郭恒,张庆云. 2016. 华南前汛期盛期中国东部降水异常模态的环流特征及成因分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 633-652. Guo Heng, Zhang Qingyun. 2016. The dominant modes of precipitation anomalies in eastern China during the peak of pre-rainy season in South China and possible causes [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (6): 633-652, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16032.

华南前汛期盛期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 站逐日降水观测资料及环流逐日再分析资料,利用统计 分析、物理量诊断等方法,探讨华南前汛期盛期(5月21日至6月10日)中国东部降水异常模态及对应大气环 流特征和可能成因。分析发现,华南前汛期盛期中国东部降水异常表现为两个相互独立的降水模态:第一模态为 华南全区一致型,当其时间系数为正(负)时,整个华南降水偏多(少),黄河中游降水偏少(多);第二模态为 华南沿海东部型,当其时间系数为正(负)时,华南沿海东部降水偏多(少),而长江中下游降水偏少(多)。研 究发现,造成华南前汛期盛期两个降水型的环流特征有明显差异:全区一致型降水主要受东亚高空西风急流南北 偏移、副热带高压脊东西偏移及低层南海北部异常风场影响,沿海东部型降水主要由东亚高空西风急流强弱及位 置异常、副热带高压强弱变化、低层日本以南西太平洋异常风场导致。此外,两个降水型对应环流异常的成因也 各不相同。第一模态中高层环流异常由丝绸之路遥相关型导致,低层风场异常在5月下旬由阿拉伯海向下游传播 的风场异常波列引起,在6月上旬则由西太平洋西移的异常反气旋(气旋)造成。第二模态的中高层环流异常先后 由极地--欧亚遥相关型、环球遥相关型引起,低层风场异常由高层环流异常的动力作用造成。两降水型均存在整层 深厚的垂直运动,但第一模态的垂直运动在高层闭合且对应显著的辐合辐散异常,第二模态则不具有上述特征。 关键词 华南前汛期盛期 次季节降水 西风急流 丝绸之路遥相关 环球遥相关 文章编号 1006-9585 (2016) 06-0633-20 中图分类号 P466 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16032

The Dominant Modes of Precipitation Anomalies in Eastern China during the Peak of Pre-rainy Season in South China and Possible Causes

GUO Heng^{1, 2} and ZHANG Qingyun¹

International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on daily observed rainfall data at 316 stations in China and the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis dataset for 1958–2011, dominant modes of precipitation anomalies over eastern China (to the east of 105°E) during the peak of pre-rainy season in South China (21 May to 10 June) and accompanying circulation as well as possible causes are investigated using statistical and

收稿日期 2016-01-29; 网络预出版日期 2016-05-26

作者简介 郭恒, 男, 1989年出生, 博士, 主要从事次季节天气气候研究。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项目 2014CB954301

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

diagnostic methods. Two dominant modes are revealed by empirical orthogonal function (EOF) analysis. The first EOF mode (EOF1) depicts a seesaw in precipitation anomalies between South China and the middle reaches of the Yellow River basin, while the second EOF mode (EOF2) shows a seesaw in precipitation anomalies between the eastern coastal region of South China and the mid-lower reaches of the Yangtze River valley. The major circulation characteristics corresponding to the two modes are different. EOF1 is attributed to the meridional displacement of the East Asian subtropical westerly jet stream (EAJS) and the zonal displacement of the western North Pacific subtropical high (WNPSH), while EOF2 is attributed to the intensity anomalies of the EAJS and the WNPSH. For EOF1, the 200-hPa Silk Road pattern wave train and the low-level wind anomalies jointly contribute to the corresponding circulation anomalies. For EOF2, the circulation anomalies are first induced by Polar Eurasia pattern and the circumglobal teleconnection. Anomalies in the lower levels are attributed to the dynamic effects of high level anomalies. Differences between the vertical structures of the two modes are also discussed.

Keywords Peak of pre-rainy season in South China, Subseasonal precipitation, Westerly jet-stream, Silk Road pattern, Circumglobal teleconnection

1 引言

夏季我国东部降水受到东亚热带、副热带季风 环流异常及其相互作用的影响,在近几十年中其空 间分布发生了显著的年代际变化,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., 2009),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; Hong and Liu, 2012; 张庆云和郭恒, 2014)。降水的异常变化常 常导致旱涝灾害,对当地工农业生产及人民生活造 成严重影响。

夏季我国东部降水的年代际变化主要受东亚 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,偏多的青藏 高原前冬和春季积雪及增暖的热带中东太平洋海 表温度减小了夏季亚洲地区的海陆热力对比,使东 亚夏季风发生年代际减弱(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状态,日本以南西太平 洋海温异常偏暖,进一步减小了夏季亚洲地区海陆 热力对比,使东亚夏季风继续维持年代际偏弱状 态。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同时发生了年代 际减弱(陈际龙和黄荣辉,2008),使我国东部夏 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 亚夏季风关系的研究也取得了显著进展,相关研究

主要集中在东亚夏季风环流系统如西太平洋副热 带高压(副高)、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; 琚建华等, 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、副高、南亚高 压在很大程度上受亚洲副热带高空西风急流区 Rossby 波的影响,其应作为东亚夏季风系统的一个 重要成员。亚洲副热带西风急流区准静止波列的活 动对东亚天气气候的影响受到高度关注并取得一 系列有意义的成果。杨莲梅和张庆云(2007)研究 发现,夏季东亚副热带西风急流区 Rossby 波扰动 强弱伴随的急流位置南北偏移会造成中国东部降 水呈现三极型异常分布; 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 东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。

上述有关中国东部降水年代际、年际、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。但东亚夏季风环流系统的演变及我国东部夏季 雨带向北推进过程的阶段性特征并非以月为单位 完成(Tao and Chen, 1987),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(叶笃正等,1958;李崇银等,2004), 华北雨季开始于7月中旬东亚高空急流中心迅速西 移之后(Zhang et al., 2006;杜银等,2008)。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,以月份进行研 究不能客观反映我国东部夏季降水随东亚夏季风 阶段性向北推进的事实,同时也掩盖了各区域主雨 季降水的主要环流特征。为了更客观细致的了解夏 季我国东部不同主雨季降水异常的成因机制,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。

华南前汛期是指华南地区在每年4月上旬至6 月中旬的降水集中时段,是我国东部汛期的开始, 东亚夏季风雨带便于此时建立。许多学者对华南前 汛期降水进行了广泛的研究,主要集中在降水的长 期变化、空间分布异常、环流特征、外强迫因子等 方面(吴尚森和梁建茵, 1992; 覃武等, 1994; 邓 立平和王谦谦, 2002; Yang and Sun, 2005; 苗春 生等, 2006; 李宏毅等, 2012; Yim et al, 2014)。 目前有关华南前汛期降水的工作大多以整个前汛 期或 5、6 月份作为研究时段。事实上,已有研究 指出, 华南前汛期降水分为两个阶段: 5 月中旬前 大雨带位于华南北部,主要是北方冷空气侵入形成 的锋面降水; 5 月中旬后南海夏季风爆发, 暖性的 夏季风对流降水使得大雨带移至华南沿海, 前汛期 进入盛期(陈隆勋等,2000;池艳珍等,2005;郑 彬等,2006;强学民和杨修群,2008)。这两个阶 段降水的性质不同,环流系统的配置各异,因此, 若以华南前汛期整个时段作为研究对象,则不易区 分南海夏季风爆发前后不同性质降水的环流特征, 难以准确把握造成降水异常的关键机制,给业务预 测带来困难。此外,先前对前汛期时段降水的研究 多局限于华南地区,但此时我国东部其它地区也有 降水发生,考虑到同一时段影响我国东部各地的整 体环流形势是相同的,那么在此情况下我国东部其 它地区与华南地区降水的关系如何?

基于上述考虑,我们以南海夏季风爆发后的华 南前汛期盛期为研究对象,考察这一时期我国东部 降水异常的典型分布及成因机制。气候态上南海夏 季风爆发是在5月第4候(何金海和罗京佳,1999; 梁建茵和吴尚森,2002),而梅雨一般开始于 6 月 中旬(江志红等,2006;王遵娅和丁一汇,2008), 因此将华南前汛期盛期的代表时段取为 5 月 21 日 至 6 月 10 日。第 2 节是本文资料与方法;第 3 节 探讨华南前汛期盛期降水异常型及主要环流特征; 第 4 节探讨造成各降水型环流特征的可能成因;第 5 节是各降水型垂直环流结构的比较;第 6 节是结 论和讨论。

2 资料和方法

1958~2011 年逐日再分析数据集,水平分辨率 2.5°(纬度)×2.5°(经度),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; 1979~2011 年逐日外 逸长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR) 数据集(Lee, 2014),水平分辨率1°(纬度)×1° (经度),来自美国国家海洋大气局; 1958~2011 年逐日降水观测资料来自于中国气象局整编的756 个地面观测站,并从105°E 以东地区选出无缺测的 316 站代表我国东部降水。

本文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,下 文中降水型的空间分布图显示的均为距平百分率。 对于时间序列,利用谐波分析分离其年代际分量 (周期>9年);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(魏风英, 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 Wenzel-Kramers-Brillouin(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 华南前汛期盛期降水异常模态及 环流特征

利用 1958~2011 年中国逐日降水资料,对

105°E 以东 316 站 5 月 21 日至 6 月 10 日时段累积 降水进行经验正交函数分解,前两个模态通过了 North et al. (1982)的独立性检验;对其时间系数 进行标准化处理,并利用谐波分析方法分离年代际 分量 (周期>9 年);同时据标准化时间系数的年际 变化分量定义各型正、负异常年,重点探讨这两个 模态对应的环流特征。

3.1 第一模态(华南全区一致型降水)及其环流特征

华南前汛期盛期降水异常第一模态(EOF1)的 解释方差为 20.91%,图 la 是其空间分布。由图可 见,异常大值区表现为华南地区降水正异常,黄河 中游降水负异常,也即 EOF1 的时间系数为正(负) 异常时,我国东部呈现华南地区降水偏多(少)、 黄河中游降水偏少(多)的降水分布。如果以该模 态时间系数对降水场进行回归,也可以发现一致的 正异常显著区集中在我国华南(图略)。考虑到整 个华南地区都表现出一致且突出的降水异常,将该 模态称为华南全区一致型降水。图 1b 是该模态的 标准化时间系数序列(PC1),利用谐波分析得到 PC1 的年代际变化序列(周期>9 年)(图 1b 实线),



图 1 1958~2011 年华南前汛期盛期我国东部降水异常第一模态(全区一致型)的(a)空间分布及(b)标准化时间系数序列(黑实线为周期>9年的年代际序列)

Fig. 1 (a) The first EOF mode (EOF1) of precipitation anomalies in eastern China during the peak of pre-rainy season in South China and (b) its normalized time series (PC1) with 9-year running mean (curve)

即 20 世纪 60 年代及 80 年代处于负位相,70 年代 处于正位相,90 年代至 21 世纪初存在一个周期约 11 年的波动,之后又重新进入正位相。事实上,谐 波分析得到其年际变化的解释方差约 86.1%,而年 代际变化的解释方差约 13.9%,可见该模态以年际 变化为主,所以下文主要研究其年际变化成因。以 PC1 的实际序列减去年代际变化序列得到其年际变 化序列,定义年际变化上 PC1>1.0 为模态正异常代 表年,PC1<-1.0 为模态负异常代表年,得到正异 常代表年有7年(1959年、1961年、1962年、1971 年、1987年、1993年、2001年),负异常代表年有 7年(1963年、1965年、1972年、1974年、2002 年、2004年、2011年)。

为了突出环流的年际变化,首先利用谐波分析 滤去各环流要素年代际变化(周期>9年)的分量, 以 PC1 的年际变化序列对环流场的年际变化进行 回归来分析华南全区一致型降水对应的环流特征 (图 2)。在 EOF1 正异常年,对流层整层环流都发 生了显著的变化: 高空 200 hPa 上我国南方至日本 南部上空存在显著的西风距平, 而在南海中部至菲 律宾以东是显著的东风距平(图 2a),对应东亚急 流在我国东部上空整体偏南(图 3a);中层 500 hPa 我国东部上空是显著的位势高度负距平,而在菲律 宾及其以东是显著的位势高度正距平(图 2b),说 明此时副高西部脊较气候态明显偏西(图 3c);低 层 850 hPa 风场异常与中层十分一致,在我国南海 北部至菲律宾以东存在一个显著的异常反气旋(图 2c)。在这样的环流配置下,高层急流偏南伴随我 国东南沿海上空显著的辐散异常(图 3a),有利于 增强上升运动,而低层异常反气旋北侧显著的西南 风异常有利于输送更多的水汽到达我国华南地区

(Su et al., 2014), 二者共同造成华南全区一致型 正异常年我国南方的降水异常偏多。而在该模态负 异常年,环流异常与图2相反,对应高层东亚急流 在我国东部整体偏北,伴随我国南方上空的辐合异 常(图 3b),容易抑制上升运动,同时中层副高西 部脊偏东(图 3d),低层南海至菲律宾为显著的异 常气旋,削弱了我国华南上空的水汽输送,这样的 环流配置造成我国华南降水偏少。此外,如果分析 该模态负异常年低层水汽通量,会发现有一支沿着 青藏高压东侧向北的水汽输送(图略),这可能是 导致此时黄河中游降水偏多的原因之一。

由上述分析可见, 华南前汛期盛期我国华南降

水偏多(少)、黄河中游降水偏少(多)的华南全 区一致型分布对应的环流特征表现为东亚高空西 风急流在我国东部上空整体偏南(偏北)、副高西 部脊偏西(偏东),伴随我国南方上空辐散(辐合) 异常,低层南海北部异常反气旋(气旋)引起华南 有异常偏强(偏弱)的西南风水汽输送,造成相应 的降水异常。

3.2 第二模态(华南沿海东部型降水)及其环流特征

华南前汛期盛期降水异常第二模态(EOF2)的 解释方差为 11.54%, 图 4a 是其空间分布。EOF2 表现出华南沿海东部的闽粤部分地区与长江中下 游降水反向变化的形势,当其时间系数为正(负) 时,华南沿海东部降水偏多(少),而长江中下游 降水偏少(多)。值得注意的是,在此模态中,华 南地区的降水异常呈现出东西部反向变化的形势。 如果以该模态时间系数对降水场进行回归,会发现 显著异常区出现在两个地区,一个在广东沿海,一 个在长江下游(图略)。考虑到华南的降水大值区 主要位于沿海的东部地区,将此模态称为华南沿海 东部型降水。图 4b 是该模态的标准化时间系数序 列(PC2),利用谐波分析得到其年代际变化序列(周 期>9年)(图 4b 实线), 20 世纪 90 年代之前除 70 年代初外其余时段均处于正位相,90年代逐渐转变 为负位相,21世纪初似乎出现了周期约12年的波 动。事实上,谐波分析得到其年际变化的解释方差 约 79.9%,而年代际变化的解释方差约 20.1%,可 见该模态同样以年际变化为主,只是年代际变化比 重较第一模态有所增大。以PC2的实际序列减去年 代际变化序列得到其年际变化序列, 定义年际变化 上 PC1>1.0 为模态正异常代表年, PC1<-0.9 为模 态负异常代表年,得到正异常代表年6年(1960年、 1968年、1972年、1982年、1992年、1993年), 负异常代表年7年(1965年、1971年、1980年、 1991年、1994年、1995年、2000年)。

同样,首先利用谐波分析滤去各环流要素年代 际变化(周期>9年)的分量,之后以PC2的年际 变化序列对环流场的年际变化进行回归来分析华 南沿海东部型降水对应的各层环流特征(图 5)。在 该模态正异常年,高空 200 hPa 上我国环渤海地区 至日本海上空存在显著的东风距平,而从我国东南 沿海至日本以南的西太平洋是显著的西风距平(图 5a),对应东亚急流在我国东部上空整体偏南且强 度偏弱(图 6a);中层 500 hPa 上巴尔喀什湖以东



图 2 华南前汛期盛期我国东部降水异常第一模态(全区一致型)的时间系数年际变化序列回归的(a)200 hPa 纬向风场(单位: m/s)、(b)500 hPa 位势高度场(单位: dagpm)、(c)850 hPa 矢量风场。浅、深阴影区分别表示置信水平为0.95、0.99 的区域,冷、暖色分别表示负、正异常区,矢 量风场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. 2 Regressions onto PC1 of the (a) 200-hPa zonal wind (m/s), (b) 500-hPa geopotential height (dagpm), and (c) 850-hPa wind anomalies. Light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively. Cold and warm shaded areas indicate confident negative and positive anomalies. Shaded areas and areas encircled by red lines indicate confident meridional and zonal wind anomalies, respectively

为显著的位势高度正距平,而我国东部沿海至日本 以南的西太平洋为显著的位势高度负距平(图 5b), 表现为副高强度偏弱、北界偏南(图 6c);低层 850 hPa风场异常与中层十分一致,从我国华东华南至 日本以南是显著的气旋式异常(图 5c)。一方面, 高层急流偏弱说明大气的斜压性在此处减弱,不利 于天气尺度斜压扰动发展形成降水,而急流偏南则 意味着雨带偏南,因此不利于长江中下游降水;另 一方面,低层异常气旋西侧在我国东部的偏北风异 常削弱了向长江中下游的水汽输送,而在华南沿海 东部形成风场辐合,有利于此处的降水偏多。在这 样的环流配置下,引起长江中下游降水偏少而华南



图 3 华南前汛期盛期华南全区一致型降水(a、c) 正、(b、d) 负异常年合成的(a、b) 200 hPa 纬向风(单位: m/s)、(c、d) 500 hPa 位势高度(单位: dagpm) 实况。黑实线为合成场,蓝虚线为气候态。200 hPa 纬向风范围 20~40 m/s,间隔 2.5 m/s; 500 hPa 位势高度范围 586~590 dagpm,间隔 1 dagpm。(a、b) 填色区为散度异常通过显著性检验的区域,(c、d) 填色区为涡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 0.95、0.99 的区域,冷、暖色分别表示负、正异常区

Fig. 3 Composites of the actual (a, b) 200-hPa zonal wind and (m/s) (c, d) 500-hPa geopotential height (dagpm) in anomalously (a, c) positive and (b, d) negative years of PC1. The blue dashed lines indicate climatic means. Cold and warm shaded areas indicate confident negative and positive divergence anomalies for (a, b), but confident negative and positive vorticity anomalies for (b, d). Light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively

沿海东部降水偏多。该模态负异常年,各层环流异 常与图 5 相反,对应高层东亚急流在我国东部上空 整体偏北、强度偏强(图 6b),中层副高强度偏强、 北界偏北(图 6d),低层从我国华东华南至日本以 南是显著的反气旋式异常。高层急流偏强说明大气 的斜压性增强,有利于天气尺度斜压扰动发展形成 降水,而低层异常反气旋西侧的异常偏南风有利于 将更多的水汽输送至长江流域,因此导致长江中下 游降水偏多而华南沿海东部降水偏少。

综上所述,华南前汛期盛期我国华南沿海东部 降水偏多(少)、长江中下游降水偏少(多)的华 南沿海东部型降水分布对应的环流特征表现为东



图 4 同图 1,但为华南前汛期盛期我国东部降水异常第二模态(沿海东部型) Fig. 4 Same as Fig. 1, but for the EOF2

亚高空急流在我国上空偏南偏弱(偏北偏强),副 高强度偏弱(偏强)、北界偏南(偏北),以及低层 我国华东华南至日本以南的异常气旋(反气旋)。

4 华南前汛期盛期降水异常对应环 流特征的成因

以上分析仅讨论了环流异常对降水分布所产 生的影响,但是,这些环流异常产生的原因还不清 楚。考虑到与本文研究的前汛期盛期在时间尺度上 接近的季节内及延伸期欧亚上下游环流异常的关系 是一个演变的过程 (Ding and Wang, 2007; 布和朝 鲁等, 2008; 施宁等, 2009), 并且这类时间尺度上 的异常同时具有年际气候异常的背景 (钱维宏, 2012a, 2012b), 整个时间段体现出的环流异常特征 并不一定一直存在, 而其产生机制在各个时间片段 也不一定完全相同, 这些都是整个时段平均的环流 场所无法体现的。为此,下面以候、旬为单位对各 降水型对应环流异常的成因作进一步探讨。

4.1 第一模态(华南全区一致型降水)对应环流特 征的成因

根据前面的分析,华南全区一致型降水(EOF1)



Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the EO2

受到东亚急流南北偏移、副高西部脊东西偏移及低 层南海北部异常风场的影响。我们同时注意到:在 高层 200 hPa,巴尔喀什湖以南从北至南依次有显 著的西风距平、东风距平(图 2a);在低层 850 hPa, 从阿拉伯海至中南半岛也存在着显著的风场异常 (图 2c)。这意味着我国东部影响降水的环流与上 游环流可能存在密切的关系。考虑到上下游环流异 常之间存在传播的过程,在此以 PC1 的年际变化 序列对候、旬的环流场进行回归来探讨其中可能的 联系。

首先,在5月第5候,200 hPa 位势高度场上 红海北部—青藏高原西部—贝加尔湖西南侧—日 本海出现了显著的"一、+、一、+"的距平波列 (图 7a);波活动通量从伊比利亚半岛频散至地中 海,之后一支经中纬度的红海—伊朗高原—青藏高 原路径频散,另一支经高纬度的黑海—乌拉尔山路 径频散,两支波通量在贝加尔湖西南侧汇合后向日 本海方向频散;很明显,此波列在里海以东的部分



图 6 同图 3,但为华南前汛期盛期我国东部降水异常第二模态(沿海东部型) Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the EOF2

就是丝绸之路遥相关型(Silk Road Pattern, SRP) (Lu et al., 2002; Enomoto et al., 2003)。而在 500 hPa 位势高度场上(图 7b),波列中显著的异常区 与 200 hPa 相似,但波活动通量的高纬度频散路径 更加明显。与此同时,低层 850 hPa 风场上阿拉伯 海—马尔代夫—安达曼海—南海北部出现了明显 但不十分显著的"气旋—反气旋—气旋—反气 旋"风场异常波列(图 8a)。到了 5 月第 6 候(图 7c),200 hPa 上原红海北部的位势高度负异常被地 中海东部显著的位势高度正异常取代,波通量由此 先向东欧平原频散,之后一支折向东南经青藏高原 向下游频散,引起青藏高原西部的位势高度显著正 异常;另一支沿西西伯利亚平原向下游频散,二者 在贝加尔湖以南汇合后一支向南频散,一支向东频 散,引起华北至日本海的位势高度显著负异常,及 台湾以东的位势高度正异常,这说明 SRP 波列在此 时仍然存在。500 hPa 上由地中海东部沿高纬度传 播至日本海的波列更加明显(图7d),850 hPa 上原 有的从阿拉伯海至南海的风场异常波列变得更加 明显且显著,仅原安达曼海处的异常气旋向西南有 所移动(图8b)。先前研究发现,200 hPa 青藏高原 西部的正位势高度异常会引起中高层空气绝热下



图 7 华南全区一致型降水时间系数年际变化序列回归的(a、c、e) 200 hPa、(b、d、f) 500 hPa 位势高度距平(等值线,单位: gpm,0 gpm 线加 粗,间隔:5 gpm)和波活动通量(矢量,单位:m²/s²):(a、b)5月第5候:(c、d)5月第6候;(e、f)6月上旬。浅、深阴影区分别表示位势高 度异常置信水平为0.95、0.99的区域,冷、暖色分别表示负、正异常区,已略去值小于15个单位的矢量

Fig. 7 Regressions onto PC1 of the (a, c, e) 200-hPa and (b, d, f) 500-hPa geopotential height anomalies (contours, units: gpm) and wave activity fluxes (m^2/s^2) : (a, b) The 5th pentad in May; (c, d) the 6th pentad in May; (e, f) the early June. Light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively. Cold and warm shaded areas indicate confident negative and positive anomalies. Vectors less than 15 units are omitted

沉增温,从而抑制中层水汽凝结促使近地面热低压 发展,在阿拉伯海低层形成异常气旋(Watanabe and Yamazaki, 2012),并通过热带西风波导向下游传 播形成低层从阿拉伯海至南海的风场异常波列(刘 芸芸和丁一汇,2008; Wang et al.,2008)。至此, 高层与低层环流的配置与之前的发现十分一致,说 明在5月下旬正是高层的SRP 波列及其导致的低层 风场异常波列导致华南全区一致型降水对应的环 流异常。但我们同时注意到,在5月第6候,850 hPa 日本以南西太平洋上出现了显著的异常反气旋,中 心约在 140°E 附近(图 8b)。到了 6 月上旬,200 hPa 的 SRP 波列仍然存在,仅中心有所东移(图 7e); 850 hPa 上原日本以南的异常反气旋则明显西移(图 8c),中心移到了 130°E 附近,其西侧显著的南风 及西南风异常几乎覆盖了整个南海北部,而由阿拉 伯海向下游传播导致的南海反气旋则西移至中南 半岛。上述分析表明,在 6 月上旬,虽然高空影响 华南降水的 SRP 波列仍然存在,但低层影响降水的



图 8 华南全区一致型降水时间系数年际变化序列回归的 850 hPa 风场: (a) 5 月第 5 候; (b) 5 月第 6 候; (c) 6 月上旬。浅、深阴影区分别表示置 信水平为 0.95、0.99 的区域,冷、暖色分别表示负、正异常区,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. 8 Regressions onto PC1 of the 850-hPa wind anomaly: (a) The 5th pentad in May; (b) the 6th pentad in May; (c) the early June. Light and dark shaded areas indicate the anomalies are above 95% and 99% confidence levels, respectively. Cold and warm shaded areas indicate confident negative and positive anomalies. Shaded areas and areas encircled by red lines indicate confident meridional and zonal wind anomalies, respectively

环流已经变为由西太平洋西移而来的异常反气旋。

因此,华南全区一致型降水对应的高层环流异 常在整个前汛期盛期一直受到丝绸之路遥相关型 波列的影响,而其对应的低层环流异常在5月下旬 受由阿拉伯海向下游传播的风场异常波列影响,在 6月上旬则主要受西太平洋西移的异常反气旋影 响。虽然影响整个华南降水异常的低层环流是南海 北部的异常反气旋,但它在该时期不同时段产生的 机制不同。

4.2 第二模态(华南沿海东部型降水)对应环流特 征的成因

前面分析已经指出,在华南沿海东部型降水正 (负)异常年,东亚急流偏南偏弱(偏北偏强), 副高偏弱(偏强)、北界偏南(偏北),低层我国华 东华南至日本以南出现异常气旋(反气旋),导致 华南沿海东部降水偏多(偏少)、长江中下游降水 偏少(偏多)。在此同时,我国东部上游同样出现 了显著的环流异常:高层 200 hPa 在伊朗高原北部 为显著的东风距平,伊朗高原南部及阿拉伯海北部 为显著的东风距平(图 5a);低层 850 hPa 索马里附 近出现了显著的偏北风异常(图 5c)。那么这种情况 下我国东部上空的环流异常与上游欧洲及中亚环流 间的关系又是如何呢?我们仍以 PC2 的年际变化序 列对更细致的候、旬环流场进行回归来分析。

首先,在5月第5候,200 hPa 位势高度场上 北非一地中海西部一新地岛及乌拉尔山一贝加尔 湖—日本南部出现了显著的"-、+、-、+、-" 的距平波列(图 9a);波活动通量由格陵兰岛以南 频散,一支向东南经地中海西部频散至北非,另一 支经斯堪的纳维亚半岛、乌拉尔山向下游频散形成 贝加尔湖及日本南部的位势高度异常中心。500 hPa 上的波列异常中心及波活动通量频散路径与 200 hPa 十分相似(图 9b),并且波列异常中心更加显 著。上述中高层范围广大的波列结构十分类似于极 地—欧亚遥相关型(Polar Eurasia pattern, PEA) (Barnston and Livezey, 1987)。与此同时, 850 hPa 上我国华东沿海出现了显著的偏北风异常,对应于 日本以南的异常气旋(图10a)。到了5月第6候, 200 hPa 位势高度场上原 PEA 波列消失,而在伊朗 高原北部一贝加尔湖一我国华东及日本南部出现 了"一、+、一"的距平波列(图 9c),这正是环 球遥相关型(Circumglobal teleconnection, CGT) (Ding and Wang, 2005)的负位相;其上游北大西 洋中部为位势高度负异常,地中海及北非分别为显 著的位势高度正、负异常,波活动通量由北大西洋 中部经地中海频散至北非,之后折向东北频散,再 在里海处折向东南频散引起伊朗高原位势高度负 异常,最终形成 CGT 波列。考虑到此时印度半岛 附近尚无显著的对流异常(图略),因此这时 CGT 波列的形成主要是由上游来自北大西洋的欧洲中 纬度波列传播导致的(Ding and Wang, 2007)。500 hPa 的波列与 200 hPa 类似(图 9d), 850 hPa 日本 以南的异常气旋仍然维持(图 10b)。

进入6月上旬,各层环流均发生了较大变化。 200 hPa 上 CGT 波列在伊朗高原附近的中心明显扩 大,异常显著区跨越了从红海至青藏高压西南部的 广大地区: 其在贝加尔湖以南的异常中心变得更加 显著,在东亚沿岸的中心维持在我国近海及日本南 部(图 9e)。注意到此时从孟加拉湾至菲律宾南部 出现了大范围显著的 OLR 正异常 (图 11), 说明出 现了大范围强对流减弱,导致中高层潜热释放异常 偏弱,在其西侧伊朗高原附近地区激发位势高度负 距平 (吴国雄等, 2002); 考虑到此时上游对 CGT 波列在伊朗高原的异常中心的波活动通量频散已 大大减弱,因此这时 CGT 波列主要是因为热带的 对流异常激发的。这时异常对流的产生是由于以下 两点: 一方面, 5月第6候 200 hPa 上 CGT 波列在 伊朗高原上空的负异常中心会通过动力作用削弱 中高层的绝热下沉运动,促使中层水汽凝结进而削 弱近地面沙漠热低压(Watanabe and Yamazaki, 2012),在低层阿拉伯海产生异常反气旋,并通过 热带西风波导向东南侧传播形成异常气旋,在二者 之间产生异常东北风(图 10b);另一方面, 6 月上 旬 850 hPa 上西印度洋、北印度洋分别出现了显著 的北风异常、东风异常(图 10c),说明索马里越赤 道气流偏弱;二者引起相关的热带西风显著减弱, 由此向印度半岛、孟加拉湾、中南半岛的水汽输送 偏弱,导致上述大范围地区对流减弱。纵观整个时 段,850 hPa 上从我国东部沿海至日本以南的异常 气旋一致存在(图 10),但与上下游风场异常无明 显来源联系,因此其主要是由于高层波列在日本南 部附近的异常中心通过动力作用导致的。

由以上分析可见,华南沿海东部型降水对应的 东亚沿岸的环流异常在5月第5候主要受极地——欧 亚遥相关型的影响,之后主要受环球遥相关型的影 响,使得中高层在日本南部附近一直维持位势高度

0

30E

60Ē

90E

负距平,并通过动力作用引起低层异常气旋,引起 急流偏南偏弱、副高偏弱南退,导致相应降水异常。 但环球遥相关型在5月下旬主要由上游中纬度波列 传播形成,而在6月下旬则由南亚、东南亚热带对 流异常维持。





通过前面的分析可以发现, 华南全区一致型降



图 9 同图 7, 但为华南沿海东部型降水, 且己略去值小于 10 个单位的矢量 Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the EOF2. Vectors less than 10 units are omitted

180

150E

20 m² s⁻²

120E



Fig. 10 Same as Fig. 8, but for the EOF2

水与华南沿海东部型降水在整个对流层均存在着 显著的环流异常,并且各层环流异常还有相似之 处。因此,其环流的垂直结构也必定存在某些相似, 下面对此进行分析。

图 12 是华南全区一致型与华南沿海东部型各 自时间系数年际变化序列对纬向平均的垂直环流 异常的回归。考虑到沿海东部型的降水异常大值区 比全区一致型偏东(图 1a、图 4a),因此对其所选 的纬度范围也相应偏东。全区一致型正异常年对应 22°N~30°N 的我国南方上空有显著的整层上升运 动且高层显著区更加宽广,而在 10°N~18°N 的南 海北部上空则有显著的整层下沉运动(图12a)。沿海东部型正异常年对应20°N~25°N的华南沿海东部上空也有整层显著的上升运动,而在30°N~35°N的长江中下游上空则是整层显著的下沉运动(图12b)。很明显,两个降水型在降水偏多区上空都存在整层深厚的上升运动,而在降水偏少区都存在整层深厚的下沉运动,但前者垂直运动的经向范围要明显大于后者。进一步分析发现,对于全区一致型降水,低层存在从下沉运动区吹向上升运动区的异常经向风, 同垂直运动通过经向风形成了一个



图 11 华南沿海东部型降水时间系数年际变化序列回归的 6 月上旬 OLR 场(单位: W/m²)。浅、深阴影区分别表示置信水平为 0.95、0.99 的区域, 冷、暖色分别表示负、正异常区

Fig. 11 Regressions onto PC2 of the OLR anomaly (W/m²) in early June. Light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively. Cold and warm shaded areas indicate confident negative and positive anomalies



图 12 两降水型时间系数年际变化序列回归的垂直环流场(单位: m/s, 垂直速度已扩大 100 倍): (a) 华南全区一致型, 107.5°E~127.5°E 平均; (b) 华南沿海东部型, 112.5°E~132.5°E 平均。浅、深阴影区分别表示垂直速度异常置信水平为 0.95、0.99 的区域, 冷、暖色分别表示负、正异常区 Fig. 12 Regressions of the anomalous vertical movement (m/s) onto (a) PC1 and (b) PC2 (the vertical velocity is multiplied by 100). Light and dark shaded areas indicate the anomalies are above the 95% and 99% confidence levels, respectively. Cold and warm shaded areas indicate confident negative and positive anomalies

闭合的经向垂直环流圈(图12a);而对于沿海东部型降水,虽然低层有从下沉运动区吹向上升运动区的异常经向风,但高层却没有明显的从上升运动区 吹向下沉运动区的异常经向风,说明这种情况下垂 直环流并未闭合(图12b)。另外,全区一致型降水 其上升运动区高层对应着明显的经向风辐散异常, 下沉运动区高层对应着明显的经向风辐合异常,这 些特征在沿海东部型的情况都不存在。前文分析认为,全区一致型降水对应的环流异常在高层受 SRP 波列影响,在低层受上游来自阿拉伯海波列和下游风场异常西移的共同影响,而沿海东部型降水对应的环流异常只受高层上游 PEA、CGT 波列影响,低层的风场异常是高层异常动力作用导致的。不同的环流异常来源以及低层环流形成的不同机制可能

是造成两种降水型垂直结构差异的原因,有待于后续工作进一步深入分析。

6 结论和讨论

本文重点探讨了华南前汛期盛期(5月21日至 6月10日)我国东部降水异常模态的环流特征及可 能成因,得出如下主要结论:

(1)华南前汛期盛期我国东部降水异常第一模态为华南全区一致型降水,当其时间系数为正(负) 异常时,整个华南地区降水偏多(少)、黄河中游 降水偏少(多);第二模态为华南沿海东部型降水, 当其时间系数为正(负)异常时,华南沿海东部降 水偏多(少),而长江中下游降水偏少(多)。

(2) 华南全区一致型降水主要受到东亚高空西风急流偏南(北)、副高西部脊偏西(东)、低层南海北部异常反气旋(气旋)的影响。中高层环流异常在整个时段均受丝绸之路遥相关型影响,而低层风场异常在5月下旬受由阿拉伯海向下游传播的风场异常波列引起,在6月上旬则主要由西太平洋西移的异常反气旋(气旋)造成。

(3) 华南沿海东部型降水主要受到东亚高空西 风急流偏弱(强)偏南(北)、副高偏弱(强)且 北界偏南(北)、低层日本以南西太平洋异常气旋 (反气旋)的影响。中高层环流异常在5月第5候 由极地—欧亚遥相关型导致,之后由环球遥相关型 引起,且环球遥相关在6月上旬与之前的产生机制 不同,低层风场异常是由高层异常的动力作用造成 的。

(4)两个降水型在降水偏多区均对应整层深厚的上升运动,在降水偏少区均对应整层深厚的下沉运动。但全区一致型降水上空存在闭合的经向垂直环流,而沿海东部型降水上空的垂直运动没有闭合,且前者高层的辐散辐合运动要比后者明显的多。

先前研究发现,在季节内时间尺度上,夏季北 太平洋中部高层的环流异常会通过高层辐合辐散 引起中太平洋热带对流异常,随后在低层激发出西 传的赤道 Rossby 波以低层异常气旋/反气旋的形式 影响东亚副热带降水(Lu et al., 2007;吴捷等, 2013)。事实上,对华南全区一致型环流异常的分 析中,在5月第5、6候200hPa北太平洋中部出现 了显著的位势高度距平(图 7a、7c),而5月第6 候、6月上旬850hPa西太平洋就出现了西移的异常反气旋(图8b、8c)。那么这种情况下低层副热带西太平洋的异常风场是否如先前研究那样与高层环流有关呢?还有待进一步分析。此外,两个降水型都表现出5月下旬和6月上旬环流特征和成因显著不同,尤其是华南沿海东部型降水对应的6月上旬索马里越赤道气流突然发生异常的产生机制仍不清楚(图10c),因此这两个阶段间环流如何过渡的机制也需要深入分析。本文有关环流场及物理过程的诊断还仅仅是统计分析的结果,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)

- Barnston A G, Livezey B E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. Mon. Wea. Rev., 115, 1083–1126, doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0. CO;2.
- 布和朝鲁, 施宁, 纪立人, 等. 2008. 梅雨期 EAP 事件的中期演变特征与 中高纬 Rossby 波活动 [J]. 科学通报, 53 (1): 111–121. Bueh C, Shi Ning, Ji Liren, et al. 2008. Features of the EAP events on the mediumrange evolution process and the mid- and high-latitude Rossby wave activities during the Meiyu period [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (4): 610–623, doi: 10.1007/s11434-008-0005-2
- 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 陆地旱涝的关系 [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 Journal of Geophysics (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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1212–1222, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.16.
- 陈隆勋, 李薇, 赵平, 等. 2000. 东亚地区夏季风爆发过程 [J]. 气候与 环境研究, 5 (4): 345–355. Chen Longxun, Li Wei, Zhao Ping, et al. 2000. On the process of summer monsoon onset over East Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (4): 345–355, doi: 10.3969/j.issn. 1006-9585.2000.04.002.
- 池艳珍,何金海,吴志伟. 2005. 华南前汛期不同降水时段的特征分析 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 163–171. Chi Yanzhen, He Jinhai, Wu Zhiwei. 2005. Features analysis of the different precipitation periods in the pre-flood season in South China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (2): 163–171, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097. 2005.02.003.
- 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, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2002.01.006.

- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 835–846, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.16.
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer [J]. J. Climate, 18 (17): 3483–3505, doi: 10.1175/ JCLI3473.1.
- Ding Q H, Wang B. 2007. Intraseasonal teleconnection between the summer Eurasian wave train and the Indian monsoon [J]. J. Climate, 20 (15): 3751–3767, doi: 10.1175/JCLI4221.1.
- 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]. International Journal of Climatology, 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]. International Journal of Climatology, 29 (13): 1926–1944, doi: 10.1002/joc.1759.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (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, 66 (4): 566-576. Du Yin, Zhang Yaocun, Xie Zhiqing. 2008. Impacts of longitude location changes of East Asian westerly jet core on the precipitation distribution during Meiyu period in middle-lower reaches of Yangtze River valley [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (4): 566-576, 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 581–592, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.15.
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 129 (587): 157–178, doi: 10.1256/qj.01.211.
- 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[C]//亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 81-86. He Jinhai, Luo Jingjia. 1999[C]//New Advances in Research on Asian Monsoon (in Chinese). Beijing: China Meteorlogical Press, 81-86.

Hong J L, Liu Y M. 2012. Contrasts of atmospheric circulation and

associated tropical convection between Huaihe River valley and Yangtze River valley mei-yu flooding [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (4): 755–768, doi: 10.1007/s00376-012-1217-6.

- 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]. Chinese Science Bulletin, 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 Journal of Atmospheric Sciences (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: 10.11821/ xb200607001.
- 瑶建华,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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 187–194, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.02.03.
- 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.
- 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.
- Lee H T. 2014. Climate Algorithm theoretical basis document (C-ATBD): Outgoing longwave radiation (OLR)-daily[R]. NOAA's Climate Data Record (CDR) Program, CDRP-ATBD-0526, 46pp.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (5): 641–658, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.05.01.
- 李宏毅,林朝晖,陈红. 2012. 我国华南 4、5 月份降水年代际变化的特 征及其与中西太平洋海温的可能关系 [J]. 气候与环境研究, 17 (4): 481-494. Li Hongyi, Lin Zhaohui, Chen Hong. 2012. Characteristics of the interdecadal variability of precipitation in April and may over South

China and possible relationship with the mid-West Pacific SST [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 481–494, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.11040.

- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (6): 829–844, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2002.06.11.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 439–450, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12313.
- 刘芸芸, 丁一汇. 2008. 印度夏季风的爆发与中国长江流域梅雨的遥相 关分析 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38 (6): 763–775. Liu Yunyun, Ding Yihui. 2008. Teleconnection between the Indian summer monsoon onset and the Meiyu over the Yangtze River valley [J]. Science in China (Series D: Earth Science), 51 (7): 1021–1035, doi: 10.1007/s11430-008-0073-9.
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. Tellus A, 54 (1): 44–55, doi: 10.1034/j.1600-0870.2002. 00248.x.
- Lu R Y, Ding H, Ryu C S, et al. 2007. Midlatitude westward propagating disturbances preceding intraseasonal oscillations of convection over the subtropical western North Pacific during summer [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (21): L21702, doi: 10.1029/2007GL031277.
- 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 anomolies between the Huaihe Meiyu season and the Jiangnan Meiyu season and their climate background [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 36 (2): 397–410, doi: 10.11676/ qxxb2011.028.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 2006. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与 前汛期华南降水的关系分析 [J]. 大气科学, 30 (6): 1249–1256. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006. The anomalous features of the northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1249–1256, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.19.
- 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.
- 钱维宏. 2012a. 天气尺度瞬变扰动的物理分解原理[J]. 地球物理学报, 55(5): 1439–1448. Qian Weihong. 2012a. Physical decomposition principle of regional-scale atmospheric transient anomaly [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55 (5): 1439–1448, doi: 10.6038/j. issn.0001-5733.2012.05.002.
- 钱维宏. 2012b. 如何提高天气预报和气候预测的技巧 [J]. 地球物理学 报, 55 (5): 1532–1540. Qian Weihong. 2012b. How to improve the skills

of weather and climate predictions?[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55 (5): 1532–1540, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.010.

- 强学民,杨修群. 2008. 华南前汛期开始和结束日期的划分[J]. 地球物 理学报, 51 (5): 1333–1345. Qiang Xuemin, Yang Xiuqun. 2008. Onset and end of the first rainy season in South China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (5): 1333–1345, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.05.007.
- 覃武, 孙照渤, 丁宝善, 等. 1994. 华南前汛期雨季开始期的降水及环流 特征 [J]. 南京气象学院学报, 17 (4): 455–461. Qin Wu, Sun Zhaobo, Ding Baoshan, et al. 1994. Precipitation and circulation features during late-spring to early-summer flood rain in South China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 17 (4): 455–461.
- 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 C, 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1087–1100, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.18.
- Su Q, Lu R Y, Li C F. 2014. Large-scale circulation anomalies associated with Interannual variation in monthly rainfall over south china from May to August [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 31 (2): 273–282, doi: 10.1007/s00376-013-3051-x.
- 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]. Journal of Atmospheric Sciences, 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 Advances in Research on Asian Monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. 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]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (5): 513–525, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001.
- Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al. 2008. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 35 (14): L14702, doi: 10.1029/2008GL034330.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 313–318, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12301.
- 王遵娅, 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 Journal of Atmospheric Sciences (in

Chinese), 32 (1): 1-13, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.01.

- Watanabe T, Yamazaki K. 2012. Influence of the anticyclonic anomaly in the subtropical jet over the western Tibetan Plateau on the intraseasonal variability of the summer Asian monsoon in early summer [J]. J. Climate, 25 (4): 1291–1303, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00036.1.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 27pp. Wei Fengying. 2007. Climate Statistical Diagnosing and Prediction (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorlogical Press, 27pp.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京:科学出版社, 231pp. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. Dynamics of the Formation and Variation of Snbtropical Anticyclones (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 231pp.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2010. 气候变率诊断和预测方法 [M]. 2 版. 北京: 气象 出版社, 29pp. Wu Hongbao, Wu Lei. 2010. Methods for diagnosing and forecasting climate variability (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorlogical Press, 29pp.
- 吴捷, 许小峰, 金飞飞, 等. 2013. 东亚—太平洋型季节内演变和维持机 理研究 [J]. 气象学报, 71 (3): 476–491. Wu Jie, Xu Xiaofeng, Jin Feifei, et al. 2013. Research of the intraseasonal evolution of the East Asia Pacific pattern and the maintenance mechanism [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71 (3): 476–491, doi: 10.11676/qxxb2013.038.
- Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2009. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. J. Climate, 23 (9): 2389–2403, doi: 10.1175/2009JCLI3336.1.
- 吴尚森,梁建茵. 1992. 华南前汛期早涝时空分布特征 [J]. 热带气象, 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.
- 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 mehanisms for westward extension (northward shift) of pacific subtropical high [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (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 and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 231–242.
- Yang H, Sun S Q. 2005. The characteristics of longitudinal movement of the subtropical high in the western Pacific in the pre-rainy season in South China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (3): 392–400, doi: 10.1007/BF02918752.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 586–595, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.04.04.

- 叶笃正,陶诗言,李麦村. 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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (4): 249–263.
- Yim S Y, Wang B, Kwon M H. 2014. Interdecadal change of the controlling mechanisms for East Asian early summer rainfall variation around the mid-1990s [J]. Climate Dyn., 42 (5): 1325–1333, doi: 10.1007/s00382-013-1760-6.
- 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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (5): 569–577, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2001.05.007.
- 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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (2): 199–211, doi: 10.11676/ qxxb1998.019.
- 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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (5): 559–568, doi: 10.11676/qxxb2003.056.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 656–669, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895. 1402.13240.
- 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.
- 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.15.
- 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.