汛期降水时段, 此时的环流异常不但影响北方地区降水, 同时还造成我国东部其他地区降水异常, 因此该时段内我国北方降水与我国东部其他地区降水的关系及成因机理值得深入研究。为了更深入地了解北方雨季我国东部的降水异常特征, 本文选取北方雨季时段为 7 月 11 日至 8 月 31 日, 重点探讨该时段我国东部降水异常的同期、前期环流特征。第 2 节是本文资料与方法; 第 3 节探讨北方雨季降水异常模态及主要环流特征; 第 4 节探讨北方雨季降水异常模态的前期环流特征; 第 5 节是结论与讨论。

2 资料和方法

1958~2011 年逐日再分析数据集, 水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向 17 个气压层 (Kalnay, et al, 1996) 来自于美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心; 1958~2011 年降水资料来自于中国气象局整编的 756 个地面观测站的逐日降水数据, 并从 105°E 以东地区选出无缺测的 316 站代表我国东部降水。

文章采用距平方案的经验正交函数分解 (Empirical Orthogonal Function, EOF), 对分解出的模态依据 North et al. (1982) 的准则进行独立性检验。为了体现降水实际空间变化的量值, 采用吴洪宝和吴蕾 (2010) 的方法对各特征向量进行了变换, 并将特征向量每个站点变换后的值都除以该站点降水的气候平均值以化为距平百分率的形式。此外还利用合成分析、线性回归等方法, 并对统计结果进行 t 检验 (魏凤英, 2007)。

根据 Takaya and Nakamura (1997, 2001) 推导的三维波活动通量描述准定常 Rossby 波的能量频散特征。该通量在 WKB 近似假定下与波位相无关, 且与波列的局地群速度方向一致; 其基本流场包含了不均匀的纬向和经向风场, 更适合描述夏季蜿蜒曲折的中高纬背景流场。

3 北方雨季降水异常模态及环流特征

利用 1958~2011 年中国逐日降水资料, 对 105°E 以东 316 站 7 月 11 日至 8 月 31 日时段累积降水进行经验正交函数分解, 只有前三个模态通过 North et al. (1982) 的独立性检验; 对这三个模态的时间系数进行标准化处理, 并据不同的时间系数标准化值定义各模态正、负异常年 (去除了三个模态

共有年), 重点探讨前三个降水异常模态正(负)异常年环流特征。

3.1 第一模态(偏西型降水)及其环流特征

北方雨季降水异常第一模态(EOF1)的解释方差为 14.02%, 图 1a 是其空间分布。由图可见, 异常大值区表现为河套、南方大部降水正异常, 江淮流域上游降水负异常, 也即 EOF1 的时间系数为正(负)异常时, 我国东部呈现河套地区降水偏多(少)、江淮流域上游降水偏少(多)、南方大部降水偏多(少)的降水分布。考虑到北方的降水异常中心位于偏西的河套地区, 将该模态称为偏西型降水。图 1b 是该模态的标准化时间系数序列(PC1), 从图中虚线可见, PC1 有明显的年代际变化, 即 20 世纪 60 年代末到 70 年代末、90 年代中期到 21 世

纪初 PC1 处于年代际的正位相, 20 世纪 80 年代至 90 年代初位于年代际的负位相。PC1 还有清楚的年际变化(图 1b 实线), 据此定义 $PC1 > 1.0$ 为模态正异常代表年, $PC1 < -1.0$ 年为模态负异常代表年, 得到正异常代表年有 7 年(1961、1973、1994、1996、1997、2002、2006), 负异常代表年有 8 年(1962、1963、1965、1982、1989、2003、2010、2011)。

为了解北方雨季偏西型降水的环流特征, 图 2 给出了对应正、负异常代表年份的高、中、低层环流异常合成。从图 2 可见, EOF1 异常代表年亚洲环流最显著的异常特征(阴影区)分别出现在高层 200 hPa 的西亚($50^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{E}$)高空副热带西风急流区(图 2a、b)及低层 850 hPa 东亚季风区(图

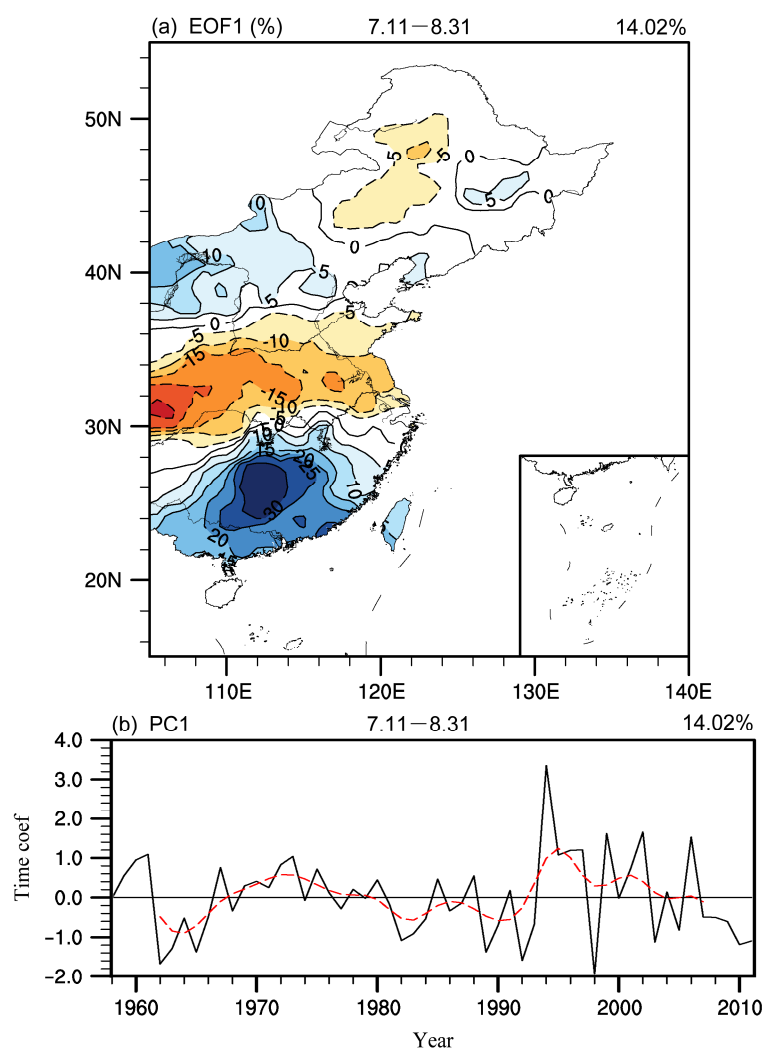


图 1 1958~2011 年我国东部北方雨季降水异常第一模态(偏西型)的 (a) 空间分布及 (b) 标准化时间系数序列(虚线为 9 年滑动平均)

Fig. 1 (a) The first EOF mode of the precipitation in eastern China during the northern China rainy season and (b) its normalized time series with a 9-year running mean (curve)

2e、f), 500 hPa 位势高度距平场的对比并不明显(图 2c、d), 因此我们重点探讨 200 hPa、850 hPa 环流异常与偏西型降水的关系。200 hPa 环流异常合成表明, EOF1 正异常年, 亚洲纬向风的显著正、负距平中心分别出现在 40°N 以北及以南的西亚地区(图 2a), 对应西亚急流轴在北方雨季时段(7 月 11 日至 8 月 31 日)始终位于气候态北侧(图 3), 即西亚高空副热带西风急流位置偏北有利于北方西部降水偏多; EOF1 负异常年, 亚洲纬向风的显著正、负距平中心分别出现在 40°N 以南及以北的

西亚地区(图 2b), 对应西亚急流轴在北方雨季时段始终位于气候态南侧(图 3), 即西亚高空副热带西风急流位置偏南不利于北方西部产生降水; 可见西亚高空副热带西风急流的南北偏移对北方雨季偏西型降水的形成有重要作用。850 hPa 环流异常的合成表明, 在 EOF1 正异常年, 东亚季风区出现显著的气旋性环流异常, 即东亚热带季风槽区($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$)为西风距平、副热带江淮流域呈现东风距平(图 2e), 东亚热带、副热带纬向风距平这种分布特征表明东亚热带季风偏强, 有利于南方

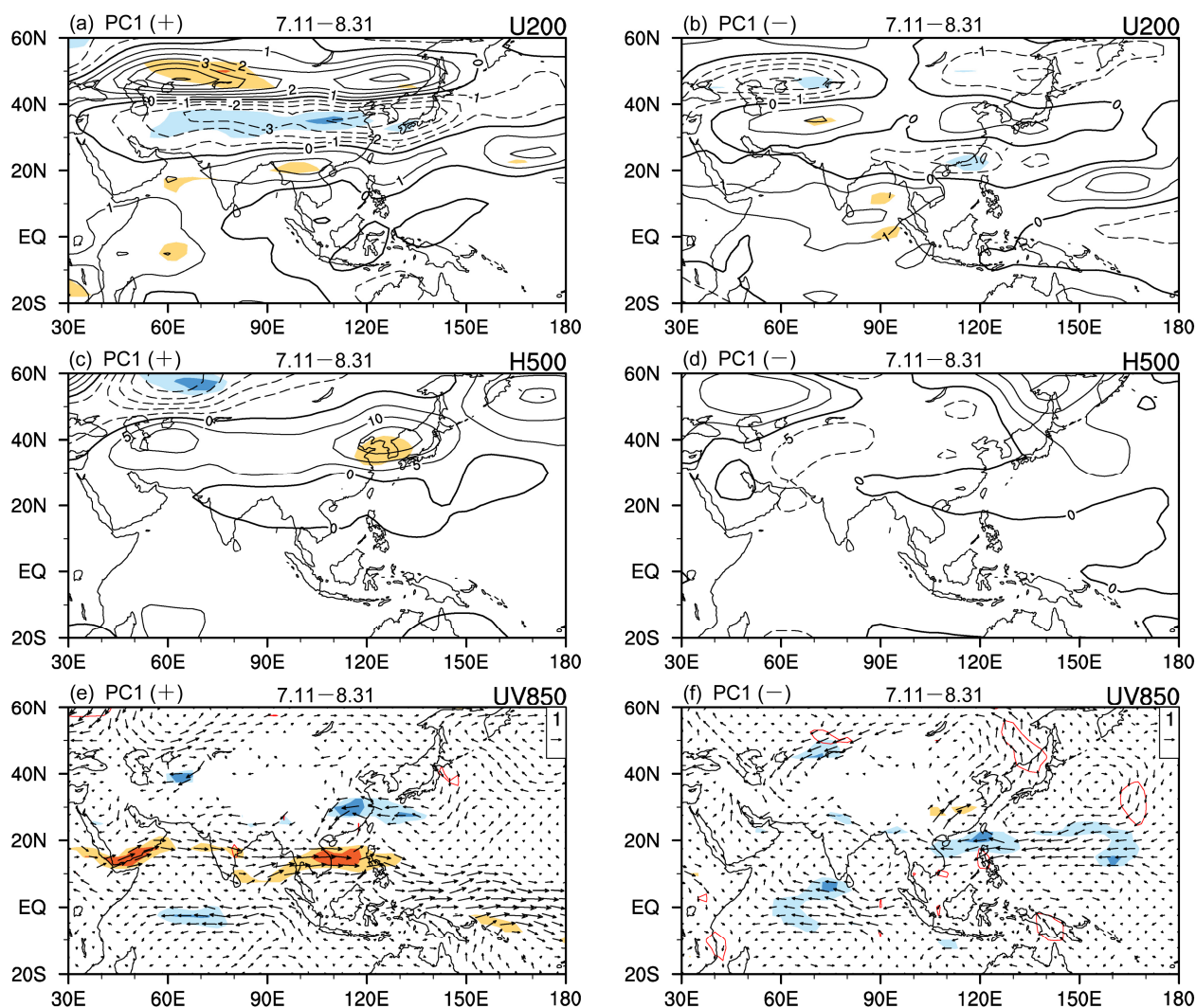


图2 我国东部北方雨季降水异常第一模态(偏西型)(a、c、e)正异常年和(b、d、f)负异常年合成的(a、b)200 hPa 纬向风场(单位: m s^{-1})、(c、d)500 hPa 位势高度场(单位: gpm)、(e、f)850 hPa 矢量风场的距平(单位: m s^{-1})。合成图上浅、深阴影区分别表示置信水平为 95%、99% 的区域, 冷、暖色分别表示负、正异常区; 矢量风场合成图上阴影表示纬向风场显著的区域, 红线包围的区域表示经向风场显著的区域

Fig. 2 Composites of the (a, b) 200 hPa zonal wind (units: m s^{-1}), (c, d) 500 hPa geopotential height (units: gpm), and (e, f) 850 hPa wind anomalies (units: m s^{-1}) in years with (a, c, e) positive and (b, d, f) negative anomalies of the first EOF mode of the precipitation in eastern China during the northern China rainy season. Light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively; cold- and warm-color shaded areas indicate confident negative and positive anomalies; shaded areas and areas encircled by red lines in the 850 hPa wind field indicate confident zonal and meridional wind anomalies, respectively

地区降水偏多、江淮流域降水偏少; EOF1 负异常年, 东亚季风区出现显著的反气旋性环流异常, 即东亚热带季风槽区呈现东风距平、副热带江淮流域呈现西距平(图 2f), 说明东亚热带季风环流减弱, 使得我国南方降水偏少、江淮流域降水偏多。由此可见, 偏西型降水的环流特征主要是西亚高空副热带西风急流位置的南北偏移和东亚热带季风环流的强弱变化。

那么上游西亚高空急流位置的南北偏移与下游东亚热带季风环流的强弱是通过什么过程联系起来的? 夏季南亚高压是北半球高层中低纬度最强大的环流系统, 东西边界横跨亚洲大陆, 其东部的形态变化对东亚夏季风环流强弱有直接影响。因此, 这里给出 EOF1 正、负异常年 200 hPa 南亚高压的位势高度实况合成, 以“1252”闭合线代表南亚高压的范围(图 4)。正异常年南亚高压的东脊点位置比气候态明显偏西, 同时东亚热带地区(20°N~30°N, 110°E~120°E)上空 200 hPa 散度场呈显著正异常(图 4a), 高层辐散异常有利于低层上升运动加强, 导致东亚热带季风偏强; 而负异常年南亚高压东脊点位置比气候态明显偏东, 同时东亚沿海热带地区上空 200 hPa 散度场呈显著负异常(图 4b), 高层辐合异常抑制了低层上升运动, 造成东亚热带季风环流减弱。图 4 说明 EOF1 正、负异常年, 东亚热带季风环流的加强(减弱)与南亚高压东脊点偏西(东)有关。

由上述分析可见, 北方雨季时段河套地区降水偏多(少)、江淮流域上游降水偏少(多)及南方大部降水偏多(少)的偏西型降水分布对应环流特征主要表现为 200 hPa 西亚高空副热带西风急流偏北(南)及东亚热带季风环流加强(减弱)。在西亚高空副热带西风急流偏北(南)时, 南亚高压东脊点位置偏西(东), 使得东亚热带地区上升运动加强(减弱), 造成东亚热带季风偏强(弱)。说明西亚高空副热带西风急流位置南北偏移和南亚高压东脊点的东西偏移对北方雨季偏西型降水有重要影响。

3.2 第二模态(北方一致型降水)的环流特征

北方雨季降水异常第二模态(EOF2)解释方差为 11.21%, 图 5a 是其空间分布。EOF2 显示出北方全区与长江流域降水呈反向变化的特征, 当 EOF2 时间系数为正(负)时, 北方全区降水一致偏多(少), 而长江流域降水偏少(多), 称该模态为北

方一致型降水。图 5b 是该模态的标准化时间系数序列(PC2), 从图中虚线可见, PC2 有明显的年代际变化, 20 世纪 60 年代至 70 年代中期、80 年代中期至 90 年代中期位于年代际正位相, 而 70 年代末至 80 年代初、90 年代中期至 21 世纪的前 10 年位于负位相。PC2 还呈现出清楚的年际变化(图 5b 实线), 据此定义 $PC2 > 1.1$ 及 $PC2 < -1.1$ 为模态正、负异常代表年, 得到正异常代表年有 7 年(1959、1966、1967、1976、1978、1985、2003 年), 负异常代表年有 5 年(1969、1980、1982、1993、2002 年)。

为了解北方一致型降水的环流特征, 图 6 给出了对应的正、负异常年的高、中、低层环流合成。从 200 hPa 纬向风距平场可见, 在 EOF2 正异常年, 亚洲地区纬向风的最大正、负距平分别出现 40°N 以北和以南的东亚中纬度(图 6a), 说明东亚(100°E~130°E)高空副热带西风急流区位置偏北; 而在 EOF2 负异常年, 亚洲纬向风最大正、负距平出现在 40°N 以南和以北的东亚中纬度地区(图 6b), 即东亚高空副热带西风急流位置偏南。在 500 hPa 高度距平场上, EOF2 正异常年东亚地区从低纬至高纬出现“一、+、-”的距平波列, 距平中心分别位于南海、淮河流域及贝加尔湖以东(图 6c); 而 EOF2 负异常年东亚地区从低纬至高纬出现“+、-、+”的距平波列, 距平中心分别位于台湾附近、朝鲜半岛及东北亚地区(图 6d); 且正、负异常年 500 hPa 最显著的异常区均出现在东亚中高纬度。低层 850 hPa 风场的异常与 200、500 hPa 一致, EOF2 正异常年, 显著的西风距平出现在东亚中纬度 40°N 以北, 40°N 以北的贝加尔湖以东地区呈现异常的气旋性环流, 而长江流域则出现了异常的反气旋性环流, 黄河以北地区处于异常的辐合风场中, 有利于北方降水偏多、长江流域降水偏少; EOF2 负异常年, 朝鲜半岛为异常的气旋性环流, 台湾以东为异常的反气旋性环流, 长江流域位于二者西侧异常的辐合风场中, 有利于降水偏多。

我们注意到, EOF2 正、负异常年中层 500 hPa 环流显示出的异常波列与先前研究发现的东亚—太平洋型经向遥相关(East Asian-Pacific teleconnection, EAP)(Nitta, 1987; 黄荣辉和李维京, 1988)十分类似, 而且高、中、低层环流异常具有较一致的分布形势, 也符合 Kosaka and Nakamura (2006)发现的 EAP 型同时存在于对流层

低层和中高层的事实。为了进一步证明 EOF2 和 EAP 型的关系, 这里给出 EOF2 正、负异常年合成的 $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 平均的纬向风距平的纬度—气压

垂直剖面 (图 7)。在 EOF2 正异常年, 30°N 附近约 600 hPa 以上副热带对流层出现显著的纬向风负距平, 而 40°N 附近整个中纬度对流层则出现显著

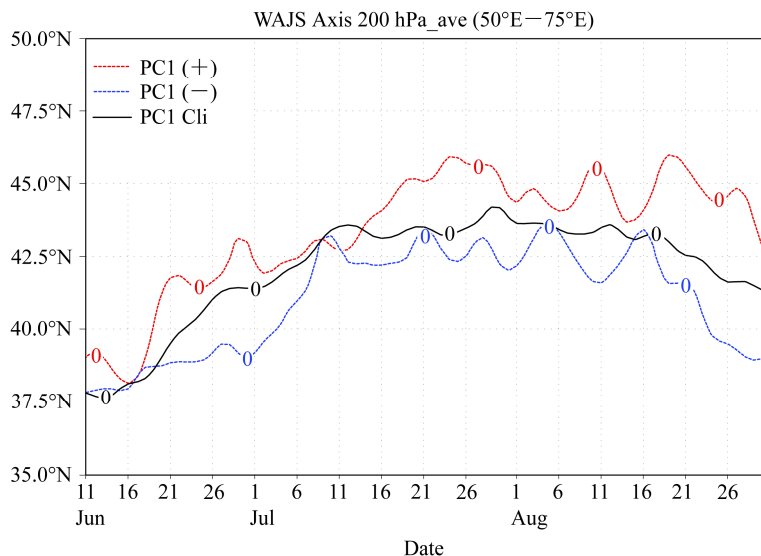


图3 我国东部北方雨季降水异常第一模态 (偏西型) 的 200 hPa 西亚急流轴 ($50^{\circ}\text{E}\sim 75^{\circ}\text{E}$ 平均的纬向风经向梯度零线) 五天滑动平均的季节内演变合成图。黑实线表示气候态; 红虚线表示模式正异常; 蓝虚线表示模式负异常

Fig. 3 Composites of the 200 hPa West Asian subtropical westerly jet stream axis (averaged over $50^{\circ}\text{E}\sim 75^{\circ}\text{E}$) in years with positive (red dashed line) and negative (black dashed line) anomalies of the first EOF mode of the precipitation in eastern China during the northern China rainy season (black solid line indicates the climatic mean)

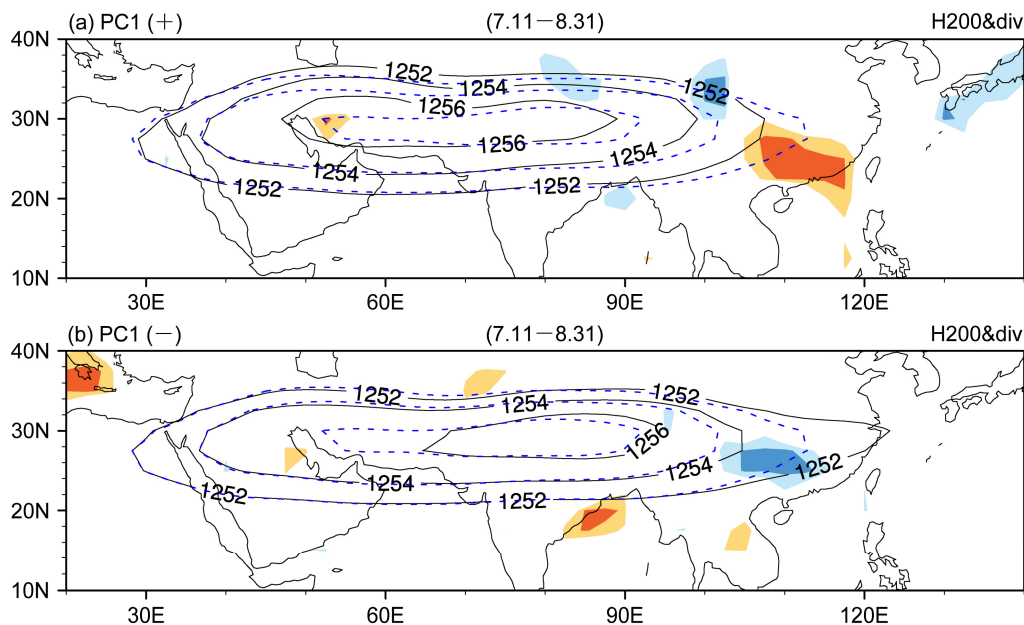


图4 我国东部北方雨季降水异常第一模态 (偏西型) (a) 正、(b) 负异常年合成的 200 hPa 南亚高压实况。黑实线为合成场, 蓝虚线为气候态, 1252 dagpm 起画, 间隔 2 dagpm。填色区为散度异常通过显著性检验的区域, 浅、深阴影区分别表示置信水平为 95%、99% 的区域, 冷、暖色分别表示负、正异常区

Fig. 4 Composites of the actual 200 hPa geopotential height (units: dagpm) in years with (a) positive and (b) negative anomalies of the first EOF mode of the precipitation in eastern China during the northern China rainy season (blue dashed lines indicate the climatic mean; cold- and warm-color shaded areas indicate confident negative and positive divergence anomalies; light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively)

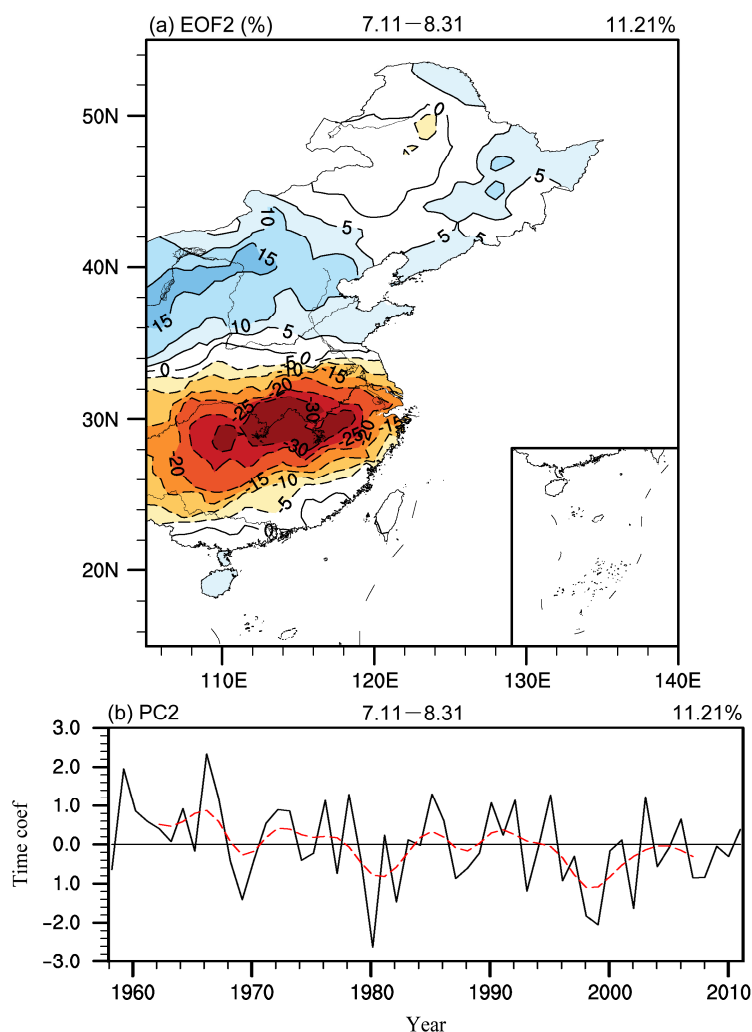


图5 1958~2011年我国东部北方雨季降水异常第二模态(北方一致型)的(a)空间分布及(b)标准化时间系数序列(虚线为9年滑动平均)

Fig. 5 As in Fig. 1 but for the second EOF mode

的纬向风正距平; EOF2 负异常年, 30°N 附近约 600 hPa 副热带对流层出现显著的纬向风正距平, 而 40°N 以北整个中高纬度对流层则出现显著的纬向风负距平。EOF2 正、负异常年的纬向风异常垂直分布呈现明显的从副热带到中高纬度的波列结构, 并且异常分布随高度向北倾斜, 这与先前的研究结果一致 (Kosaka and Nakamura, 2006)。因此, EOF2 所代表的北方一致型降水对应的主要环流特征正是 EAP 型遥相关波列。

综上所述, 北方雨季时段北方全区降水偏多(少)及长江流域降水偏少(多)的北方一致型降水分布主要环流特征表现为从南海(台湾附近)、淮河流域(朝鲜半岛)至贝加尔湖以东(东北亚)地区“一、+、-”(“+、-、+”)的东亚—太

平洋型遥相关波列。

3.3 第三模态(偏东型降水)的环流特征

北方雨季降水异常第三模态(EOF3)的解释方差为 9.05%, 图 8a 是其空间分布。相对于前两个模态, EOF3 表现为东北南部到长江中游与华东沿海降水反向变化的特征, 且降水异常大值带呈明显的经向性, 当时间系数为正(负)异常时, 东北南部到长江中游降水偏多(少), 华东沿海降水偏少(多)。考虑到北方地区的降水异常中心明显偏东, 将 EOF3 称为偏东型降水。图 8b 是该模态的标准化时间系数序列(PC3), 其年代际变化(图 8b 虚线)表现为: 20 世纪 60 年代与 90 年代处于正位相, 70 年代至 80 年代末具有明显的波动, 21 世纪初进入负位相。PC3 还有清楚的年际变化(图 8b

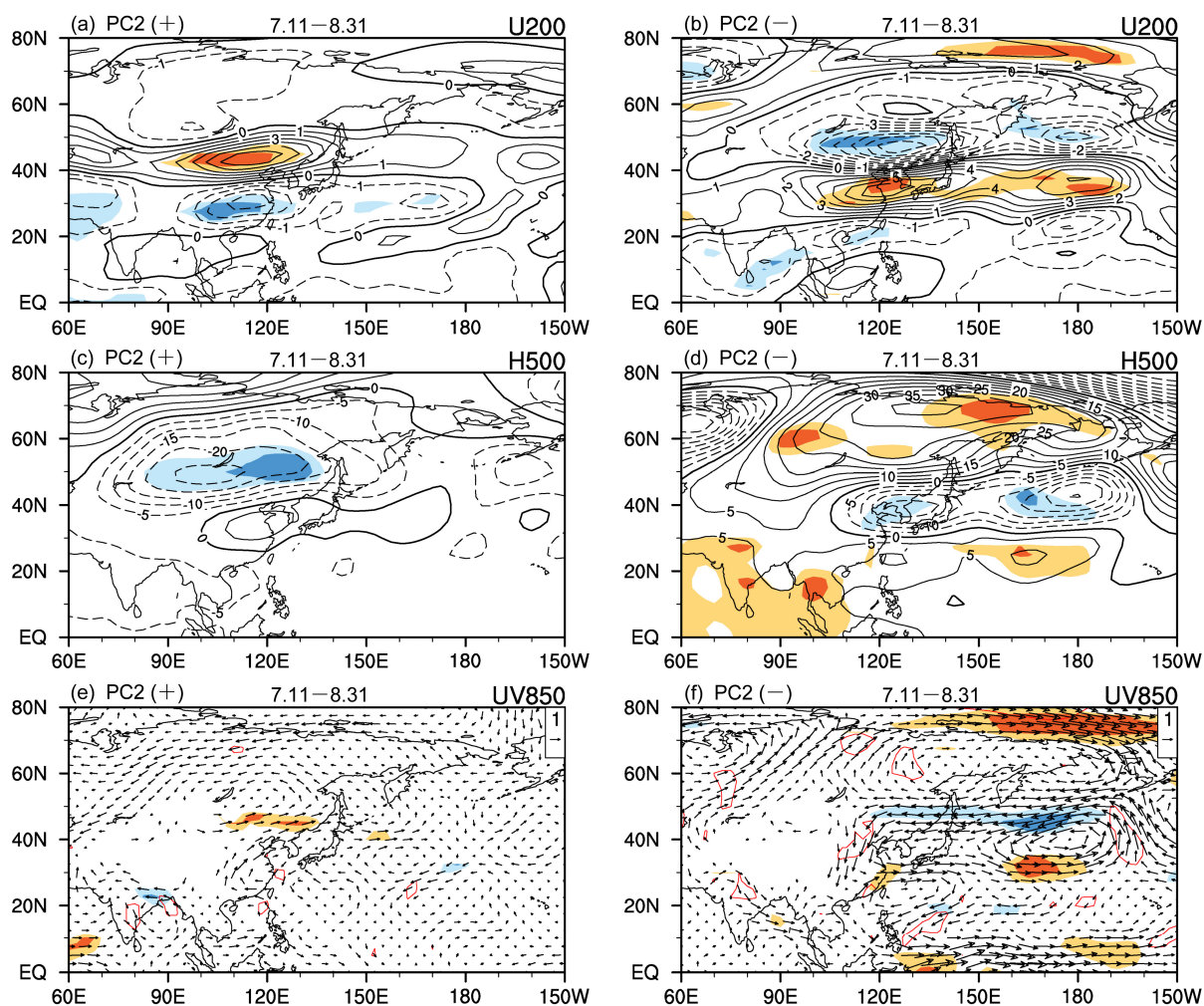
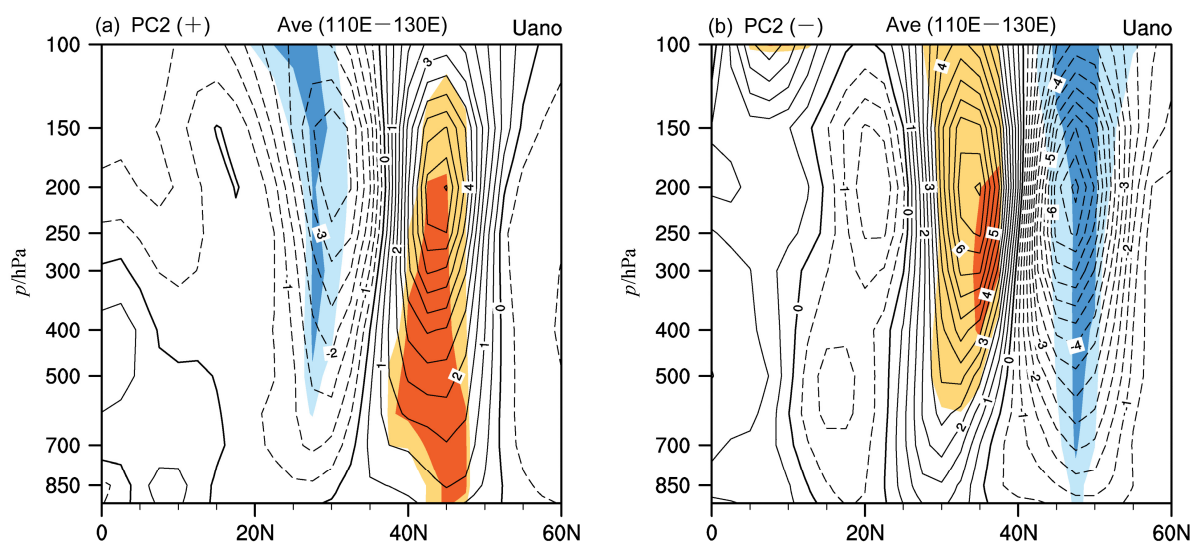


图6 同图2, 但为第二模态

Fig. 6 As in Fig. 2 but for the second EOF mode

图7 我国东部北方雨季降水异常第二模态(北方一致型)(a)正异常年和(b)负异常年合成的110°~130°E平均的纬向风距平(单位: m s^{-1})的纬度—气压剖面。浅、深阴影区分别表示置信水平为95%、99%的区域,冷、暖色分别表示负、正异常区Fig. 7 Composites of the meridional-vertical sections of zonal wind anomalies (units: m s^{-1}) averaged over 110°–130°E in years with (a) positive and (b) negative anomalies of the second EOF mode of the precipitation in eastern China during the northern China rainy season (cold- and warm-color shaded areas indicate confident negative and positive zonal wind anomalies; light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively)

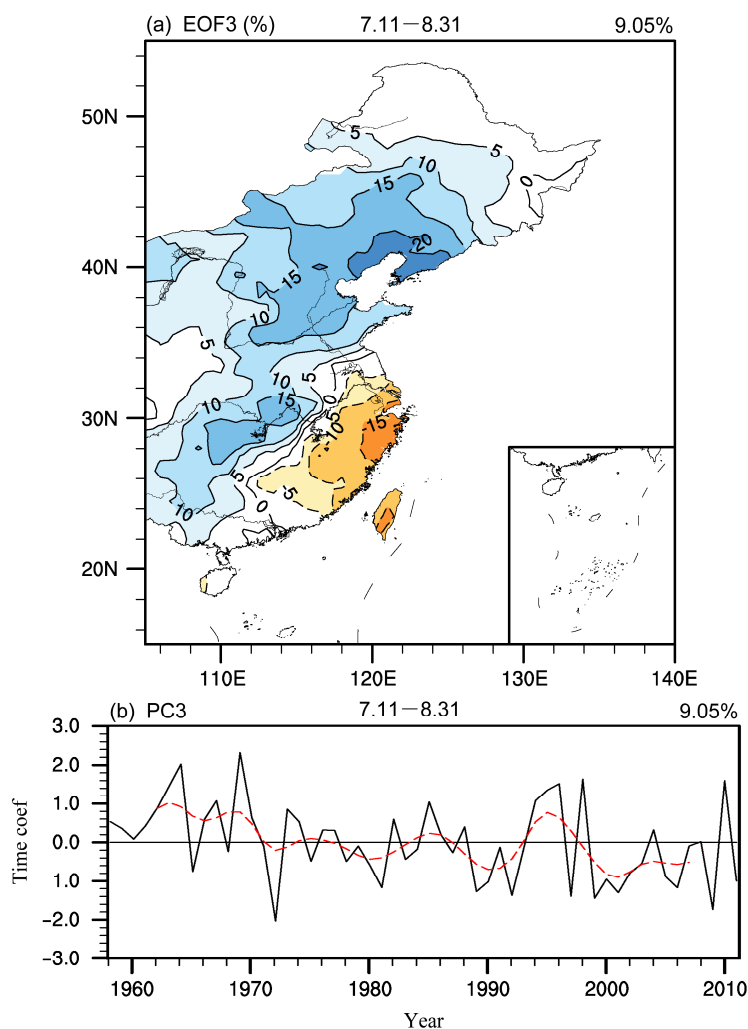


图 8 1958~2011 年我国东部北方雨季降水异常第三模态 (偏东型) 的 (a) 空间分布及 (b) 标准化时间系数序列 (虚线为 9 年滑动平均)

Fig. 8 As in Fig. 1 but for the third EOF mode.

实线), 据此定义 $PC3 > 1.0$ 及 $PC3 < -1.1$ 分别模态为正、负异常代表年, 正异常年有 7 年 (1963、1964、1967、1969、1985、1996、2010), 负异常有 7 年 (1972、1981、1989、1997、2001、2006、2009)。

对北方雨季偏东型降水的各层环流异常合成 (图 9) 发现, 东亚上空 200 hPa 环流对比并不明显 (图 9a、b), 而 500 hPa (图 9c、d) 及 850 hPa 环流 (图 9e、f) 在模态正、负异常年强度均呈相反变化, 说明偏东型降水更多受中、低层环流异常的共同影响。进一步对比环流异常的置信水平发现, 低层 850 hPa 环流异常显著区不论范围还是置信水平都明显优于 500 hPa 高度场 (图 9c-f), 因此低层环流对 EOF3 起更重要的作用。从 EOF3 正异常年 850 hPa 环流异常来看 (图 9e), 蒙古上空存在明显的气旋性风异常, 而在日本及西太平洋上存在明显

的反气旋性风异常, 造成我国东部上空显著的西南风异常, 使得水汽通量达到 $5 \times 10^{-3} \text{ kg hPa}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 以上, 说明水汽来源充足 (图 10a), 使得从东北南部至长江中游大范围降水偏多; 在 EOF3 负异常年, 850 hPa 环流 (图 9f) 表现为蒙古上空有显著的反气旋性风异常, 而在西太平洋上空是显著的气旋式风异常, 造成我国东部上空显著的东北风异常, 使得水汽通量值均小于 $3 \times 10^{-3} \text{ kg hPa}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 说明水汽输送偏弱 (图 10b), 难以到达中纬度的华北东北地区, 导致我国大范围地区降水偏少。

大范围的低层风场异常必然和东亚夏季风环流有关, 考虑到季风的形成与海陆气压分布有关, 为此这里分析 EOF3 正、负异常年合成的海平面气压异常。显然, 在 EOF3 正异常年, 亚洲大陆上是以蒙古为中心的气压负距平, 而西太平洋上则是气

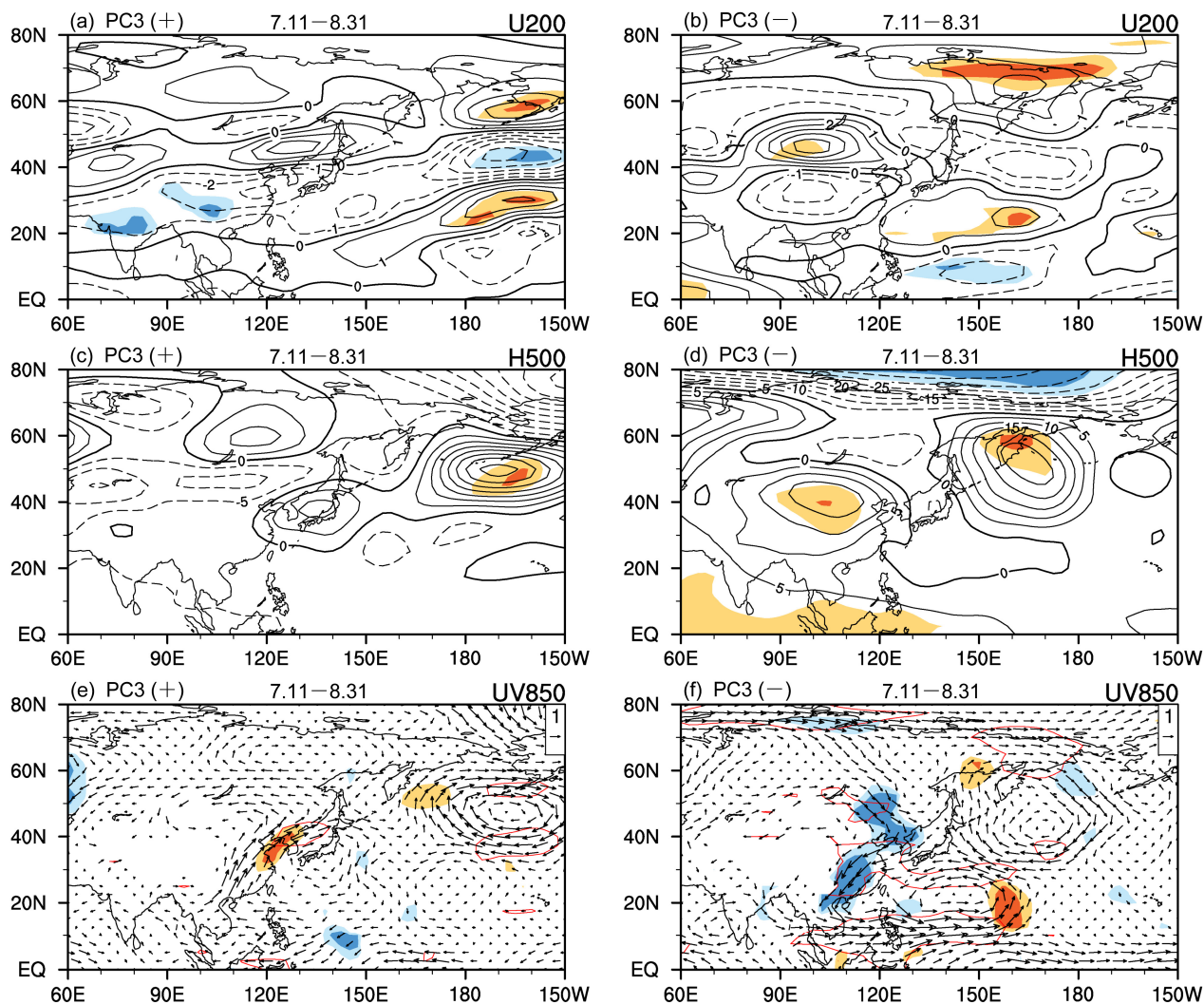


图9 同图2, 但为第三模态, 且 850 hPa 矢量风场合成图上阴影表示经向风场显著的区域, 红线包围的区域表示纬向风场显著的区域

Fig. 9 As in Fig. 2 but for the third EOF mode (shaded areas and areas encircled by red lines in the 850 hPa wind field indicate confident meridional and zonal wind anomalies, respectively)

压正距平 (图 10c), 说明亚洲大陆热低压偏强, 同时西太平洋副热带高压脊偏西 (图 10a), 造成东亚夏季风偏强, 向北的水汽输送增强; 而 EOF3 负异常年气压异常与此相反且更加显著 (图 10d), 说明亚洲大陆低压偏弱, 同时西太平洋副热带高压脊偏东 (图 10b), 造成东亚夏季风偏弱, 向北的水汽输送减弱。上述结论与先前在季节尺度上关于东亚夏季风强度的部分研究 (郭其蕴, 1983; 施能等, 1996; 赵平和周自江, 2005) 是一致的, 说明北方雨季偏东型降水与由于海陆气压的异常对比造成的东亚夏季风异常紧密相关。

综合上述分析, 北方雨季时段东北南部至长江中游降水偏多 (少)、华东沿海降水偏少 (多) 的

偏东型降水分布对应环流特征是亚洲大陆热低压偏强 (偏弱)、低层副热带高压脊偏西 (东) 造成的东亚夏季风偏强 (偏弱), 表现为我国东部大范围的低层西南 (东北) 风异常。

4 北方雨季不同降水异常模态的前期信号

4.1 第一模态 (偏西型降水) 的前期信号

根据前面的分析, 北方雨季降水异常第一模态 (EOF1) 表现为河套地区及南方大部与江淮流域上游降水异常反向变化的偏西型降水分布, 主要受西亚急流和南亚高压东脊点位置的影响, 在 EOF1 正 (负) 异常年西亚急流轴偏北 (南)、南亚高压东

脊点偏西(东)。这两个环流系统均位于我国东部降水区的上游,因此我们探讨上游环流物理过程与之的联系。图 11a、b 给出 EOF1 降水正、负异常年合成的前期 7 月上旬 200 hPa 位势高度距平场及相应的波活动通量。在 EOF1 正异常年,从冰岛经欧洲中部、乌拉尔山至巴尔喀什湖以南存在位势高度场“一、+、一、+”的波列(图 11a);其中,乌拉尔山、巴尔喀什湖以南分别为显著的负、正位势高度异常,这种异常形势可以持续至华北雨季时段(图略),有利于西亚急流位置偏北、南亚高压东脊点偏西。在 EOF1 负异常年,从冰岛经欧洲中部、乌拉尔山至巴尔喀什湖以南存在位势高度场“+、一、+、一”的波列(图 11b);其中乌拉尔山及巴尔喀什湖以南分别为显著的正、负位势高度异常,这种异常形势可以持续至北方雨季时段(图略),导致北方雨季西亚急流偏南、南亚高压东脊点偏东。

上述分析表明,北方雨季偏西型降水的前期信

号与来自北大西洋的波列有关,该波列的位相变化造成乌拉尔山和巴尔喀什湖以南的位势高度异常反向变化,导致西亚急流和南亚高压位置异常,而造成北方雨季我国东部降水异常。值得注意的是,EOF1 正、负异常年西亚急流轴位置在 6 月下旬就有明显差异(图 3),更确切的说,是西亚急流在 EOF1 正异常年北跳偏早、在 EOF1 负异常年北跳偏晚。如图 3 所示,在 EOF1 正异常年,西亚急流在 6 月第 4 候就迅速北跳,第 6 候就到达 42.5°N,比气候态平均到达同纬度要早约两候(红虚线);而在 EOF1 负异常年,西亚急流在 7 月第 1 候才开始北跳,明显比气候态晚(蓝虚线),这其中的机制还有待进一步研究。

4.2 第二模态(北方一致型降水)的前期信号

根据前面的分析,北方雨季降水异常第二模态(EOF2)表现为北方大部与长江流域降水异常反向变化的北方一致型分布,主要受东亚沿岸至东北亚地区 EAP 遥相关型的影响,在 EOF2 正(负)异常

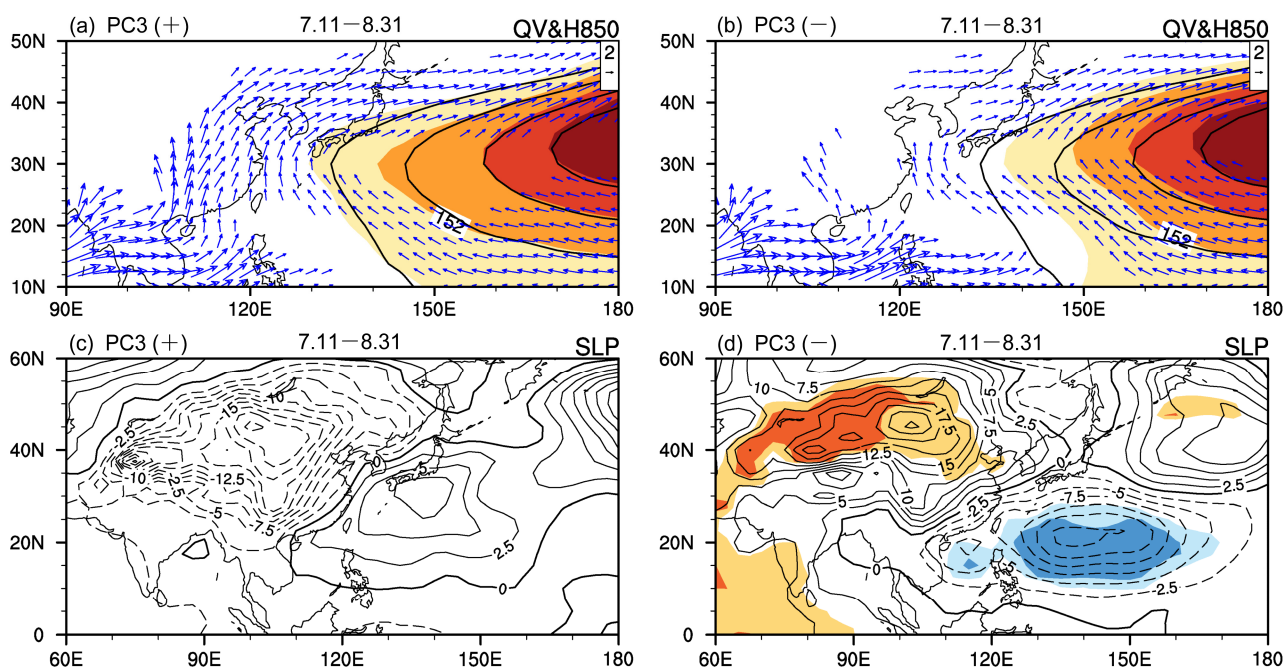


图 10 我国东部北方雨季降水异常第三模态(偏东型)(a、c)正、(b、d)负异常年合成的(a、b)850 hPa 位势高度(填色及等值线,单位: dagpm)、水汽通量(蓝色矢量,单位: $10^{-3} \text{ kg hPa}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)实况及(c、d)海平面气压距平(等值线,单位: hPa)。图中略去了小于 3 个单位的水汽通量矢量。图 a、b 中等值线表示气候态的位势高度场,填色表示异常年合成的位势高度场,均从 150 dagpm 起画,间隔 2 dagpm。图 c、d 中浅、深阴影区分别表示置信水平为 95%、99% 的区域,冷、暖色分别表示负、正异常区

Fig. 10 Composites of the (a, b) actual 850 hPa geopotential height (shading; units: dagpm), (a, b) water vapor fluxes (vectors, units: $10^{-3} \text{ kg hPa}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), and (c, d) sea level pressure anomalies (units: hPa) in years with (a, c) positive and (b, d) negative anomalies of the third EOF mode of the precipitation in eastern China during the northern China rainy season [black isolines in (a, b) indicate the climatically mean 850 hPa geopotential height; vectors less than 3 units are omitted; light and dark shaded areas in (c, d) indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively; cold- and warm-color shaded areas indicate confident negative and positive anomalies]

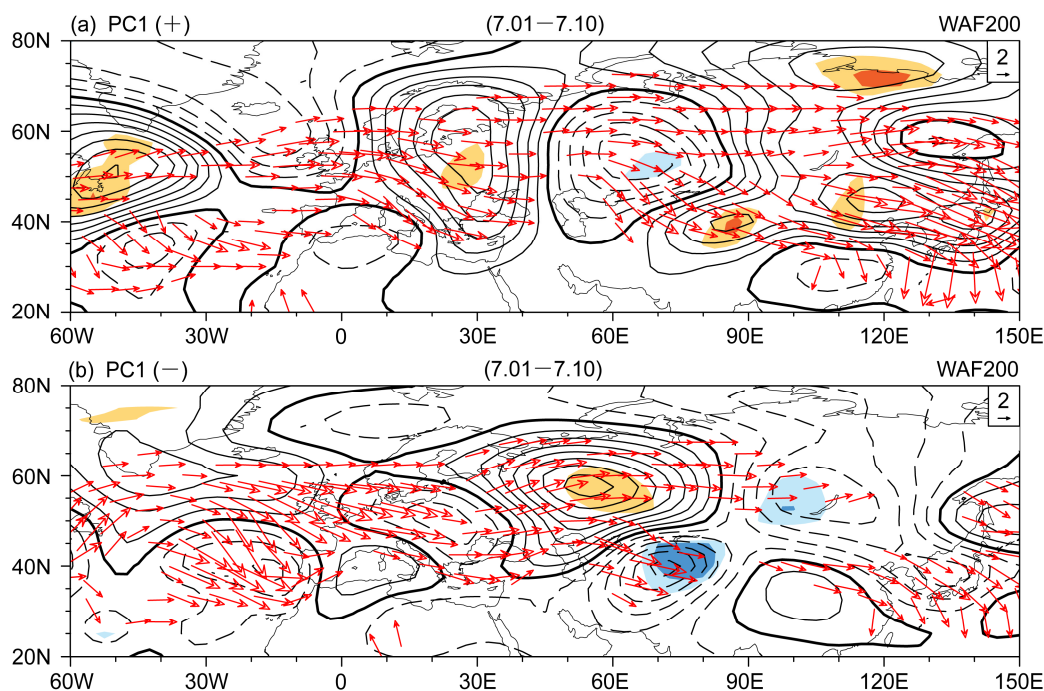


图 11 我国东部北方雨季降水异常第一模态(偏西型)(a)正、(b)负异常年合成的前期 7 月上旬 200 hPa 位势高度场距平(单位: dagpm, 零线加粗, 间隔 1 dagpm)和波活动通量(单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)。图上浅、深阴影区分别表示位势高度异常置信水平为 95%、99% 的区域, 冷、暖色分别表示负、正异常区; 已略去值小于 4 个单位的矢量

Fig. 11 Composites of the anomalous geopotential height (lines; units: dagpm) and wave activity fluxes (vectors; units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) at 200 hPa during early July in years with (a) positive and (b) negative anomalies of the first EOF mode of the precipitation in eastern China during the northern China rainy season (light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively; cold- and warm-color shaded areas indicate confident negative and positive anomalies; vectors less than 4 units are omitted)

年东亚沿岸热带至中高纬度出现“一、+、-”(“+、-、+”)的距平波列。先前研究指出, EAP 波列在低纬度西太平洋上的异常中心主要由西太平洋暖池区的对流活动造成(Nitta, 1987; 黄荣辉和李维京, 1988), 并且在盛夏时段(7 月 15 日至 8 月 31 日)最大振幅中心主要位于对流层中低层(施宁等, 2009)。但对于 EOF2 而言, 其正、负异常的显著环流差异主要表现在中高纬度(图 6)和 600 hPa 以上的对流层中高层(图 7), 也即影响该降水模态的主要是 EAP 波列的中高纬两个异常中心, 因此造成 EOF2 降水分布的 EAP 波列不大可能由西太平洋对流活动直接导致。施宁等(2009)研究认为, 在中期时间尺度上, 盛夏 EAP 波列的中高纬异常中心最大振幅位于对流层中高层, 并且形成初期主要由上游对流层上层 Rossby 波能量频散造成。那么对于次季节时间尺度的 EOF2, 其对应的 EAP 波列是否由同样的机制造成呢? 下面对此进行分析。

考虑到波列的传播过程, 先给出 EOF2 正、负

异常年前期 7 月上旬 200 hPa 位势高度距平场及对应的波活动通量合成(图 12a、b)。从图 12a 可见, EOF2 正异常年北大西洋上位势高度出现明显的负异常, 负异常中心的波活动通量向下游传播, 并在西欧折向地中海传播; 在 EOF2 负异常年, 北大西洋上位势高度则是显著的正异常, 正异常中心的波活动通量明显向下游传播(图 12b), 但此时东亚大陆上空还没有出现显著的位势高度异常(图略)。到了北方雨季期间, EOF2 正异常年, 先前北大西洋上的负异常中心已东移, 向下游传播的波活动通量经欧洲大陆、里海黑海、巴尔喀什湖并在蒙古高原附近折向东南传播, 导致东亚中纬度地区出现显著的位势高度正异常(图 12c), 形成 EAP 波列的中纬度异常中心, 使得东亚急流偏北, 有利于我国北方降水偏多、长江流域降水偏少。在 EOF2 负异常年(图 12d), 前期的正异常中心向东北扩展至斯堪的纳维亚半岛, 由此向下游传播的波活动通量由斯堪的纳维亚半岛出发经乌拉尔山、叶尼塞河; 一支波通量准纬向传播至东北亚, 导致显著的位势高

度正异常, 形成 EAP 波列的高纬度中心, 另一支波通量在贝加尔湖附近折向东南传播, 导致东亚中纬度地区位势高度呈现显著的负异常 (图 12d), 形成 EAP 波列的中纬度中心, 使得东亚急流偏南, 有利于我国北方降水偏少、长江流域降水偏多。对比发现, 造成 EOF2 正异常的上游波列大致是沿着 45°N

附近的中纬度路径传播 (图 12c), 而造成 EOF2 负异常的上游波列大致是沿着 65°N 附近的高纬度路径传播 (图 12d)。

上述分析说明, 北方雨季北方一致型降水的前期信号表现为自 7 月上旬开始的 200 hPa 北大西洋上的位势高度异常, 位势高度负 (正) 异常中心向

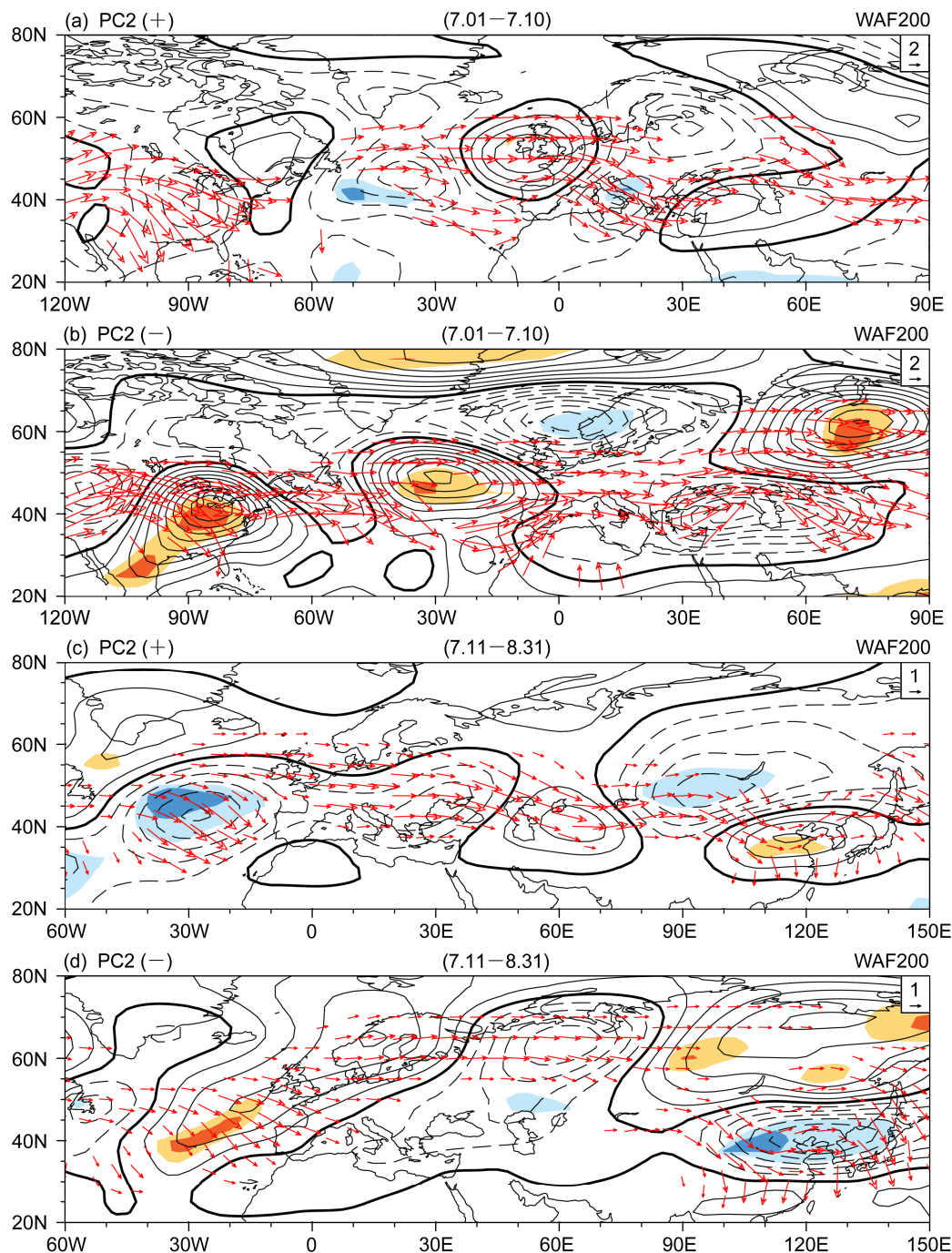


图 12 同图 11, 第二模态 (北方一致型) (a、c) 正、(b、d) 负异常年合成的前期 7 月 (a、b) 上旬与 (c、d) 同期 200 hPa 位势高度场距平 (单位: dagpm, 零线加粗, 间隔 1 dagpm) 和波活动通量 (单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)。图上浅、深阴影区分别表示位势高度异常置信水平为 95%、99% 的区域, 冷、暖色分别表示负、正异常区; 图 a、b 已略去值小于 4 个单位的矢量, 图 c、d 已略去值小于 1 个单位的矢量

Fig. 12 As in Fig. 11 but for the second EOF mode: (a, c) and (b, d) are for years with positive and negative anomalies of the second EOF mode, respectively; (a, b) are for early July, with vectors less than 4 units omitted; (c, d) are for the northern China rainy season, with vectors less than 1 unit omitted

下游传播的波列经中（高）纬度路径传播至东亚，造成 EAP 波列的中高纬异常中心。值得注意的是，7 月上旬北大西洋上空高层位势高度异常在 EOF2 负异常年与上游北美的位势高度异常之间有波活动通量传播的关系（图 12b），而 EOF2 正异常年似乎与北美的位势高度异常关系不大（图 12a），这两种情况下北大西洋上位势高度异常的产生机制是

否相同还有待进一步研究。

4.3 第三模态（偏东型降水）的前期信号

前面分析已经指出，北方雨季降水异常第三模态（EOF3）所代表的偏东型降水分布与亚洲大陆热低压强弱以及低层西太平洋副热带高压脊的东西偏移导致的东亚夏季风异常密切相关。考虑到东亚夏季风异常是大尺度环流相对稳定的特征，其发生

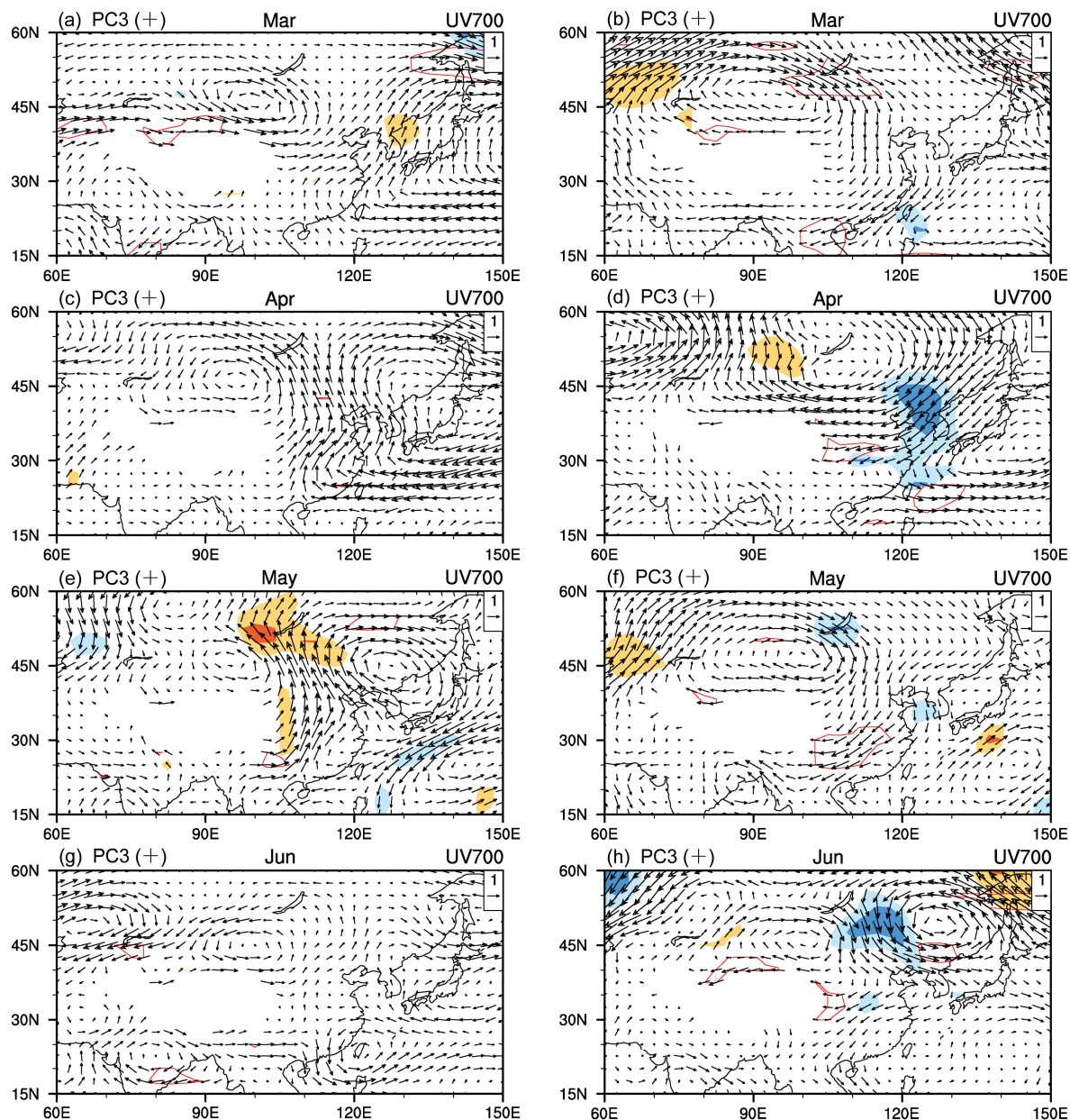


图 13 我国东部北方雨季降水异常第三模态（偏东型）(a、c、e、g) 正、(b、d、f、h) 负异常年合成的前期 3 月至 6 月 700 hPa 风场距平（单位： m s^{-1} ）。合成图上浅、深阴影区分别表示置信水平为 95%、99% 的区域，冷、暖色分别表示负、正异常区；图上阴影表示经向风场显著的区域，红线包围的区域表示纬向风场显著的区域

Fig. 13 Composites of the wind anomalies (vectors; units: m s^{-1}) at 700 hPa in (a, b) March, (c, d) April, (e, f) May, and (g, h) June for years with (a, c, e, g) positive and (b, d, f, h) negative anomalies of the third EOF mode of the precipitation in eastern China during the northern China rainy season (light and dark shaded areas indicate the meridional wind anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively; cold- and warm-color shaded areas indicate confident negative and positive anomalies; areas encircled by red lines indicate confident zonal wind anomalies)

发展应该具有持续性, 因此我们对前期逐月的对流层高、中、低层环流场进行了分析。结果发现, 最早在 3 月份, 东亚大陆低层环流就存在显著差别(图 13)。EOF3 正异常年, 3 月份 700 hPa 蒙古上空存在明显的气旋性环流异常(图 13a), 蒙古上空的异常气旋一直持续至 6 月(图 13a、c、e、g), 并伴随有我国东部大范围的偏南风异常, 其特征与同期低层环流异常十分相似, 说明东亚大陆环流形势在 3 月份就已经出现征兆。EOF3 负异常年, 环流形势与上述相反, 低层 700 hPa 蒙古上空从 3 月至 6 月一直维持显著的反气旋式异常(图 13b、d、f、h), 我国东部大范围出现偏北风异常, 其特征与同期低层环流异常也十分相似。前期 3 月至 6 月 850 hPa 风场的异常与 700 hPa 类似(图略)。以上分析表明, 由海陆气压的异常对比导致的东亚夏季风环流异常形势相对稳定且具有持续性, 春季相似的环流异常可持续至夏季并逐渐加强, 从而有利于北方雨季降水出现偏东型的分布特征。

5 结论与讨论

本文重点探讨了北方雨季时段(7 月 11 日至 8 月 31 日)我国东部降水异常模态的环流特征及前期信号, 得出如下主要结论:

(1) 北方雨季我国东部降水异常第一模态为偏西型降水, 当该模态时间系数为正(负)异常时, 河套地区降水偏多(少)、江淮流域上游降水偏少(多)、南方大部降水偏多(少); 第二模态为北方一致型降水, 当该模态时间系数为正(负)异常时, 北方全区降水一致偏多(少), 长江流域降水偏少(多); 第三模态为偏东型降水, 当该模态时间系数为正(负)异常时, 华北南部至长江中游降水偏多(少), 华东沿海降水偏少(多)。

(2) 北方雨季我国东部降水异常第一模态主要受西亚高空副热带西风急流位置偏北(南)以及南亚高压东部脊点位置偏西(东)影响。7 月上旬 200 hPa 来自北大西洋的波列引起乌拉尔山位势高度负(正)异常和巴尔喀什湖以南位势高度正(负)异常, 是该模态的前期信号。

(3) 北方雨季我国东部降水异常第二模态主要受东亚沿岸从低纬至高纬的“一、+、-”(“+、-、+”)的东亚—太平洋型遥相关波列影响。7 月上旬 200 hPa 北大西洋上空的位势高度负(正)异常, 使得上游波列沿中纬度(高纬度)路径向下游

传播至东亚, 是该模态的前期信号。

(4) 北方雨季我国东部降水异常第三模态主要受亚洲大陆热低压偏强(弱)、西太平洋副热带高压脊偏西(东)导致的东亚夏季风增强(减弱)的影响。春季 3 月低层蒙古上空异常的气旋(反气旋)性环流持续至夏季, 是该模态的前期信号。

我们还注意到, 这三个模态的降水异常大值区与 200 hPa 亚洲—太平洋上纬向风最大异常中心的位置配合较好。对于偏西型降水, 200 hPa 纬向风最显著的异常中心位于 $50^{\circ}\text{E}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 的西亚地区(图 2a、b), 而我国东部北方的异常降水中心位于偏西的河套地区, 江淮流域异常降水中心以及南方的异常降水中心都位于 115°E 以西(图 1a); 对于北方一致型降水, 200 hPa 纬向风最显著的异常中心位于 $100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 的东亚地区(图 6a、b), 而北方的降水异常中心东扩到山西地区, 长江流域的降水异常中心位于 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 之间(图 5a); 对于偏东型降水, 200 hPa 纬向风最显著的异常中心位于更东面的北太平洋日界线附近(图 9a、b), 而我国东部的异常降水中心位于华北东部的环渤海以及华东沿海(图 8a)。可见, 北方雨季我国东部降水异常中心的经度位置与高空 200 hPa 纬向风异常中心的经度位置有一定的对应关系, 但这种关系还需要在业务中进一步检验。

此外, 北方雨季降水异常第三模态同期环流(图 9e、f)和前期环流的异常信号(图 15)都主要出现在低层阿尔泰山、萨彦岭及蒙古高原上空, 该区域是蒙古气旋生成次数最多、蒙古反气旋东移经过次数最多的地方(朱乾根等, 2007)。实际上该模态的降水特征是我国北方夏季常见的雨型, 因此前期和同期蒙古气旋和反气旋与第三模态的关系值得进一步研究。本文有关环流场以及物理过程的诊断结果, 还有待利用数值模式进行验证, 并在新的观测事实和预测实践中加以检验。

参考文献 (References)

- 陈际龙, 黄荣辉. 2008. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 51 (2): 352–359. Chen Jilong, Huang Ronghui. 2008. Interannual and interdecadal variations of moisture transport by Asian summer monsoon and their association with droughts or floods in China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 51 (2): 352–359, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2008.02.007.
- 陈烈庭, 宗海锋, 张庆云. 2007. 中国东部夏季风雨带季节内变异模态的研究 [J]. 大气科学, 31 (6): 1212–1222. Chen Lieting, Zong

- Haifeng, Zhang Qingyun. 2007. The dominant modes of intraseasonal variability of summer monsoon rain belt over eastern China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 31 (6): 1212–1222, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.16.
- 邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系 [J]. *大气科学*, 33 (4): 835–846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 33 (4): 835–846, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.16.
- 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 [J]. *Int. J. Climatol.*, 28 (9): 1139–1161, doi:10.1002/joc.1615.
- 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 [J]. *Int. J. Climatol.*, 29 (13): 1926–1944, doi:10.1002/joc.1759.
- 丁婷, 陈丽娟, 崔大海. 2015. 东北夏季降水的年代际特征及环流变化 [J]. *高原气象*, 34 (1): 220–229. Ding Ting, Chen Lijuan, Cui Dahai. 2015. Decadal variations of summer precipitation in Northeast China and the associated circulation [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 34 (1): 220–229, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00155.
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测 [J]. *大气科学*, 37 (2): 253–280. Ding Yihui, Sun Ying, Liu Yunyun, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 37(2): 253–280, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12302.
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2008. 高空西风急流东西向形态变化对梅雨期降水空间分布的影响 [J]. *气象学报*, 2008, 66 (4): 566–576. Du Yin, Zhang Yaocun, Xie Zhiqing. 2009. Impacts of the zonal position of the East Asian westerly jet core on precipitation distribution during Meiyu of China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 23 (4): 506–516, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.04.010.
- 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 33 (3): 581–592, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.15.
- 郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析 [J]. *地理学报*, 38 (3): 207–217. Guo Qiyun. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 38 (3): 207–217, doi:10.11821/xb198303001.
- 何金海, 罗京佳. 1999. 南海季风爆发和亚洲夏季风推进特征及其形成机制的探讨 [M]// 何金海. 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 81–86. He Jinhai, Luo Jingjia. 1999. Features of South China Sea monsoon onset and Asian summer monsoon establishment sequence along with its individual mechanism [M]. // He Jinhai. *New Advances in Research on Asian Monsoon Research*. Beijing: China Meteorological Press, 81–86.
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. *大气科学*, 12 (s1): 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 Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 12 (s1): 107–116, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.08.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 18 (4): 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 18 (4): 465–476, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001.
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因 [J]. *科学通报*, 58 (8): 617–628.
- Huang Ronghui, Liu Yong, Feng Tao. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over eastern China around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58 (12): 1339–1349, doi:10.1007/s11434-012-5545-9.
- 贾燕, 管兆勇. 2010. 江淮流域夏季降水异常与西北太平洋副热带 30~60 天振荡强度年际变化的联系 [J]. *大气科学*, 34 (4): 691–702. Jia Yan, Guan Zhaoyong. 2010. Associations of summertime rainfall anomalies over the Changjiang–Huaihe River valley with the interannual variability of 30–60-day oscillation intensity in the northwestern Pacific [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 34 (4): 691–702, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.03.
- 江志红, 何金海, 李建平, 等. 2006. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化 [J]. *地理学报*, 61 (7): 675–686. Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. Northerly advancement characteristics of the East Asian summer monsoon with its interdecadal variations [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 61 (7): 675–686, doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2006.07.001.
- 据建华, 钱诚, 曹杰. 2005. 东亚夏季风的季节内振荡研究 [J]. *大气科学*, 29 (2): 187–194. Ju Jianhua, Qian Cheng, Cao Jie. 2005. The intraseasonal oscillation of East Asian summer monsoon [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 29 (2): 187–194, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.02.03.
- 据建华, 吕俊梅, 任菊章. 2006. 北极涛动年代际变化对华北地区干旱化的影响 [J]. *高原气象*, 25 (1): 74–81. Ju Jianhua, Lü Junmei, Ren Juzhang. 2006. The effect of interdecadal variations of Arctic oscillation on aridization in North China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 25 (1): 74–81, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.01.010.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kosaka, Nakamura. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific–Japan teleconnection pattern [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 132: 2009–2030, doi: 10.1256/qj.05.204.
- 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, doi:10.1029/2007GL031977.
- 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 Shizhe, et al. 2004. The relationship between East

- Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 28 (5): 641–658, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.05.01.
- 梁建茵, 吴尚森. 2002. 南海西南季风爆发日期及其影响因子 [J]. 大气科学, 26(6): 829–844. Liang Jianyin, Wu Shangsen. 2002. A study of southwest monsoon onset date over the South China Sea and its impact factors [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 26 (6): 829–844, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.06.11.
- 刘海文, 丁一汇. 2010. 华北汛期日降水特性的变化分析 [J]. 大气科学, 34 (1): 12–22. Liu Haiwen, Ding Yihui. 2010. Analysis of daily precipitation characteristics over North China during rainy seasons [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 34 (1): 12–22, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.02.
- 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (2): 439–450, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12313.
- 陆日宇. 2002. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离 [J]. 大气科学, 26 (5): 611–624. Lu Riyu. 2002. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 26 (5): 611–624, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.03.
- 陆日宇, 林中达, 张耀存. 2013. 夏季东亚高空急流的变化及其对东亚季风的影响 [J]. 大气科学, 37 (2): 331–340. Lu Riyu, Lin Zhongda, Zhang Yaocun. 2013. Variability of the East Asian upper-tropospheric jet in summer and its impacts on the East Asian monsoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (2): 331–340, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12310.
- 马音, 陈文, 王林. 2011. 中国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景及其比较 [J]. 气象学报, 69 (2): 334–343. Ma Yin, Chen Wen, Wang Lin. 2011. A comparative study of the interannual variation of summer rainfall anomalies between the Huaihe Meiyu season and the Jiangnan Meiyu season and their climate background [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (2): 334–343, doi:10.11676/qxb2011.028.
- 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 (3): 373–390.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (7): 699–706, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.
- 沈柏竹, 林中达, 陆日宇, 等. 2011. 影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流特征分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 41 (3): 402–412. Shen Baizhu, Lin Zhongda, Lu Riyu, et al. 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early- and late-summer precipitation in Northeast China [J]. Sci. China Earth Sci., 54 (7): 1095–1104, doi:10.1007/s11430-011-4173-6.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. 大气科学, 20 (5): 573–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 20 (5): 575–583, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08.
- 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2009. 中高纬 Rossby 波活动对盛夏东亚/太平洋事件中期演变过程的影响 [J]. 大气科学, 33 (5): 1087–1100. Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2009. Impacts of mid- and high-latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of East Asia/Pacific events during the mid- and late summer [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 33(5): 1087–1100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.18.
- 孙淑清, 应明, 马淑杰. 2002. 华北夏季降水地域特征的旋转主分量研究及其相关分析 [J]. 气候与环境研究, 7 (1): 74–86. Sun Shuqing, Ying Ming, Ma Shujie. 2002. The rotated principal component analysis on the regional features of summer precipitation in North China and their correlation analysis [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 7 (1): 74–86, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.01.008.
- Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 24 (23): 2985–2988, doi:10.1029/97GL03094.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. J. Atmos. Sci., 58 (6): 608–627, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian monsoon in China [M]// Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- 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]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 17 (5): 513–525, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (3): 376–386, doi:10.1007/BF02919316.
- 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (2): 313–318, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12301.
- 王晓芳, 何金海, 廉毅. 2013. 前期西太平洋暖池热含量异常对中国东北地区夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 71 (2): 305–317. Wang Xiaofang, He Jinhai, Lian Yi. 2013. Effect of the previous anomalous heat content in the western Pacific warm pool on the summer rainfall over northeast China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 71 (2): 305–317, doi:10.11676/qxb2013.024.
- 王遵亲, 丁一汇. 2008. 中国雨季的气候学特征 [J]. 大气科学, 32 (1): 1–13. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 32 (1): 1–13, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.01.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 2007. Climate Statistical Diagnosing and Prediction (2nd edition) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- 武炳义, 张人禾, D'Arrigo Rosanne. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水 [J]. 科学通报, 53 (12): 1422–1428. Wu Bingyi, Zhang

- Renhe, D'Arrigo Rosanne. 2008. Arctic dipole anomaly and summer rainfall in Northeast China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 53 (14): 2222–2229, doi:10.1007/s11434-008-0229-1.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2010. 气候变率诊断和预测方法 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 400pp. Wu Hongbao, Wu Lei. 2010. *Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability* (2nd edition) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 400pp.
- 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, doi:10.1175/2009JCLI3336.1.
- 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]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 12 (2): 150–158, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.02.003.
- 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 Environ. Res.* (in Chinese), 16 (2): 231–242, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.02.12.
- 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 31 (4): 586–595, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.04.04.
- 葉篤正, 陶诗言, 李麥村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象 [J]. *气象学报*, 29 (4): 249–263. Ye Duzheng, Tao Shiyan, Li Maicun. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 29 (4): 249–263.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 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. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 56 (2): 199–211.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 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. 2003. 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, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.05.005.
- 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. Zhang Qingyun, Guo Heng. 2014. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in summer [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 38 (4): 656–669, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13240.
- 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 Meteor. Sinica* (in Chinese), 59 (5): 569–577, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2001.05.007.
- 张人禾. 1999. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用 [J]. *高原气象*, 18 (4): 567–574. Zhang Renhe. 1999. The role of Indian summer monsoon water vapor transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 18 (4): 567–574, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.011.
- Zhang Y C, Kuang X Y, Guo W D, et al. 2006. Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (11): L11708, doi:10.1029/2006GL026377.
- 赵平, 周自江. 2005. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系 [J]. *气象学报*, 63 (6): 933–941. Zhao Ping, Zhou Zijiang. 2005. East Asian subtropical summer monsoon index and its relationships to rainfall [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63 (6): 933–941, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.06.010.
- 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, 135–140. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. *Synoptic Meteorology: Principles and Methods* (4th edition) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 135–140.
- 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 [J]. *Climate Dyn.*, 36 (7–8): 1463–1473, doi:10.1007/s00382-010-0852-9.