金大超,管兆勇,蔡佳熙,等. 2010. 近 50 年华东地区夏季异常降水空间分型及与其相联系的遥相关 [J]. 大气科学,34 (5):947-961. Jin Dachao, Guan Zhaoyong, Cai Jiaxi, et al. 2010. Anomalous summer rainfall patterns in East China and the related teleconnections over recent 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 947-961.

# 近 50 年华东地区夏季异常降水空间分型及 与其相联系的遥相关

金大超<sup>1,2</sup> 管兆勇<sup>1,2</sup> 蔡佳熙<sup>1,2</sup> 江丽俐<sup>3</sup>

1南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京 210044

2南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

3 绍兴市气象局, 绍兴 312000

摘 要 利用中国华东地区 91 个站点 1961~2007 年夏季 (6~8月) 逐日降水资料和 NCEP/NACR 再分析资料, 用旋转经验正交函数 (REOF) 方法将华东地区夏季降水场分为 5 个区域,即 I 区(闽赣地区)、II 区 (江南)、III 区 (长江中下游地区)、IV 区 (江淮)和 V 区 (黄淮)。这 5 个区域的夏季降水周期显著不同,当 I 区降水的年际 周期性强 (弱)时,II、III、IV、V 区降水年际周期性弱 (强)。I~V 区夏季降水的年代际及年际变率的年代际变 化显著,且在年代际降水较少或由多变少或由少变多的转换时段,容易发生较大的年际变化。各区降水异常形成 的局地成因有所差别。其中,江南南部、江南、沿江(长江中下游)受低层异常反气旋控制,该异常反气旋使得这 些地区出现水汽辐散,与异常的非绝热冷却结合,造成异常下沉气流,导致干旱发生。对于江淮之间的地区,由 南侧异常气旋性环流和北侧反气旋环流的西部辐散气流控制,造成水汽向南北两侧辐散,导致降水偏少;对于黄 淮地区干旱,可归因于位于蒙古高原上的反气旋异常和位于西太平洋上的气旋性异常之间的异常偏北气流造成 该地区水汽的异常辐散所致。华东 5 个区域的夏季降水和不同类型的遥相关有关。闽赣地区降水受欧亚一太平 洋型(EUP)遥相关影响;江南地区降水则可能受东亚一太平洋型(EAP)/太平洋一日本型(PJ)影响,亦与太平 洋一北美型(PNA)存在可能的联系;长江流域则可能受东大西洋型(EA)和 EAP 型影响;江淮地区降水则明显 地受 EA/EUP 和 PJ/EAP 的共同影响,而黄淮降水则与源于地中海地区向东北传播且通过北极涛动(AO)产生 影响的波列存在联系。这 5 个区域的夏季降水异常还和东亚地区位涡、南海夏季风、Niño3、Niño4 区海温、西太 平洋副高变动等因子有关。

关键词 华东 夏季降水异常 旋转经验正交函数 遥相关
 文章编号 1006 - 9895 (2010) 05 - 0947 - 15
 中图分类号 P461
 文献标识码 A

# Anomalous Summer Rainfall Patterns in East China and the Related Teleconnections over Recent 50 Years

JIN Dachao<sup>1, 2</sup>, GUAN Zhaoyong<sup>1, 2</sup>, CAI Jiaxi<sup>1, 2</sup>, and JIANG Lili<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**收稿日期** 2009-10-21, 2010-04-12 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划项目 2007BAC29B02

作者简介 金大超, 男, 1985年出生, 硕士, 研究方向为气候动力学。E-mail: jindachao@126.com

**通讯作者** 管兆勇, E-mail: guanzy@nuist. edu. cn

3 Shaoxing Meteorological Bureau, Shaoxing 312000

Abstract Based on the daily summer (June - August) precipitation at 91 stations in East China from 1961 to 2007 and NCEP/NCAR reanalysis data, five subdivisions of summer precipitation in East China are divided by using rotated empirical orthogonal function (REOF) method. They are subdivision I (Fujian - Jiangxi), subdivision II (South of the Yangtze River), subdivision III (the middle and lower reaches of the Yangtze River), subdivision IV (Huaihe River), and subdivision V (Yellow River - Huaihe River). Anomalies of summer rainfall in these five subdivisions change in different ways on interannual time scale. When the interannual rainfall in subdivision I is more (less) than normal, and other subdivisions' precipitation is less (more) than normal. Both the interdecadal variations and the interdecadal changes of interannual variabilities of the precipitation are remarkable. The maximum interannual variability occurs in the period that the precipitation is less than normal, or in the transition periods that the precipitation become more or less. The rainfall anomalies in different subdivisions are different. The area of Fujian - Jiangxi, the south of the Yangtze River, the middle and lower reaches of the Yangtze River have less rainfall, which is because an anomalous anticyclone causes moisture to diverge outward from these subdivisions. These anticyclonic circulation anomalies along with the abnormal diabatic cooling induce the anomalous descent of air, and henceforth lead to droughts in these subdivisions. In the region between the Yangtze River and the Huaihe River the divergent flow prevails. This divergent flow is caused by the divergence of the gear-coupled anomalous anticyclone north of the Huaihe River and anomalous cyclone south of the Yangtze River. This divergent flow transports the moisture outward from this region, reducing the precipitation there. In the Yellow River - the Huaihe River area, the divergent airflow exists between the anomalous anticyclone over the Mongolian Plateau and the abnormal cyclone over the western Pacific. It is also found that the five patterns of the summer rainfall anomalies are related to different teleconnections. Precipitation anomalies in Fujian and Jiangxi are influenced by Eurasia - Pacific (EUP) teleconnection, JJA (June - July - August) mean precipitation anomalies in the area south of the Yangtze River may be partly affected by East Asia - Pacific (EAP)/Pacific - Japan (PJ)/Pacific - North America (PNA) teleconnections. The JJA precipitation anomalies in the area along the Yangtze River are possibly influenced by East Atlantic (EA)/EAP teleconnection. It is apparently seen that the rainfall anomalies around the Huaihe River are influenced by EA/EUP and PJ/ EAP teleconnections. The summer rainfall anomalies in the regions between the Yellow River and Huaihe River are likely to be influenced by the wave train perturbations propagating from the Mediterranean northeastward and influenced by AO (Arctic Oscillation). The summer rainfall anomalies in the five subdivisions are also found to be related to the potential vorticity anomalies in East Asia, anomalous activities of the South China Sea summer monsoon, the sea surface temperature anomalies in the Niño3 and Niño4 regions, and the variabilities of the western Pacific subtropical high.

Key words East China, anomalous summer rainfall pattern, rotated empirical orthogonal function (REOF), teleconnections

# 1 引言

华东地区受夏季风活动异常影响,不同时间尺 度上的极端降水事件时有发生。华东地区是我国重 要的农作物产区和大城市集中区,干旱和洪涝都会 对该地区的农作物生产和人民生活造成重大影响。 因此,十分有必要对华东地区夏季降水的时空变化 规律及成因进行研究。

20 世纪 80 年代, 廖荃荪等(1981) 将我国东 部地区降水划分为 I、II、III 类雨型。魏凤英和张 先恭(1988)在此基础上又对雨型进行了客观划 分,即I类雨型主要多雨区在黄河流域及其以北; II类雨型主要多雨区位于黄河以南至长江以北地 区;III类雨型主要雨区在长江沿岸及其以南。陈 烈庭等(2007)从我国夏季降水季节内变化中提取 出前6个主要模态,每个模态都显示出了其各自不 同的特点。

中国东部雨带的形成和变异与东亚夏季风活动 及其异常密切相关(陈隆勋等,1991),亦与其他外 强迫因子有关。有学者(杨修群等,1992; Wu and Huang, 1998; 黄荣辉等, 1999; 励申申和寿绍文, 2000;魏凤英,2005)认为长江流域降水与赤道东 太平洋海温有着密切的联系; Guan and Yamagata (2003)、Park and Schubert (1997) 认为东亚 1994 年干旱事件的发生与印度洋和太平洋海温有关;而 菲律宾周围的对流活动与江淮流域旱涝有着密切的 联系 (Kurihara and Kawahara, 1986; Nitta, 1987; 黄荣辉, 1990)。张庆云和陶诗言(1998, 2003)指 出,中国东部汛期降水异常与西太平洋副热带高压 变动联系密切。与这些外强迫和大气环流变异相联 系,季节内振荡 (ISO) (Madden and Julian, 1971, 1972)、遥相关诸如北大西洋涛动 (NAO) (符淙斌 和曾绍美,2005)、太平洋一日本型 (PJ) (Nitta, 1987: Kosaks and Nakamura, 2006; 吕俊梅等, 2006)、东亚-太平洋型(EAP)(黄荣辉, 1990; Huang, 2004: 黄荣辉等, 2006: 李崇银和潘静, 2007: 陈文等, 2008)、北非一东亚地区纬向分布的 遥相关型 (廖清海和陶诗言, 2004) 等与中国降水 亦存在密切联系。

由于华东地区降水异常发生规律极为复杂,制 约因素众多,且随着资料的逐年积累,有必要对异 常降水的空间分布特征和时间变化规律及其成因进 行进一步研究,为深刻理解该地区旱涝事件的形成 和预测提供线索。

资料

2

东、江苏、浙江、安徽、福建、江西和上海)。选取 华东地区 (23°N~38°N, 114°E~123°E) 91 个站点 (图 1a) 1961~2007 年共 47 年夏季 (6~8 月) 的逐 日降水资料、1961~2007 年 NCEP/NCAR 再分析 资料 (Kalnay et al., 1996) (空间分辨率为 2.5°× 2.5°经纬度)进行分析。遥相关指数[北极涛动 (AO)、NAO、太平洋-北美型 (PNA)]取自 NO-AA-CIRES Climate Diagnostics Center。文中夏季 所指为 1961~2007 年的 6~8 月。

# 3 华东地区夏季降水时空变化

华东地区的降水量分布很不均匀(图1b),降 水量最大值出现在安徽南部及安徽、浙江、江西交 界处,量值为750 mm;降水量最小值出现在山东 北部,量值为 420 mm。可见,华东地区夏季降水 具有南多北少的分布特点。图 1c 给出了华东地区 夏季降水距平的时间序列,标准差为 63.63 mm, 可以看出华东地区夏季降水距平低于1倍标准差的 年份有: 1961、1966、1967、1971、1978、1979、 1981、1986、1988、2004年;夏季降水距平高于1 倍标准差的年份有: 1962、1993、1995、1996、 1997、1998、1999年。华东地区夏季降水在1960 年代中期到 1980 年代末期降水量低于平均值, 1990年代到 2002年降水量偏多,到 2003、2004年 降水量又偏少。华东地区夏季降水分布空间上分布 很不均匀,时间上具有明显的年际和年代际变化特 征。





Fig. 1 (a) Locations of the 91 stations, (b) summertime total rainfall (mm) over East China, and (c) time series of JJA (Jun – Jul – Aug) rainfall anomalies

本文研究对降水而言限于华东六省一市(山

### 3.1 经验正交函数分析

对华东地区 91 站 47 年夏季降水量进行标准化 处理后进行经验正交函数(EOF)分析,第1特征 向量 (EOF1) 方差贡献率为 21.41%, 第 2 特征向 量 (EOF2) 的方差贡献率为 16.14%, 第 3 特征向 量 EOF3 的方差贡献为 10.53%, 第 4 特征向量 EOF4 的方差贡献为 8.85%。将特征向量进行 North 检验 (North et al., 1982), 发现前 2 个特征 向量可以有效分离。图2给出了前2个特征向量的 空间分布。由 EOF1 的空间分布看出,除山东部分 地区为正值其余地区均为负值,负值大值区位于浙 江东部、江西、安徽、浙江交界处以及江西西部等 江南地区 (图 2a)。EOF1 反应了第 I 类雨型 (魏凤 英和张先恭, 1988)。EOF2 显示降水异常大致以 28°N和34°N为界呈由南向北"+-+"结构(图 2b), 这与魏凤英和张先恭(1988) 提出的第 II 类 雨型相似。由第1特征向量的空间分布(图 2a)及 其时间系数(图2c)可知,1967、1971、1978、2004 年等年份降水量异常偏低, 1993、1995、1997、 1998、1999年等年份降水异常偏高,与华东地区年 降水量距平时间序列(图 1c)所得出的结果一致。 而1960年代降水偏少主要发生在山东地区,1990 年代降水偏多主要发生在江南地区,由 EOF1 和 EOF2 叠加而成。

## 3.2 旋转经验正交函数分析

EOF 分量的空间分布表明, 华东地区夏季降水异常具有较大的局地性。EOF 分析的第3至第5

特征向量经 North 检验 (North et al., 1982) 不能 有效分离。为进一步突出华东地区夏季降水的区域 特征, 对前 50 个特征向量进行旋转, 前 50 个特征 向量旋转后对原变量场的方差贡献之和为 91%。 特征向量旋转后前5个分量的方差贡献较大,分别 为: 9.09%、10.28%、8.59%、8.79%和8.75%。 华东地区夏季降水旋转经验正交函数 (REOF) 前 5 个模态(REOF1、REOF2、REOF3、REOF4、RE-OF5) 的空间分布如图 3a~e 所示。根据前 5 个旋 转空间模态的高载荷分布 (等值线绝对值大于等于 0.5),将华东地区分为5个降水区域。按上述分区 标准, 高载荷区覆盖了华东绝大部分地区, 且相邻 区域几乎没有重叠,分区方法客观可行。REOF3 (图 3a) 显示的主要降水异常位于江西南部、福建 和浙江最南部地区, REOF1 (图 3b)显示的主要降 水异常位于江西北部、浙江南部一带, REOF5(图 3c)的降水异常位于江苏南部、安徽南部和浙江北 部地区, REOF2 (图 3d) 的降水异常位于江苏中部 和安徽中部, REOF4 (图 3e)的降水异常区域包括 山东、江苏北部和安徽北部。这表明华东地区夏季 降水异常有较强的局地性。

黄荣辉等(1999)把全国 336 个测站根据地理 环境和气候特征将我国划分成7个区域(其中华东 地区分为:黄河流域、江淮流域、长江中下游流域 和闽赣地区)。本文根据前5个旋转空间模态的高 载荷分布(等值线绝对值大于等于0.5),将华东降 水分为5个区域,即I区是闽赣地区,II区是江南



图 2 华东地区夏季降水量 EOF 分析第 1 (a)、第 2 (b) 特征向量的空间分布及标准化后的时间系数 (c)。阴影:正值区 Fig. 2 Spatial patterns of (a) EOF1 (the first EOF mode) and (b) EOF2 (the second EOF mode) of JJA rainfall in East China, and (c) the corresponding normalized time coefficients. Areas with positive values are shaded



图 3 经 REOF 分析的第 3 (a)、第 1 (b)、第 5 (c)、第 2 (d)、第 4 (e) 空间模态及相应的区域划分 (f) (阴影区的旋转载荷向量绝对值大 于等于 0.5)

Fig. 3 Spatial patterns of the (a) third, (b) first, (c) fifth, (d) second, (e) fourth rotated EOF (REOF) modes, and (f) the corresponding subdivisions. Areas with values larger than 0.5 are shaded

地区, III 区是长江中下游地区, IV 区是江淮地区, V 区是黄淮地区(图 3f)。这与黄荣辉等(1999)的 结论相似,与廖荃荪等(1981)的结果存在联 系。

# 4 华东5个区域夏季降水异常特点

华东 5 个区域的夏季降水序列与各个分区对应 的 REOF 特征向量时间系数的相关见表 1。华东除 各区降水和各区所对应的 REOF 特征向量的时间 系数相关性较高,其他并无显著相关。这说明将华 东地区降水分为 5 个区域是合理、可靠的。为了进 一步弄清其不同,对这 5 个区域降水的时间序列进 行时域分析。

#### 4.1 5个区域降水的周期

对 5 个区域的降水时间序列进行功率谱分析, 给出了各区域功率谱分析结果(图 4),可以看到: I 区(图 4a)降水存在 3~5 年和 10~20 年周期; II 区(图 4b)降水存在准 2 年、准 3 年和 4~10 年周 期; III 区(图 4c)存在 2~3 年和 10 年以上的降水 周期; IV 区(图 4d)降水 2~3 年和 5~10 年周期 显著; V 区(图 4e)降水存在 2~3 年及 10 年以上 的降水周期。通过比较发现, 5 个区域的夏季降水 周期存在明显的差异。

对降水的标准化距平序列进行 Morlet 小波分析 (Torrence and Compo, 1998),给出不同区域小 波系数分布 (图略),发现 I 区降水在 1960 年代末、



图 4 华东地区 I 区 (a)、II 区 (b)、III 区 (c)、IV 区 (d)、V 区 (e) 夏季降水的功率谱分析 (实线)。虚线:通过 95% 信度红噪声检验 Fig. 4 Power spectrum analysis of summer rainfall for subdivisions (a) I, (b) II, (c) III, (d) IV, and (e) V (solid lines). Dashed lines are for the red noise at 95% confidence level

表 1 华东 5 个区域的夏季降水和各个区域对应的 REOF 特征向量的时间系数的相关系数

Table 1	Correlations between	summer precipitation	n in the five su	bdivisions of East	t China and th	e corresponding	time	coefficients
of the fiv	e leading REOF mode	es						

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$
$P_1$	0.905	0.247	-0.020	-0.104	-0.008
$P_2$	0.184	0.925	0.290	-0.043	-0.043
$P_3$	-0.023	0.267	0.897	0.244	-0.117
$P_4$	-0.086	-0.047	0.105	0.970	-0.023
$P_5$	0.017	-0.069	-0.080	0.008	0.951

注: I~V 区夏季降水量记为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ ,所对应的 REOF 特征向量的时间系数记为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ 、 $I_5$ 。

1990年代初存在准2年周期,准8年周期在1990 年代后较清楚。与I区显著不同,II区降水在1980 年代初和1990年代初存在显著的3~4年周期, 1980年代存在显著的7~8年周期。III区1990年 代末及以后存在显著的3~4年周期。IV区在 1990年代存在显著的准2年周期。V区7~15年 周期在1970年代以前比较清楚,2~3年周期在 1990年代末比较显著。

通过比较发现,5个区域夏季降水的周期存在

明显差异。当 I 区降水的年际周期性强(弱)时, II、III、IV、V 区降水年际周期性弱(强),各个区 域的降水年际周期不一致。有趣的是,如果我们以 1985年为界,I、II、III、IV 区 1985年后的周期比 1985年前的周期要长一些;V 区 1985年后的周期 显著,1985年前的周期不明显。

#### 4.2 5个区域夏季降水的年代际变化

记降水距平时间序列为 $\{P'_i\}$ (*i*表示年份序 号),将 $P'_i$ 分解成年际( $P'_{ia}$ )和年代际( $P'_{id}$ )分量 之和,即 $P'_i = P'_{ia} + P'_{id}$ 。分别对 $P'_i$ 的两个分量进行研究。华东 5 个区域降水除了存在着明显的年际变化外,年代际变化亦非常显著。这里的年代际变

化有二,一是降水本身的年代际变化 P'<sub>id</sub>,另一是 降水年际变化强度的年代际变化(图5)。这里降水 年际变化的强度由降水距平滤除年代际变化分量后



图 5 1961~2007 年 I 区 (a)、II 区 (b)、III 区 (c)、IV 区 (d)、V 区 (e) 夏季降水距平标准化后的年际 (*P*'<sub>iia</sub>)、年代际变化 (*P*'<sub>iid</sub>) 及降水 距平方差标准化后的年代际变化 (*P*'<sub>iia</sub>)

Fig. 5 The normalized time series of interannual  $(P'_{i\bar{n}a})$  and interdecadal  $(P'_{i\bar{n}d})$  anomalies of JJA rainfall, and the variance of interannual anomalies of JJA precipitation obtained by removing the interdecadal component using an 11-year running mean  $(P'_{i\bar{n}a})$  from 1961 to 2007 for subdivisions (a) I, (b) II, (c) III, (d) IV, and (e) V

的方差表示,即 P'2/ia。

I区(图 5a),降水从 60 年代到 70 年代中期降 水变化比较平稳,70年代末期到80年代末期为少 雨期,之后处于多雨期;60年代末和21世纪初降 水异常振幅较大。II 区 (图 5b), 60 年代降水偏 少,70年代中期到80年代末期降水处于过渡期, 90年代到21世纪初为多雨期,之后降水又偏少; 90年代初降水异常振幅较大。III区(图 5c),60 年代到 70年代中期降水偏少, 70年代中后期为降 水过渡期,80年代到90年代末期为多雨期,之后 降水偏少,该区降水从60年代到90年代呈现出增 长的趋势;60年代末和21世纪初降水异常振幅较 大。IV区(图 5d)降水在 60 年代到 70 年代降水 偏少,除90年代中期有一个短暂的少雨期,70年 代之后一直处于多雨期, IV 区降水也呈现出增长 的趋势; 60年代降水异常振幅较大。V区(图 5e) 60年代初降水偏多,60年代后期降水偏少,70年 代前期降水偏多,70年代后期到90年代中期为少 雨期,90年代中期有一个短暂的多雨期,之后降水 偏少,21世纪初降水又偏多,该区长期处于少雨 期,降水呈降低趋势;90年代末21世纪初降水异 常振幅较大。

综观华东各区域降水,其年代际改变非常明显,且年际变率的年代际变化也非常显著。2002 年后,闽赣地区、江淮及黄淮降水在年代际尺度上 增加,而长江及江南地区降水将减少。有趣的是, 不论是 I~V区中哪个区域,年际时间尺度上降水 距平相应的方差的年代际变化曲线基本都在降水年 代际变化曲线的非极大值时段出现高峰值,这表示 在年代际降水较少或由多变少或由少变多的转换时 段,较大的年际变化容易发生。

### 4.3 环流场特征

求取各区平均的逐年夏季降水距平序列的标准

差 σ,定义降水距平低于-1σ的年份为旱年,超过 1σ的年份为涝年(表 2)。挑选出的每个区域的旱 涝年与温克刚(2008)所记录的旱涝年份基本一 致。

图 6 给出了环流场特征,其中大气视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 和视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 的计算方案参见 Luo and Yanai (1984)倒算法计算大气热源的方法, $\langle Q_1 \rangle - \langle Q_2 \rangle$ 可分解成 3 个部分,即辐射加热、地表感热通量和地表蒸发潜热。

对闽赣地区(I区)降水异常而言,旱年与涝年 500 hPa高度场的差值(图 6a)显示在江南地区存 在正距平,正距平中心位于浙闽沿海;对流层低层 850 hPa反气旋环流异常,利于低层辐散和下沉气 流的形成;长江中下游地区〈Q1〉一〈Q2〉正异常(图 6b),说明长江中下游地区辐射加热和辐射热通量 异常,导致对流层低层大气辐合、高层辐散,闽赣 地区易产生对流层低层辐散,反气旋环流产生,而 水汽从该地区向西太平洋和南海输送(图 6b),造 成该地区降水偏少,形成干旱。

江南地区 (II区) 旱年与涝年 500 hPa 高度场 的差值 (图 6c) 显示闽赣以南地区为负距平,负距 平中心位于南海和西太平洋,即西太平洋副高偏 西、偏南;水汽向长江以北输送 (图 6d)。江南地 区 $\langle Q_1 \rangle - \langle Q_2 \rangle$ 为负值 (图 6d),辐射冷却,导致大 气冷却并不利于对流活动异常加强,对流层低层大 气辐散、高层辐合,产生反气旋环流,使得该地区 降水偏少,形成干旱。

长江中下游地区 (III 区) 旱年与涝年 500 hPa 高度场的差值 (图 6e) 上蒙古高原和西太平洋上有 异常的负距平中心,说明亚欧大陆上空气旋性异 常,西太平洋副高脊线偏西、偏北,夏季风强;水 汽向淮河以北输送 (图 6f),雨带北移;长江流域  $\langle Q_1 \rangle - \langle Q_2 \rangle$ 负异常 (图 6f),说明长江流域辐射冷

表 2	华	东地区:	5 个区垣	<b>战的旱</b> 液	劳年				
Table	2	The dro	ought an	d flood	vears	for	each	subdi	vision

ΙX		II	X	III 🗵		IV 🗵		V区	
旱年	涝年	旱年	涝年	旱年	涝年	旱年	涝年	旱年	涝年
1967、1971、	1968、1972、	1963、1967、	1983、1989、	1967、1968、	1980、1991、	1961、1964、	1962、1975、	1968、1983、	1962、1963、
1984、1987、	1995、1997、	1971、1978、	1993、1994、	1978年	1993、1996、	1966、1967、	1980、1987、	1989、1992、	1964、1965、
1988、1989、	2000, 2002,	1986、1991、	1995、1997、		1999、2001年	1973、1976、	1991、2003年	1997、1999、	1971、1974、
1991、2003、	2006年	2003年	1998年			1978、1994年		2002年	1990,2003,
2004 年									2007年



图 6 (a, c, e, g, i) 5 个区域 1961~2007 年旱年减涝年夏季 500 hPa 高度场 (单位: gpm) 和 850 hPa 风场 (单位: m/s) 的合成差值; (b, d, f, h, j) 1961~2007 年旱年减涝年夏季 (Q<sub>1</sub>)~(Q<sub>2</sub>)合成差值 (单位: W/m<sup>2</sup>) 以及夏季 1000~300 hPa 旱年减涝年水汽通量整层积分 (单位: kg·m<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, 空心箭头为水汽输送方向)。阴影为通过 95% 信度检验的区域; 粗、细箭头分别为通过 95%、85%~95% 信度 检验

Fig. 6 (a, c, e, g, i) Composite differences of summer 500-hPa height (gpm) field and 850-hPa wind field between drought and flood years during 1961 – 2007 for each subdivision; (b, d, f, h, j) composite differences of summer  $\langle Q_1 \rangle - \langle Q_2 \rangle$  (units: W/m<sup>2</sup>) and vertically integrated moisture transport flux (water vapor transport directions are roughly displayed by hollow arrows) between drought and flood years during 1961 – 2007 for each subdivision. Shaded areas: above 95% confidence level; bold (thin) arrows: above 95% (85% – 95%) confidence level

却异常,有于对流活动的减弱和潜热释放异常减少,导致对流层低层辐散、高层辐合,产生反气旋环流,造成长江流域地区降水偏少,形成干旱。

对江淮(IV区)降水异常而言,旱年与涝年 500 hPa高度场的差值(图 6g)显示西太平洋上有 异常的负距平中心,长江以北地区 850 hPa上对流 层反气旋环流异常,不利于低层辐合和上升气流的 形成; IV区(图 6h)干旱年水汽经西太平洋输送到 该地区后分别向南北输送,使得该地区干旱少雨。

黄淮地区 (V区) 旱年与涝年 500 hPa 高度场 的差值 (图 6i) 显示我国绝大部分地区为正距平, 正距平中心位于蒙古高原; 850 hPa 上淮河以北地 区存在反气旋切变,利于低层辐散和下沉气流的形 成;干旱年水汽由西西伯利亚经中西伯利亚、我国 东北部、华北、华东输送到云贵高原和南海(图 6j);黄淮地区 $\langle Q_1 \rangle - \langle Q_2 \rangle$ 负异常(图 6j),说明该地 区辐射冷却异常,有利于对流活动的减弱和潜热释 放异常减少,导致对流层低层辐散、高层辐合,产生 反气旋环流,造成该地区降水偏少,形成干旱。

#### 4.4 华东5区降水异常相联系的遥相关

为了从更大尺度上说明华东地区降水各型形成的环流成因,这里首先给出降水异常序列与各种遥相关指数包括北极涛动(AO)(Thompson and Wallace,1998)、NAO(龚道溢和王绍武,2000)、太平洋一北美型(PNA)、东大西洋型(EA)、西太平洋型(WP)、欧亚一太平洋型(EUP)(Wallace and Gutzler,1981; 施能等,1994)、PJ(Nitta,1987; Wakabayashi and Kawamura,2004)及EAP(Huang,2004; 陈文等,2008)的相关系数(见表3)。要说明的是,(1)这些已知的遥相关现象如

AO、NAO、PNA、EUP、EA 等不论在冬、夏季都 有相关的研究; (2) 为了突出降水显著异常年份的 环流特征,采用表 2 中所给年份构成时间序列,而 那些对各区而言,降水异常未达到 1 个标准差的年 份则不在本节统计研究之列。

可以看到, 闽赣地区 (I区) 降水和 EUP 型遥 相关指数相关达 0.68,存在密切的联系。江南(II 区) 降水和 PNA 指数呈现出较好的负相关, 表明 江南发生干旱(洪涝)时 PNA 处于低(高)指数 期。为何江南地区降水与 PNA 型存在显著相关, 尚需进一步研究。注意到长江中下游地区(III区) 降水与表 3 所列多种遥相关型在 90% 信度水平及 以上并无显著的联系,对这一降水类型的形成机制 可能还需另做研究。影响江淮地区(IV区)降水的 遥相关型较多,既有 EA、EUP,亦有 PJ、EAP 及 WP。事实上, EA 和 EUP 的波列有所重叠, 而 PI、EAP、WP 亦有在西太平洋存在结构上的相似 之处。蔡佳熙等(2009)研究表明,江淮地区 P-J 型波列对江淮流域夏季气温异常存在重要影响,气 温高低与降水异常密切相关。江淮降水还和 NAO 指数呈显著的正相关。有研究表明强 NAO 指数年 东亚夏季风强,我国大范围高温,雨带位置偏北, 易出现第 I 类雨型(王永波和施能, 2001)。黄淮 (V区)降水和 AO 指数的相关系数可通过 90%的 信度水平检验,呈正相关,即强 AO 指数年,黄淮 降水偏少,反之偏多。

为了进一步说明遥相关特征,利用表 2 中选出 的旱涝年份资料构成的时间序列,计算了各个区域 夏季降水与东半球 850 hPa 风场,500 hPa、200 hPa 高度场的同期相关(图 7)。

表 3 各区夏季降水异常序列与各遥相关指数的相关

	$P_{\mathrm{I}}$	$P_{\mathrm{II}}$	$P_{\mathrm{III}}$	$P_{\mathrm{IV}}$	$P_{ m V}$
EA (东大西洋型)	-0.24	-0.27	0.51	0.55	-0.02
EUP (欧亚-太平洋型)	0.68△	-0.30	0.37	-0.53  riangle	-0.38
PJ (太平洋一日本型)	-0.23	0.25	0.01	0.53 $ riangle$	0.15
EAP (东亚-太平洋型)	-0.17	0.21	0.41	0.68 $ riangle$	-0.32
WP (西太平洋型)	0.12	-0.07	-0.21	-0.53 $ riangle$	0.13
AO(北极涛动)	0.13	-0.18	-0.20	0.32	0.44*
NAO (北大西洋涛动)	0.13	0.19	0.30	0.64 $ riangle$	0.30
PNA (太平洋一北美型)	-0.01	$-0.52^{\triangle}$	-0.29	-0.01	0.25

注:为与前述旱涝年差值合成相对应,相关系数已乘一1。△(\*)为通过 95% (90%) 信度检验; P1-Pv表示 I~V区夏季降水异常。

957



图 7 5个区域 1961~2007 年旱年减涝年 500 hPa (a、c、e、g、i)和 200 hPa (b、d、f、h、j) 位势高度以及 850 hPa 风场和各区降水的相关(为与前述旱涝年差值合成相对应,相关系数已乘-1)。粉、黄阴影:通过 95%、90%信度检验的区域;箭头:通过 90%信度检验的风场和降水的相关

Fig. 7 Composite differences of correlations of precipitation anomalies for different subdivisions with the geopotential heights at (a, c, e, g, i) 500 hPa and (b, d, f, h, j) 200 hPa and with (a, c, e, g, i) 850-hPa wind fields between drought and flood years during 1961 - 2007 for each subdivision (correlation coefficients are multiplied by -1 to keep them consistent with the composites in Fig. 6). Areas with the correlations above 95% (90%) confidence level are pink (yellow) shaded, and the arrows represent the correlations between wind and rainfall are significant above 90% confidence level

对闽赣地区(I区)降水异常而言,850 hPa (图 7a)上自地中海西部至西太平洋存在"反气旋 一气旋一反气旋一气旋一反气旋"的环流异常,而 500 hPa 和 200 hPa(图 7a、b)上存在相应的"+ -+-+"的中心,这在对流层呈相当正压结构, 显示出自地中海西部向东传播的波列(Lu et al., 2002;陈芳丽和黎伟标,2009),而闽赣地区夏季降 水与 EUP 遥相关指数达到 0.68(表 3)。这是相当 清楚目十分有趣的联系。

江南地区 (II 区) 降水显著异常时,850 hPa (图 7c) 上菲律宾群岛至我国东北地区呈现出"气 旋一反气旋一气旋"结构,对应的对流层中高层高 度场上 (图 7c、d)存在"-+-"的相关区,即热 带西太平洋中高层位势高度降低 (增高),在中国 东部至日本本岛一线出现低层反气旋 (气旋)、中 高层出现位势高度场的相对升高 (降低),低空反 气旋发展 (减弱),呈现出 EAP 或 P-J 型遥相关。 注意到表 3 中  $P_n$ 与 PNA 的显著相关,我们需要关 注热带地区或洋中槽区到底发生了什么。这需要进 一步研究。

长江中下游地区(III区)降水异常时,自亚欧 边界至中太平洋 850 hPa(图 7e),存在"气旋一反 气旋一气旋一反气旋一气旋"的环流异常,500 hPa (图 7e)存在相应的"-+-+-"中心,200 hPa (图 7f)自伊朗高原以西至东亚存在一个"-+-+"的结构,这可能与"丝路型"遥相关有关(Enomoto et al., 2003)。在西太平洋一东亚地区,对流 层中低层存在 P-J型相似的遥相关结构。注意到表 3,此区降水和 EA、EAP 相关系数分别为 0.51 和 0.41(尽管 90%信度水平为 0.52),所以,此区降 水可能与这两种遥相关型亦存在某种联系。

对江淮 (IV 区)降水异常而言,850 hPa (图 7g)上自西太平洋至鄂霍次克海存在"气旋一反气 旋一气旋"的环流异常,500 hPa 和 200 hPa (图 7g、h)上存在相应的"一十一"中心,扰动呈准正 压结构,亦显示出 P-J 型或 EAP 型波列特征。表 3 还显示此区降水与 EA 型指数有较高的显著相关, 这在 500 hPa 和 200 hPa 上可看出存在穿越极区的 自西半球至西太平洋的波列结构。

黄淮(V区)降水异常时,850 hPa(图 7i)上自 撒哈拉至地中海北部再至北极地区存在"反气旋一气 旋一反气旋一气旋"的环流异常,500 hPa和 200 hPa (图 7i, j)存在相应的"+-+-"相关中心或区域,显示出源自撒哈拉地区向东北传播波列。但这一波列与黄准降水异常的联系尚不清楚。然而,表3中此区降水异常与 AO 指数存在 90%信度上的显著相关,来自地中海附近的扰动可能通过北极涛动对黄淮地区降水异常产生影响。同时,注意到,黄淮地区的降水偏少(偏多)还与整个副热带和热带地区位势高度的升高(降低)有关。这种联系是什么原因造成的,仍需进一步研究。

注意到整个东半球热带地区的位势高度与各区 降水均有较好的关系,这里制作了表4。可见除了 闽赣地区外,各区降水均与500 hPa赤道至25°N 东半球平均位势高度场呈显著相关(均可通过95% 信度水平检验)。而江南、江淮和黄淮降水与 200 hPa 位势高度场相关性较好,这与图7一致。

### 表 4 同表 3, 但为与赤道至 25°N 东半球平均位势高度场 的相关

Table 4 Same as table 3, but for correlations with the geopotential height anomalies averaged over the area from the equator to 25°N of Eastern Hemisphere

	$\mathbf{P}_{\mathrm{I}}$	$\mathbf{P}_{\mathrm{II}}$	$\mathrm{P}_{\mathrm{III}}$	$P_{IV}$	$P_{\rm V}$
500 hPa	-0.12	$-0.59 \triangle$	$-0.67 \triangle$	$-0.54 \triangle$	0.57 $\triangle$
200 hPa	-0.06	-0.45*	-0.26	$-0.53 \triangle$	0.40*

以上分析表明,华东地区不同区域的夏季降水 异常与不同类型的遥相关可能存在联系。闽赣即江 南南部降水明显地受 EUP 型遥相关影响;江南地 区降水则受 P-J 型影响,亦可能与 PNA 存在联系; 长江流域可能受到 EA 和 EAP 影响,亦与"丝路 型"遥相关存在可能的联系;江淮地区降水则明显 地受到 EA 型和 PJ/EAP 的共同影响,亦与 NAO 存在可能的联系;而黄淮降水则与源于地中海地区 向东北传播且通过 AO 而产生影响的波列存在联 系。同时注意到,除了江南南部降水异常与 500 hPa 东半球热带地区高度场异常联系不清楚外,其 余各区都受到热带地区高度场变化的显著影响。以 上结果说明,华东地区由南向北 5 个不同区域降水 异常形成原因各不相同,反过来亦说明由 REOF 确 定的降水区划是基本合理的。

### 5 结语

通过以上分析,得到:

(1) 华东的降水异常可分为: I 区 (闽赣地区)、 II 区 (江南)、III 区 (长江中下游地区)、IV 区 (江 淮)和 V 区 (黄淮)。I~V 区夏季降水的周期存在 明显的差异,当 I 区降水的年际周期性强 (弱)时, II、III、IV、V 区降水年际周期性弱 (强),各个区 域的降水年际周期不一致。这 5 个区域夏季降水的 年代际及年际变率的年代际变化非常显著,且在年 代际降水较少或由多变少或由少变多的转换时段, 容易发生较大的年际变化。

(2)各区降水异常形成的局地成因有所差别。 其中,江南南部、江南、沿江(长江中下游)受低层 异常反气旋控制,该异常反气旋使得这些地区出现 水汽辐散,与异常的非绝热冷却结合,造成异常下 沉气流,导致干旱发生;而对于江淮之间的地区, 由南侧异常气旋性环流和北侧反气旋环流的西部辐 散气流控制,造成水汽向南北两侧辐散,降水偏 少;对于黄淮地区,则由位于蒙古高原上的反气旋 异常和位于西太平洋上的气旋性异常之间的异常偏 北气流造成该地区水汽的异常辐散所致。

(3) 与各区降水异常形成相联系的遥相关型各 不相同。闽赣地区降水明显地受 EUP 型遥相关影 响; 江南地区降水则可能受 EAP/PJ 型影响,亦与 PNA 型存在可能的联系; 长江流域(沿江)降水可 能受 EA 和 EAP 型影响; 江淮地区降水则显著地 受 EA/EUP 和 PJ/EAP 的共同影响; 而黄淮降水 则受可能起源于地中海地区向东北传播的波列通过 AO 而产生影响。这些说明影响 5 个区域降水异常 的成因各不相同且非常复杂。

(4) 北半球热带地区高度场异常对除江南南部 之外的华东4个区域降水异常存在显著影响;同时 华东夏季降水异常还受到东亚地区位涡、南海夏季 风、Niño3、Niño4 区海温、西太平洋副热带高压变 动等影响。

需要说明的是,(1)本文进行的华东地区5个 区域降水异常的划分在旋转EOF的意义上是相互 独立的,同时降水异常的集中区域由南向北也可能 与华东地区降水由春至夏的季节性由南向北也可能 有关;(2)REOF显示的各区域降水在时间域上存 在多尺度特征,针对各时间尺度的遥相关联系尚不 清楚;(3)在全球变化的背景下,旱涝等高影响气 候事件受到越来越多的关注(Easterling et al., 2000),其中有些是非常极端的气候事件,如何在 本文统计分析的基础上,进一步认识极端降水事件 发生规律,将是值得研究的问题;(4)影响这5个 区域降水的因素非常复杂,除了与闽赣地区、江淮 地区降水异常相联系的遥相关十分清楚外,其他地 区降水的影响关系十分复杂。另外,初步的研究表 明,副高、海温变化与这些区域降水异常亦有显著 联系。与这些联系相关的物理机制尚需未来进一步 研究。

**致谢** 中国气象局气象信息中心以及地球科学部南京大气资料服务中心提供逐日降水资料; NCEP/NCAR 再分析资料取自 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (http://www.cdc.noaa.gov); 文中诸图均用 GrADS (Grid Analysis and Display System)和 NCL (NCAR Command Language)软件绘制。

#### 参考文献 (References)

- 蔡佳熙,管兆勇,高庆九,等. 2009. 近 50 年长江中下游地区夏季
  气温变化与东半球环流异常 [J]. 地理学报,64 (3):289-302.
  Cai Jiaxi, Guan Zhaoyong, Gao Qingjiu, et al. 2009. Summertime temperature variations in the middle and lower Yangtze River and their related circulation anomalies in the Eastern Hemisphere in the past five decades [J]. Acta Geographica Sinica, (in Chinese), 64 (3): 289-302.
- 陈芳丽,黎伟标. 2009. 北半球大气遥相关型冬夏差异及其与温度 场关系的探讨 [J]. 大气科学, 33 (3): 513-523. Chen Fangli, Li Weibiao. 2009. Difference of the atmospheric teleconnection patterns between winter and summer over the Northern Hemisphere and its relation with the air temperature fields [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 513-523.
- 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.
- 陈隆勋,朱乾根,罗会邦,等. 1991. 东亚季风[M]. 北京: 气象出版社, 362pp. Chen Longxun, Zhu Qian'gen, Luo Huibang, et al. 1991. East Asian Monsoon (in Chinese)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 362pp.
- 陈文,顾雷,魏科,等. 2008. 东亚季风系统的动力过程和准定常行 星波活动的研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 950-966. Chen Wen, Gu Lei, Wei Ke, et al. 2008. Studies of the dynamic processes of East Asian monsoon system and the quasi-stationary planetary wave activities [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 950-966.
- Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. 2000. Climate extremes: Observation, modeling, and impacts [J]. Science, 289

(22): 2068-2074.

- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 587: 157-178.
- 符淙斌,曾绍美. 2005. 最近 530 年冬季北大西洋涛动指数与中国 东部夏季旱涝指数之联系 [J]. 科学通报, 50 (14): 1512-1522. Fu Congbin, Zeng Zhaomei. 2005. Correlations between North Atlantic oscillation index in winter and eastern China flood/ drought index in summer in the last 530 years [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (14): 1512-1522.
- 龚道溢,王绍武. 2000. 北大西洋涛动指数的比较及其年代际变率 [J]. 大气科学,24(2):187-192. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 2000. The North Atlantic oscillation index and its interdecadal variability [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24(2):187-192.
- Guan Z Y, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (10): 1544-1547.
- Huang Gang. 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.
- 黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其 物理机制的研究 [J]. 大气科学, 14: 108-117. Huang Ronghui. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and floods in China and their physical mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 14 (1): 108-117.
- 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.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国早涝气候灾害的年代际变 化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30 (5): 730 – 743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecaldal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 730 – 743.
- 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.
- Kosaks Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 182: 2009 – 2030.
- Kurihara K, Kawahara M. 1986. Extremes of East Asian weather during the post ENSO years of 1983/84—Severe cold winter and hot dry summer [J]. Journal of Meteorological Society of Japan,

64: 493-503.

- 李崇银,潘静. 2007. 南海夏季风槽的年际变化和影响研究 [J]. 大 气科学, 31 (6): 1049 - 1058. Li Chongyin, Pan Jing. 2007. The interannual variation of the South China sea summer monsoon trough and its impact [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1049-1058.
- 励申申,寿绍文. 2000. 赤道东太平洋海温与我国江淮流域夏季旱 涝的成因分析 [J]. 应用气象学报,11(3):331-338. Li Shenshen, Shou Shaowen. 2000. Equatorial eastern Pacific SST and analysis on causes of summer flood/droughts in the Changjiang and Huaihe River basin [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorololgy (in Chinese), 11(3):331-338.
- 廖荃荪,陈桂英,陈国珍. 1981. 北半球西风带环流和我国夏季降 水[M]//长期天气预报文集. 北京: 气象出版社, 103-114. Liao Quansun, Chen Guiying, Chen Guozhen. 1981. Westerly circulation of the Northern Hemisphere and the summertime rainfall over China[M] // Long-Term Weather Forecast Documents (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 103-114.
- 廖清海,陶诗言. 2004. 东亚地区夏季大气环流季节循环进程及其 在区域持续性降水异常形成中的作用 [J]. 大气科学,28(6): 835-846. Liao Qinghai, Tao Shiyan. 2004. The seasonal march of atmospheric circulation over East Asia in the late summer and its role in the formation of the regional persistent precipitation anomaly [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(6): 835-846.
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upperlevel meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. Tellus, 54: 44-55.
- Luo H B, Yanai M. 1984. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part II: Heat and moisture budgets [J]. Mon. Wea. Rev., 112: 966-989.
- 吕俊梅, 琚建华, 张庆云, 等. 2006. 热带西太平洋海温距平与 Rossby 波传播对 1993 和 1994 年东亚夏季风异常影响的差异 [J]. 大气科学, 30 (5): 977 - 987. Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. 2006. Differences of influences of tropical western Pacific SST anomaly and Rossby wave propagation on East Asian monsoon in the summers of 1993 and 1994 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 977 - 987.
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. J. Atmos. Sci., 28 (5): 702 - 708.
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40 - 50 day period [J]. J. Atmos. Sci., 29 (6): 1109-1123.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 64: 373-390.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F. 1982. Sampling errors in the

estimation of Empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (7): 699-706.

- Park C K, Schubert S D. 1997. On the nature of the 1994 East Asian summer drought [J]. J. Climate, 10 (5): 1056-1070.
- 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.
- Thompson D W, Wallace J M. 1998. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. Geophys. Res. Lett., 25 (9): 1297-1300.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79 (1): 61-78.
- Wakabayashi S, Kawamura R. 2004. Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82: 1577-1588.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109: 784-812.
- 王永波,施能. 2001. 夏季北大西洋涛动与我国天气气候的关系
  [J]. 气象科学,21(3):271-278. Wang Yongbo, Shi Neng.
  2001. The North Atlantic oscillation in relation to summer weather-climate anomaly in China and East Asian summer monsoon [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 21(3): 271-278.
- 魏凤英,张先恭. 1988. 我国东部夏季雨带类型的划分及预报 [J]. 气象,14(8):15-19. Wei Fengying, Zhang Xiangong. 1988.

The classification and forecasting of summer rain-belt in the east part of China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 14 (8): 15-19.

- 魏凤英. 2005. 中的不同时间尺度的因子在长江中下游夏季降水变 化作用[C]. 中国气象学会 2005 年年会论文集, 1150-1155. Wei Fengying. 2005. The effect of different time scale factors on the summertime rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River [C] // Proceeding of the 2005 Annual Conference of Chinese Meteorological Society (in Chinese), 1150-1155.
- 温克刚. 2008. 中国气象灾害大典(综合卷)[M]. 北京: 气象出版 社, 522 - 655. Wen Kegang. 2008. Series Volumes of China Meteorological Disaster (Comprehensive volume) (in Chinese) [M]. Beijing; China Meteorological Press, 522-655.
- 杨修群,谢倩,黄士松. 1992. 赤道中东太平洋海温和北极海冰与 夏季长江流域旱涝的相关 [J]. 热带气象学报,8(3):261-266. Yang Xiuqun, Xie Qian, Huang Shisong. 1992. Correlations between drought/flood in Yangtze River valley and anomalies of central-eastern equatorial Pacific SST and Arctic sea ice extent [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 8(3): 261-266.
- 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.
- 张庆云,陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大 气环流特征 [J]. 大气科学, 27 (3): 369-380. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. The anomalous subtropical anticyclone in Western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (3): 369-380.