

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.

# 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

贾燕 管兆勇

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

**摘 要** 利用 1978~2007 年 NCEP/NCAR 再分析资料和地面观测站降水资料, 研究了夏季江淮流域降水多寡与 30~60 天振荡 (ISO) 强度年际变化的联系。结果表明: 江淮流域夏季降水异常与台湾海峡地区及西北太平洋低频能量变化相关显著。定义了 ISO 强度指数, 对 ISO 强度指数高低年夏季低频降水以及低频环流的位相合成表明: 高指数年主要通过存在于南海—西北太平洋地区的低频气旋、反气旋系统的交替活动来影响副热带高压的进退, 从而引起江淮流域夏季降水异常; 低指数年江淮流域夏季降水主要受西太平洋副热带高压位置及强度变化的影响, 降水异常区主要位于江南地区。进一步研究表明, 非 30~60 天低频降水扰动与低频振荡强度也有很好的相关。低频环流对双周以及天气时间尺度环流变化可能存在调制作用, 这种作用对江淮流域夏季降水的年际异常起到非常重要的作用。

**关键词** 30~60 天振荡强度 年际变化 降水异常 长江淮河流域 北半球夏季

**文章编号** 1006-9895 (2010) 04-0691-12

**中图分类号** P461

**文献标识码** A

## 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

JIA Yan and GUAN Zhaoyong

*Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, and School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

**Abstract** Using the NCEP/NCAR reanalysis and in situ precipitation data from 1978 to 2007, the authors have investigated the associations of the interannual variability of 30–60-day intraseasonal oscillation (ISO) intensity with rainfall in the Changjiang-Huaihe River valley. The results demonstrate that the summer rainfall anomalies over the Changjiang-Huaihe River valley are significantly correlated with the changes of intensity of low-frequency oscillations in regions around the Taiwan Strait and the northwestern Pacific. An intensity index of the 30–60-day intraseasonal oscillations is defined to further examine the relationships of ISO with rainfall in eastern China. The phase composites of the low-frequency precipitation and circulation for the high-index years show that the cyclone and anticyclone appear alternatively in the northwestern Pacific, inducing the advancing or retreating of the subtropical high, and

**收稿日期** 2009-08-10, 2010-02-01 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展计划项目 2006CB403602, 国家科技支撑计划 2009BAC51B01

**作者简介** 贾燕, 女, 1984 年出生, 硕士研究生, 主要从事季风动力学方面的研究。E-mail: jy1984\_914@163.com

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

henceforth leading to the rainfall anomalies over the Changjiang-Huaihe River valley. In the low-index years, the rainfall over the Changjiang-Huaihe River valley is affected by changes of location and intensity of the western Pacific subtropical high on the intraseasonal time scale. However, precipitation anomalies in the low index years occur largely to the south of the Changjiang River valley other than in the Changjiang-Huaihe River valley. Further examinations have been carried out for both the non-30 – 60-day precipitation and intensity of 30 – 60-day oscillations, showing high correlations between them as expected. Nevertheless, both synoptic and biweekly perturbations in rainfall are possibly modulated by 30 – 60-day oscillations, which play very important roles in the interannual anomalies of rainfall over the Changjiang-Huaihe River valley.

**Key words** intensity of 30 – 60-day oscillation, interannual variability, precipitation anomaly, the Changjiang-Huaihe River valley, boreal summer

## 1 引言

1971 年, Madden and Julian (1971) 利用 1957 ~ 1967 年坎顿岛的观测资料, 通过谱分析方法首先发现热带大气纬向风和气压场存在 40 ~ 50 天周期的低频振荡 (ISO), 且他们的进一步分析 (Madden and Julian, 1972) 证实了全球热带地区均存在 40 ~ 50 天振荡。Krisnamurti and Subrahmanyam (1982) 分析了 MONEX 资料, 指出南亚季风槽的活动存在着 30 ~ 50 天振荡, 而且这种振荡有缓慢向北传播的特征, 且认为夏季风的爆发、活跃和中断与 ISO 有关。自那时起, 人们广泛地研究低频振荡的形成、传播等规律, 大气准 40 天振荡 (或季节内振荡) 已成为大气科学重要的前沿研究领域。

研究表明, 大气季节内振荡 (ISO) 的位相、周期和强度均具有明显的年际变化。李崇银 (1995) 利用 ECMWF 资料 (1981 ~ 1988 年) 计算了热带 ( $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$ ) 大气 30 ~ 60 天振荡纬向风平方值 (相当于动能) 的时间变化, 发现其有极显著的年际变化。管兆勇和赵辉 (1995) 提出在低纬度地区, 各年季节内振荡的初位相不同。Hendon and Glick (1997) 和 Slingo et al. (1999) 的研究也指出, 热带大气季节内振荡存在显著的年际变化。董敏和李崇银 (2007) 指出大气季节内振荡存在年际变化, 季节内振荡各种尺度的变化还需进一步研究。Salby and Hendon (1994) 指出热带大气低频振荡的强度具有年际变化。Chen et al. (2001) 指出大气季节内振荡强度具有很强的年际变化, 而这种年际变化也具有显著的全球同步特性。李丽平等 (2009) 采用外逸长波辐射 (OLR) 能量定义 ISO 强度, 指出热带印度洋区域和热带西太平洋区域常年存在强的 ISO 活动, 而 ISO 强度年际异常显著的

区域是热带中东太平洋区域、西北、西南太平洋区域, 热带西太平洋区域的显著性稍弱。

就 ISO 强度的年际变化而言, 其成因并不十分清楚。陈隆勋等 (1987) 利用 8 年 OLR 资料讨论了 El Niño 前后低频波活动规律的变化, 指出低频波的强度和活动特点有很大的年际差异。Lau and Chan (1988)、Lim et al. (1991) 和 Bladé and Hartmann (1993) 则认为, 纬向风的垂直切变以及非绝热加热的水平和垂直分布可能是造成热带大气低频振荡强度年际变化的原因。Salby and Hendon (1994) 和李崇银 (1995)、李崇银等 (2003) 的研究指出, 热带大气低频振荡的强度年际变化与 El Niño 有密切的关系。管兆勇和朱乾根 (1996) 通过 30 ~ 60 天模的分析指出, 暖池海温异常可引起低频振荡的空间型及时间位相上的很大差别。Hendon and Glick (1997) 和 Slingo et al. (1999) 则认为热带 ISO 与海温之间呈现弱的、不显著的相关。龙振夏和李崇银 (2001) 分析指出, 东亚冬季风年际变化是造成赤道西太平洋大气 30 ~ 60 天振荡年际变化的重要原因。

大气季节内振荡强度变化和传播方向与江淮流域旱涝气候异常有很密切的联系。周静亚等 (1986) 指出, 一般旱年低频振荡周期长于涝年。Yang and Li (2003) 研究了我国江淮流域夏季严重旱涝与大气低频振荡的关系, 发现在严重涝年夏季降水的低频振荡强度明显强于严重旱年。琚建华等 (2005)、琚建华和赵而旭 (2005) 指出, 东亚强季风涌年准 30 ~ 60 天振荡的影响显著, 容易造成长江中下游多雨; 东亚弱季风涌年准 30 ~ 60 天振荡减弱, 10 ~ 20 天低频振荡为主要的振荡周期, 容易造成长江中下游干旱。太平洋上 ISO 向西传播的强或弱是东亚夏季风区降水偏多或偏少的重要条

件。韩荣青等(2006)对逐年东亚夏季风的分析表明,在所划分的几个东亚季风区所有涝的年份里,太平洋同一纬带上大气 ISO 向西传播都明显较强,而在这些区域绝大多数旱的年份里,相应的 ISO 向西传播明显较弱。

总之,ISO 强度存在显著的年际变化。然而,尽管人们已注意到低频振荡强度年际变化与东亚季风区旱涝存在关联,但是对江淮地区降水年际变化而言,ISO 强度的年际变化具有什么样的特征,目前还不是非常清楚。本文将在前人研究的基础上,通过研究大气低频振荡强度年际变化特征,找出低频振荡强度年际变化与江淮流域降水的联系,为认识江淮流域降水年际变化规律及预测寻找线索。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

采用水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  的 NCEP/NCAR 再分析 850 hPa 风场资料(Kalnay et al., 1996)和 CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) 月平均降水的格点资料(Xie and Arkin, 1995),以及中国国家气候中心提供的 160 站月平均降水资料和 743 站的逐日降水资料(考虑站点的迁移、缺测等原因选取了其中 555 站)。所有变量的时间序列长度均为 1978~2007 年共 30 年。

### 2.2 方法

采用 Lanczos 滤波器(Duchon, 1979; 姚菊香等, 2005)对逐日资料进行低频带通滤波,滤波器参数  $n=182$  d。用 30~60 天的低频滤波器滤波后,将所用时间序列截取为 1979~2006 年每年夏季共 92 天(6 月 1 日~8 月 31 日)。下文所指的 ISO 和低频振荡均指 30~60 天振荡。

## 3 江淮流域降水与大气低频振荡强度年际变化的联系

### 3.1 降水与低频流函数方差

可采用物理量的季节内振荡的方差来表示季节内振荡强度(杨艳娟等, 2007)。本文所定义的夏季大气低频振荡(ISO)的强度用低频流函数的逐日方差的夏季平均( $\overline{\psi'^2_{ISO}}$ )来表示。图 1 给出了 1979~2006 年江淮夏季平均(6~8 月)降水与夏季低频流函数方差的相关分布。这里江淮区域( $28^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$ )降水时间序列资料分别采用了 160 站月平均降水资料中的江淮地区 24 个测站的夏季降水,以及 CMAP 月平均降水格点资料,这两种资料的总体区域范围保持一致,均在( $28^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$ )之内取区域平均值。由图 1a、b 皆可见在台湾海峡地区( $21^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$ ,  $115^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$ ) (简称 A 区域)及西北太平洋副热

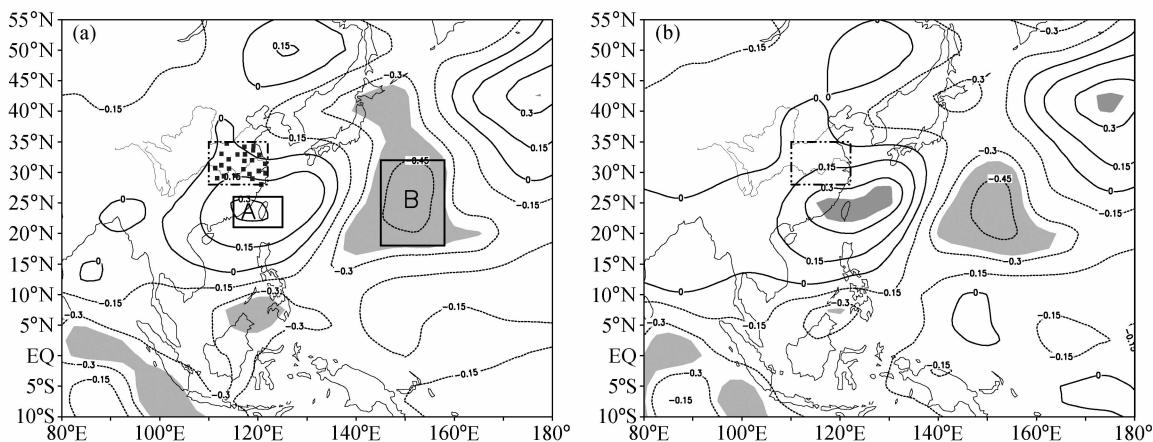


图 1 1979~2006 年江淮夏季平均降水异常与低频流函数方差的相关: (a) 160 站降水资料; (b) CMAP 资料。阴影: 通过信度大于等于 90% 的  $t$  检验(下同); 虚线方框: 江淮区域(实心方块为所选的 24 个测站); 实线方框: A、B 关键区

Fig. 1 Correlations between the summer time rainfall anomalies and variance of the low-frequency stream function for the period of 1979 - 2006: (a) Rainfall data from 160 stations; (b) data from CMAP. Shaded areas show values above 90% confidence level (similarly hereinafter). Dashed rectangle: the Changjiang-Huaihe River valley (the square dots show the locations of 24 observation stations); solid rectangles: key regions A and B defining the ISO intensity index, which are located geographically in the Taiwan Strait and the northwestern Pacific, respectively

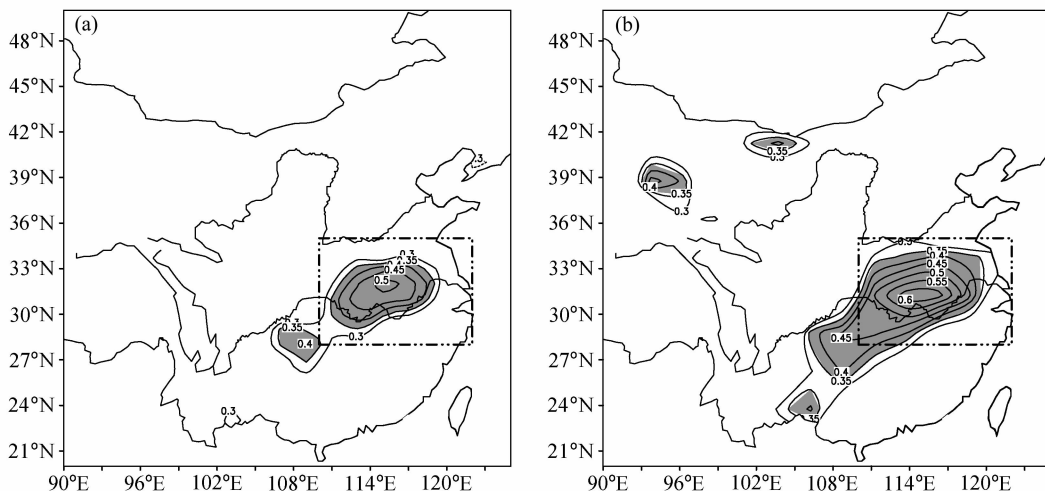


图2 1979~2006年夏季ISO强度指数与中国夏季降水的相关分布(未画相关系数绝对值小于0.3的等值线): (a) 160站降水资料; (b) CMAP资料

Fig. 2 Correlations between summer ISO intensity index and the rainfall in China from 1979 to 2006 (the absolute values less than 0.3 not shown): (a) Rainfall data from 160 stations; (b) data from CMAP

带地区(18°N~32°N, 145°E~158°E)(简称B区域)有一对正负中心。对比两图,江淮流域夏季降水与西北太平洋副热带地区的夏季ISO强度成反相关,相关系数可达-0.45及以上。可见,西北太平洋副热带地区的ISO活动对江淮流域夏季降水的年际变化有很好的关联。西北太平洋副热带地区夏季ISO强(弱),则江淮流域夏季降水少(多)。此外,台湾海峡地区夏季ISO强度与江淮流域降水成正相关,即台湾海峡地区夏季ISO强(弱),则江淮流域夏季降水多(少)。

### 3.2 夏季ISO强度指数与中国夏季降水的相关

依据江淮降水与 $\overline{\psi'^2_{\text{ISO}}}$ 的高相关来选取关键区(见图1a中实线方框区域),定义夏季ISO强度指数。将正相关区即台湾海峡地区的1979~2006年低频流函数逐日方差的夏季平均( $\overline{\psi'^2_{\text{ISO}}}$ )减去负相关区即西北太平洋副热带地区的相应年份低频流函数逐日方差的夏季平均( $\overline{\psi'^2_{\text{ISO}}}$ ),可得到一个时间序列长28年的夏季ISO强度指数,即:

$$I_{\text{ISO}} = \overline{\psi'^2_{\text{BoxA}}} - \overline{\psi'^2_{\text{BoxB}}}, \quad (1)$$

式中, $I_{\text{ISO}}$ 为夏季ISO强度指数, $\overline{\psi'^2_{\text{BoxA}}}$ 为区域A的低频流函数逐日方差的夏季平均, $\overline{\psi'^2_{\text{BoxB}}}$ 为区域B的低频流函数逐日方差的夏季平均。

由1979~2006年夏季ISO强度指数与中国夏季降水的相关分布(图2给出),可见所定义的ISO强度指数与江淮流域夏季降水有很好的正相关,在

江淮流域的相关系数高达0.5(图2a)甚至0.6(图2b)。此说明用所选择关键区来定义ISO强度指数,对江淮流域夏季降水异常有很好的表达能力。

为了进一步显示ISO强度与江淮降水年际异常的关系,给出江淮降水与ISO强度指数曲线(图3)。1979~2006年夏季ISO强度指数与夏季江淮流域降水的曲线显示出很好的吻合度。 $I_{\text{ISO}}$ 与160站资料的夏季江淮区域降水的相关系数高达0.655,而 $I_{\text{ISO}}$ 与CMAP格点资料的夏季江淮区域降水的年际变化曲线也有很好的一致性,其相关系数高达0.674。由图3中也可以看出,两种降水资料反映的江淮流域的夏季降水具有很好的相关性,站点降水的时间曲线与格点降水的时间曲线变化趋势基本一致,两者的相关可达0.932。

为了弄清长江流域夏季降水异常与西北太平洋区域低频振荡强度之间的物理联系,采用合成方法对环流及降水场进行分析。首先将针对ISO强年和弱年分析低频降水及与低频环流的联系,其次分析非ISO降水与 $I_{\text{ISO}}$ 的关系。

## 4 低频降水及低频环流特征

取标准化后的 $I_{\text{ISO}}$ 值大于0.75的年份(图3)定为高指数年(对应降水偏多年),小于-0.75的年份为低指数年(对应降水偏少年),则高指数年有1980、1991、1996、2002、2005年,低指数年有

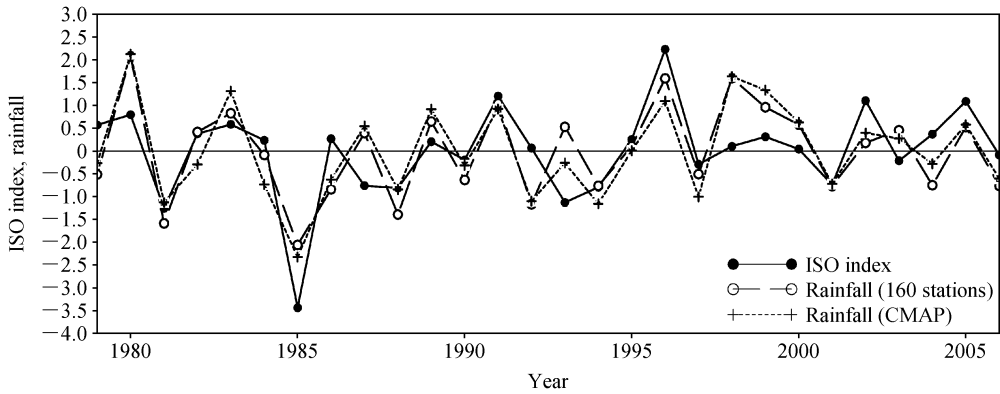


图 3 1979~2006 年夏季 ISO 强度指数与夏季江淮流域降水标准化时间序列

Fig. 3 Normalized time series of summer ISO intensity index and rainfall over the Changjiang-Huaihe River valley for the period of 1979–2006

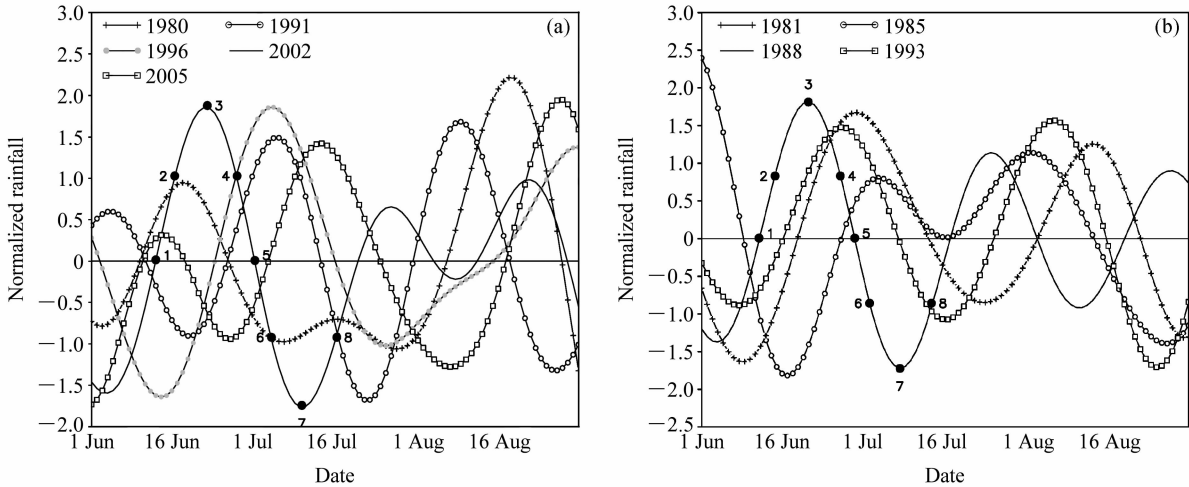


图 4 高指数年 (a) 及低指数年 (b) 江淮区域夏季低频降水 (时间序列均已标准化)。黑点为各年所取的 8 个位相

Fig. 4 Normalized time series of ISO of summer precipitation over the Changjiang-Huaihe River valley in (a) high-index years and (b) low-index years. Black dots represent the eight phase points designated in a whole cycle of ISO

表 1 降水异常年份第 1 位相开始的时间

Table 1 The beginning time of the first phase in years of anomalous rainfall occurrences

| 高指数年 | 第 1 位相时间 | 低指数年 | 第 1 位相时间 |
|------|----------|------|----------|
| 1980 | 第 10 天   | 1981 | 第 19 天   |
| 1991 | 第 26 天   | 1985 | 第 27 天   |
| 1996 | 第 24 天   | 1988 | 第 11 天   |
| 2002 | 第 13 天   | 1993 | 第 16 天   |
| 2005 | 第 34 天   |      |          |

1981、1985、1988、1993 年。为了弄清高低指数年低频降水变化特征及其成因, 参照毛江玉和吴国雄 (2005)、夏芸等 (2008) 的方法, 分别选取了高低指数年低频降水的 8 个位相 (如图 4a、b), 对高

低指数年的夏季低频降水和夏季低频流函数进行位相合成。其中 1、5 为转换位相, 位相 1 表示振荡由降水中断期向活跃期的过渡, 位相 5 与位相 1 相反, 表示振荡由降水活跃期向中断期的过渡; 位相 3 表示活跃期的波峰, 位相 7 表示中断期的波谷; 而位相 2、4、6、8 表示低频振荡的振幅值达到该循环的最大值或最小值一半的时间。表 1 给出了高低指数年所选择的 8 个位相的第 1 位相开始的时间, 其中高指数年强降水开始的时间平均为第 21 天, 低指数年强降水开始的时间平均为第 19 天。这里低频降水资料采用的是经 30~60 天滤波后的 1979~2006 年中国 555 站日平均夏季降水资料。

由图 4 也可看出, 低频振荡存在显著的年际变

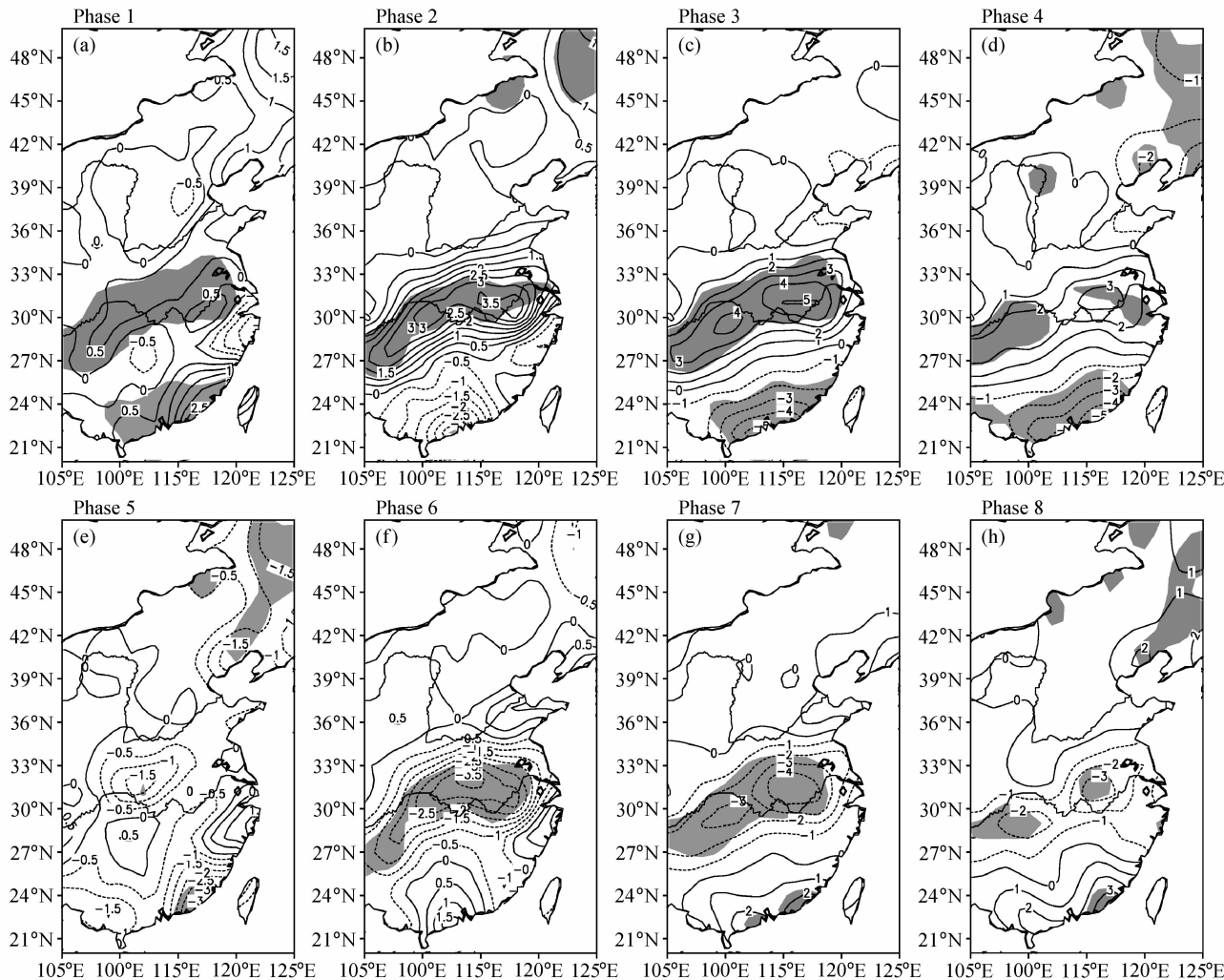
化。尽管多年平均的逐日资料中由于一定程度的锁相仍存在一定的低频分量(管兆勇和赵辉, 1995), 但 ISO 的位相的年际差别是很大的, 为了对  $I_{ISO}$  强、弱年低频变化进行有效合成, 需针对各年相同的位相进行, 如表 1, 每年第 1 位相所处不同日期, 因而合成时针对这些日期进行。

4.1 高指数年低频降水与低频环流位相合成

高指数年夏季低频降水 8 个位相的合成见图 5。位相 1 显示通过显著性检验的夏季低频降水主要位于江淮流域以及华南两广地区, 江淮降水较少; 到位相 2 时江淮流域降水得到明显加强; 位相 3 时高指数年合成的江淮夏季低频降水达到最强, 并且都能通过 90% 信度的  $t$  检验, 通过检验的区域较第 1、第 2 位相也大致不变; 到位相 4 时, 江淮流域的降水开始减少, 通过显著性检验的区域也开始

缩小; 从位相 5 时, 江淮流域降水开始出现负值, 表明江淮降水较正常时期偏少; 位相 6 时江淮低频降水进一步减弱; 到位相 7 时高指数年合成的江淮夏季低频降水达到最弱; 位相 8 中, 江淮流域夏季降水较位相 7 开始出现加强。如此, 夏季江淮流域低频降水完成一个低频降水循环。此外, 还可以发现华南两广地区的高指数年合成的夏季低频降水与江淮流域夏季低频降水的位相变化趋势存在落后一个位相反向变化的现象, 如当江淮流域低频降水在位相 3 达最强时, 相应华南两广地区在位相 4 达到最弱。这种变化在各不同位相上表现出的特征非常类似于季节平均三类雨型的“+ - +”雨型(严华生等, 2007)。

为了弄清高指数年低频降水变化的成因, 需对环流进行分析。图 6 给出的是高指数年夏季低频流



函数及低频流函数风场的位相合成, 其位相合成的相应时间与图 5 中保持一致。

从 1~4 位相来看, 我国南海—西北太平洋副热带地区主要是受一个反气旋环流的控制, 这是利于副高偏南偏西的阶段。位相 1 显示在南海—西北太平洋地区有一个较强的异常反气旋。江淮流域主要受到南海—西北太平洋地区的反气旋的西南气流的控制。位相 2 时, 南海—西北太平洋地区的反气旋明显西伸加强, 控制江淮流域的西南气流也得到加强; 西太平洋开始出现很明显的闭合气旋式环流。在极端活跃位相, 即位相 3 时南海—西北太平洋地区反气旋在原来西伸的基础上稍有北抬, 强度达到最强。江淮地区处于南北两个低频反气旋之间的切变区; 同时受到南边反气旋前部的暖湿西南气流的影响, 大量水汽向江淮地区输送, 为江淮流域降水提供了充足的水汽条件, 对应图 5 中第 3 位相的最大降水。

需要注意的是, 从第 1 位相开始, 西北太平洋地区的闭合气旋式环流进一步发展, 并且随着反气旋的西伸也向西移动。从位相 4 开始, 南海—西北太平洋地区的反气旋在进一步西伸的基础上强度明显地减弱, 反气旋前部西南气流向江淮流域的输送也明显减弱, 低频降水开始减少; 而其东侧的气旋开始西伸加强。

从 5~8 位相来看, 我国南海—西北太平洋副热带地区主要是受一个气旋系统的控制。由降水活跃期向中断期过渡 (位相 5), 环流形势几乎与位相 1 相反。此时, 南海—西北太平洋地区已完全由西伸过来的气旋系统控制, 江淮流域则受其前部的东北气流控制。位相 6 时该气旋西伸加强, 其东侧则出现一个较弱反气旋环流中心。至位相 7 时, 该气旋进一步西伸北抬, 强度达到最大, 江淮流域受气旋前部强大的西北气流的控制, 同时气旋后部的东南气流的向北输送也影响到江淮区域。位相 8 时, 南海—西北太平洋地区的气旋开始减弱, 范围缩小, 其东侧的反气旋开始西伸加强。

综上所述, 大气低频振荡以异常反气旋、气旋在南海—西北太平洋地区交替出现的形式, 控制西太平洋副高的西伸与东退, 从而影响江淮流域降水的强弱变化 (夏芸等, 2008)。合成后的低频环流形势能够较好地解释合成后低频降水的分布形势。在 ISO 强年, 低频降水的演变与大气低频环流的演

变具有很好的同步特性。

## 4.2 低指数年低频降水与低频环流位相合成

图 7 给出了低指数年夏季低频降水的位相合成。由过渡位相 (位相 1) 到活跃期的波峰 (位相 3), 江淮流域的降水逐渐增大至最大, 从位相 4 开始减少, 至中断期的波谷 (位相 7) 达到最少, 位相 8 开始出现增大趋势。对比高低指数年低频降水的位相合成可以发现, 低指数年通过显著性检验的低频降水分布主要集中在长江以南, 并且区域范围也较小。如果对照三种雨型分布 (严华生等, 2007), 这种低频降水的分布型显得很复杂。有些位相与“+ - +”雨型相似, 但降水的位置偏南, 有些又与“+ -”雨型相似。

同样, 进行低指数年夏季低频流函数及相应的无辐散风场的位相合成 (图略), 位相合成时间与低指数年低频降水的位相合成时间保持一致。1~4 位相显示在西北太平洋副热带地区洋面上有一反气旋环流系统, 江南地区降水主要受前部的西南气流影响。5~8 位相主要是异常反气旋系统的西伸减弱, 对江南地区降水影响越来越小的过程。

对比高低指数年的低频环流特征, 低指数年的低频环流系统交替出现的现象不是很明显, 降水集中的江南地区主要是受西太平洋副热带高压位置西伸的影响; 而从高指数年低频环流的位相合成可以清楚地看出, 低频波列由东北向西南移动, 气旋、反气旋系统交替影响副热带高压的进退, 从而影响江淮流域降水。刘富明和林海 (1990) 就曾提出西太平洋副热带高压存在低频振荡, 也是向西传播的, 这种副热带高压的向西传播对长江流域的降水有很大影响。陆尔和丁一汇 (1996) 指出, 低频波的西传可将热带西太平洋上的水汽以低频形式输送到江淮地区。此外还可以发现, 高指数年副高西伸要比低指数年明显, 这与前人所得结论一致 (韩荣青等, 2006)。

以上对高低指数年夏季低频降水序列 (图 4) 的第 1 波的 8 个位相分别进行低频降水和低频环流的合成分析, 为了更有力地说明这种特征分布, 对第 2 波做同样的分析。由于某些年份夏季低频降水序列的第 2 波不能取到完整的 8 个位相, 因此只对第 2 波前 4 个位相进行低频降水以及低频环流的位相合成分析 (图略), 其结果与第 1 波所得的结论基本一致。



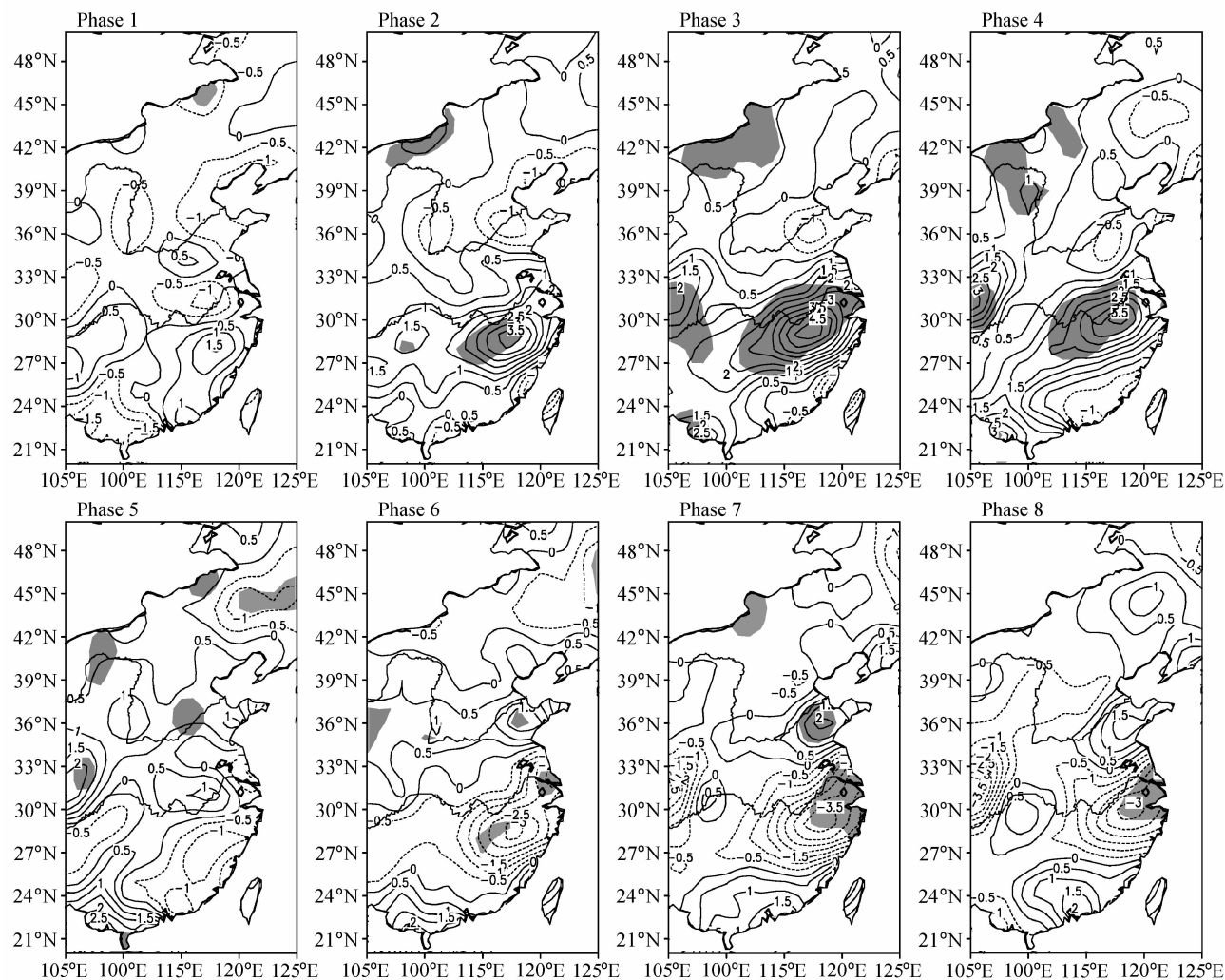


图 7 同图 5，但为低指数年  
Fig. 7 Same as in Fig. 5, but for low-index years

## 5 非 30~60 天低频降水与低频振荡强度的关系

研究表明，低频时间尺度（30~60 天）上的降水尽管很重要，但在江淮流域或长江流域夏季的降水变化的总方差中仅有 15% 左右的贡献（夏芸等，2008）。而前述低频振荡强度与江淮降水年际异常却有很高的相关，这就使得我们需要了解 ISO 强度的年际变化在整个夏季降水的年际异常中所起的重要作用。要弄清这一问题，我们首先检查低频降水的方差与 ISO 强度的关系。图 8 给出 1979~2006 年江淮流域夏季低频降水强度与  $I_{ISO}$  的相关，两者的相关系数为 0.368。显然，这是我们能够期望的结果。然而我们注意到，除了降水的低频方差占降

水总方差较小（夏芸等，2008）外，ISO 强度与低频降水强度的相关并不是非常高。那么 ISO 强度与江淮流域降水年际异常的高相关如何解释？毫无疑问，这必须由非 30~60 天降水扰动所产生的贡献来解释。

由逐日降水序列可获得各时间尺度上的扰动分量，即：扣除夏季 92 天平均值后，又扣除 30~60 天分量，再进行 7 天滑动平均，可得到 1 周及以上，以及 1 周以下的降水扰动分量。

夏季平均降水的形成来自于多种时间尺度的降水贡献，其中 7 天以内的天气、准双周振荡贡献较大（夏芸，2007）。吴伟杰等（2006）指出在气候平均意义下，天气尺度（2.5~6 天）波动活动量在 6、8 月较大。王遵娅和丁一汇（2008）研究指出气候

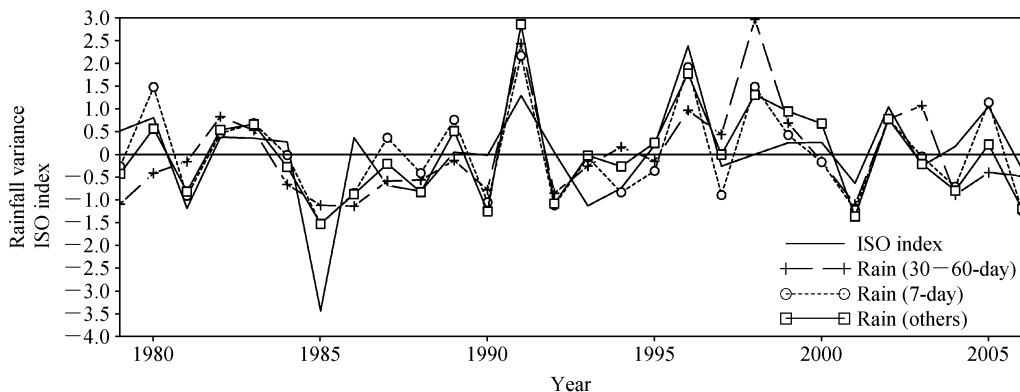


图8 1979~2006年夏季江淮流域降水方差与 $I_{ISO}$ 的标准化时间序列

Fig. 8 Normalized time series of summertime ISO intensity index and rainfall variance on different timescales over the Changjiang-Huaihe River valley for the period of 1979–2006

雨量时间序列的高频振荡分量比低频振荡分量所占比重要大。我们计算了7天以内时间尺度的降水和除去7天和30~60天扰动的其他时间尺度上的降水扰动的方差(图8),发现不论是天气还是其他扰动,其时间序列的变化与 $I_{ISO}$ 非常一致,与 $I_{ISO}$ 均具有显著的高相关,相关系数均在0.6以上,其中7天以内时间尺度降水方差与 $I_{ISO}$ 的相关系数为0.678,其他时间尺度降水方差与 $I_{ISO}$ 的相关系数为0.649。这是非常有意义的结果。因为30~60天降水振荡对降水变率的贡献并不是很高(夏芸等,2008),尽管可由低频环流直接解释(线性理论),但 $I_{ISO}$ 与夏季平均降水年际变化的高相关(0.655,图3)是难以解释的。然而,当 $I_{ISO}$ 与7天及以内天气时间尺度或与除了天气和30~60天低频尺度之外的时间尺度上的降水扰动强度的年际变化存在高相关时,我们可以认为,发生在西北太平洋—南海地区的30~60天振荡为天气和小于30~60天时间尺度降水的发生提供了合适的环流背景。以1991年江淮降水为例,7天以内的天气尺度降水以及大于7天的非30~60天低频降水与ISO降水变化具有很好的一致性(图略)。另一方面,季节平均降水的年际异常与 $I_{ISO}$ 的高相关也显示出季节平均的环流异常亦为30~60天振荡及其强度的年际变化提供了合适的环流背景。王遵娅和丁一汇(2008)的研究表明,30~60天周期作为季节内振荡中一个主要分量对长江流域降水有重要的调制作用,这种调制作用主要体现在对降水加强振幅,使雨季出现活跃、中断、再活跃的循环变化,其可能是制约季节性雨带爆发、活跃、减弱、再活跃的一种内部

机制。

## 6 结论

经上列分析,得到下列结论:

(1) 江淮流域夏季降水异常与南海—西北太平洋副热带地区30~60天ISO强度异常具有密切联系。台湾海峡地区ISO强(弱),江淮流域夏季降水偏强(弱);西北太平洋副热带地区ISO强(弱),则江淮夏季降水偏弱(强)。由这两个区域定义的夏季ISO强度指数与江淮流域夏季降水有很好的正相关关系。

(2) ISO高低指数年夏季低频降水以及低频环流的位相合成表明:高指数年存在于南海—西北太平洋地区的低频气旋、反气旋系统的交替活动,可影响江淮流域夏季降水过程。低指数年江淮流域夏季降水主要是受西太平洋副热带高压位置西伸、东退的影响。高指数年低频环流的位相合成与低频降水水位相合成的同步性要好于低指数年。

(3) 季节平均、季节内振荡、天气时间尺度扰动等多尺度相互作用,尤其是低频环流对双周以及天气时间尺度环流变化可能存在调制作用。30~60天ISO强度与夏季平均降水异常、与7天以下时间尺度降水扰动强度的年际异常以及与大于7天但非30~60天降水扰动强度的年际异常的高相关说明,这种调制作用对江淮流域降水的年际异常起到非常重要的作用。

要说明的是,ISO强度的变化亦与低频强迫和其他时间尺度相互作用有关(管兆勇和徐建军,1994),但由于非线性相互作用非常复杂,关于

30~60 天振荡与其他时间尺度相互作用仍需进一步研究。

**致谢** NCEP/NCAR 再分析资料取自 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (<http://www.cdc.noaa.gov>)；地球科学部南京大气资料服务中心(南京信息工程大学)提供了资料服务；文中诸图均用 GrADS 软件绘制。

## 参考文献 (References)

Bladé I, Hartmann D L. 1993. Tropical intraseasonal oscillations in a simple nonlinear model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50: 2922–2939.

陈隆勋, 谢安, Murakami Takio. 1987. OLR 资料所揭示的 El Niño 和 30~60 天振荡之间的关系 [M]//气象科技文集. 北京: 气象出版社, 26–35.

Chen L X, Xie A, Murakami T. 1987. The relationship of El Niño and 30–60 day oscillation disclosed by OLR data [M]//Atmosphere Science and Technology Corpus (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 26–35.

Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18 (8): 1016–1022.

Chen X Y, Wang H J, Xue F. 2001. Intraseasonal oscillation: The global coincidence and its relationship with ENSO Cycle [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (3): 445–453.

董敏, 李崇银. 2007. 热带季节内振荡模拟研究的若干进展 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1113–1122.

Dong M, Li C Y. 2007. Some progress in the simulation study of the intraseasonal oscillation of the tropical atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1113–1122.

管兆勇, 徐建军. 1994. 扰动间相互作用、通量矢量和流动的低频加速 [J]. *热带气象学报*, 10 (1): 47–56.

Guan Z Y, Xu J J. 1994. The interactions between disturbances, flux vectors and low frequency acceleration of airflow [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 10 (1): 47–56.

管兆勇, 赵辉. 1995. 夏季多年平均及个别年份低层流场的准周期扰动分析 [J]. *南京气象学院学报*, 18 (4): 518–522.

Guan Z Y, Zhao H. 1995. Analysis of quasi-periodic disturbance of summer low-level flow field with ECMWF long-term mean and 1980 data [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 18 (4): 518–522.

管兆勇, 朱乾根. 1996. 暖池区海温异常影响夏季大气环流低频变化的数值试验个例分析 [J]. *南京气象学院学报*, 19 (2): 151–159.

Guan Z Y, Zhu Q G. 1996. Numerical study on warming pool SSTA influence on general circulation LFO in summer [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 19 (2): 151–159.

韩荣青, 李维京, 董敏. 2006. 北半球副热带中纬度太平洋大气季节内扰动的纬向传播与东亚夏季旱涝 [J]. *气象学报*, 64 (2): 149–163.

Han R J, Li W J, Dong M. 2006. The impact of 30–60 day oscillations over the subtropical Pacific on the East Asian summer rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (2): 149–163.

Hendon H H, Glick J. 1997. Intraseasonal air–sea interaction in the tropical Indian and Pacific oceans [J]. *J. Climate*, 10 (4): 647–661.

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 J H, Qian C, Cao J. 2005. The intraseasonal oscillation of East Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (2): 187–194.

据建华, 赵而旭. 2005. 东亚夏季风区的低频振荡对长江中下游旱涝的影响 [J]. *热带气象学报*, 21 (2): 163–171.

Ju J H, Zhao E X. 2005. Impacts of the low frequency oscillation in East Asian summer monsoon on the drought and flooding in the middle and lower valley of the Yangzi River [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21 (2): 163–171.

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.

Krishnamurti T N, Subrahmanyam D. 1982. The 30–50 day mode at 850 mb during MONEX [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39: 2088–2095.

Lau K M, Chan P H. 1988. Intraseasonal and interannual variations of tropical convection: A possible link between the 40–50 day oscillation and ENSO? [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 506–521.

李崇银. 1995. 热带大气季节内振荡的几个基本问题 [J]. *热带气象学报*, 11 (3): 276–288.

Li C Y. 1995. Some fundamental problems of interseasonal oscillation in the tropical atmosphere [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 11 (3): 276–288.

李崇银, 龙振夏, 穆明权. 2003. 大气季节内振荡及其重要性 [J]. *大气科学*, 27 (4): 518–535.

Li C Y, Long Z X, Mu M Q. 2003. Atmospheric intraseasonal oscillation and its important effect [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 518–535.

李丽平, 王盘兴, 管兆勇. 2009. 热带对流和环流季内振荡强度与海表温度关系对比研究 [J]. *大气科学*, 33 (4): 771–782.

Li L P, Wang P X, Guan Z Y. 2009. The comparison between relationships of intraseasonal oscillation intensity of tropical convection and circulation with sea surface temperature [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 19 (2): 145–152.

Lim H, Chang C P, Lim T K. 1991. Vertical wind shear effects on Kelvin wave-CISK modes: Possible relevance to 30–60 day oscillations [J]. *Terr. Atmos. and Oceanic Sci.*, 2: 203–216.

刘富明, 林海. 1990. 西太平洋地区低频振荡特征及其同副高、台风关系的探讨 [J]. *气象学报*, 48 (3): 303–317.

Liu F M, Lin H. 1990. A study on the characteristics of the low-frequency oscillation over West Pacific and its relations with subtropical high and typhoons [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 48 (3): 303–317.

龙振夏, 李崇银. 2001. 热带低层大气 30~60 天低频动能的年际变化与 ENSO 循环 [J]. *大气科学*, 25 (6): 798–808.

Long Z X, Li C Y. 2001. Interannual variability of 30–60 day low-frequency kinetic energy in the lower tropical atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (6): 798–808.

- 陆尔, 丁一汇. 1996. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡 [J]. 气象学报, 54 (6): 730–736. Lu E, Ding Y H. 1996. Low frequency oscillation in East Asia during the 1991 excessively heavy rain over Changjiang-Huaihe River basin [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 54 (6): 730–736.
- 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: 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: 1109–1123.
- 毛江玉, 吴国雄. 2005. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡 [J]. 气象学报, 63 (5): 762–770. Mao J Y, Wu G X. 2005. Intraseasonal variability in the Yangtze–Huaihe River rainfall and subtropical high during the 1991 Meiyu period [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 63 (5): 762–770.
- Salby M L, Hendon H H. 1994. Intraseasonal behavior of clouds, temperature and motion in the tropics [J]. J. Atmos. Sci., 51: 2207–2224.
- Slingo J M, Rowell D P, Speber K R, et al. 1999. On the predictability of the interannual behavior of the Madden-Julian oscillation and its relationship with El Niño [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 125: 583–609.
- 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 Z Y, Ding Y H. 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (1): 1–13.
- 吴伟杰, 何金海, Chung Hyo-Sang, 等. 2006. 夏季东亚高空急流与天气尺度波动的气候特征之间的联系 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 525–524. Wu W J, He J H, Chung H S, et al. 2006. The relationship between the East Asia up-tropospheric jet stream in summer and climatic characteristics of synoptic-scale disturbance [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (4): 525–524.
- 夏芸. 2007. 夏季江淮流域强降水过程与低频振荡的联系 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Xia Y. 2007. Role of the low frequency oscillations in the heavy rainfall processes in the Yangtze-Huaihe River valley during boreal summer [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 夏芸, 管兆勇, 王黎娟. 2008. 2003 年江淮流域强降水过程与 30~70d 低频振荡的联系 [J]. 南京气象学院学报, 31 (1): 33–41. Xia Y, Guan Z Y, Wang L J. 2008. Association of 30–70 d oscillations with the heavy rainfall over Changjiang-Huaihe River valley in summer 2003 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (1): 33–41.
- Xie P P, Arkin P A. 1995. An intercomparison of gauge observations and satellite estimates of monthly precipitation [J]. J. Appl. Meteor., 34: 1143–1160.
- 严华生, 胡娟, 范可, 等. 2007. 近 50 年来夏季西风指数变化与中国夏季降水的关系 [J]. 大气科学, 31 (4): 718–726. Yan H S, Hu J, Fan K, et al. 2007. The analysis of relationship between the variation of westerly index in summer and precipitation during the flood period over China in the last 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 718–726.
- 杨艳娟, 管兆勇, 朱保林. 2007. IOD 对北半球夏季季节内振荡强度的可能影响 [J]. 南京气象学院学报, 30 (2): 224–230. Yang Y J, Guan Z Y, Zhu B L. 2007. Possible influence of the Indian Ocean Dipole on the intensity of intraseasonal oscillation in boreal summer [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (2): 224–230.
- 姚菊香, 王盘兴, 李丽平. 2005. 季节内振荡研究中两种数字滤波器的性能对比 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 248–253. Yao J X, Wang P X, Li L P. 2005. Performance contrast between two filters in Madden-Julian oscillation analysis [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (2): 248–253.
- Yang H, Li C Y. 2003. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Changjiang-Huaihe River basin [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (4): 540–553.
- 周静亚, 杨大升, 黄嘉佑. 1986. 夏季热带及副热带环流系统周期振荡与中国降水的功率谱分析 [J]. 热带气象, 2: 195–203. Zhou J Y, Yang D S, Huang J Y. 1986. Power spectral analyses of oscillation in subtropic and tropic circulation systems and the precipitation over East China in summer [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2: 195–203.