

# 东亚夏季风的季节内振荡研究

琚建华<sup>1</sup> 钱 诚<sup>2</sup> 曹 杰<sup>3</sup>

1 中国气象局培训中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 云南大学东南亚气候与环境研究中心, 昆明 650091

**摘 要** 利用动力学因子和热力学因子结合的方法, 将东亚夏季风区的西南风与 OLR 进行了综合处理, 构造东亚季风指数 ( $I_M$ )。研究表明, 该指数既可很好地反映东亚季风区的风场、高度场的环流特征, 又能较好地描述我国长江中下游地区夏季降水和气温的变化。通过功率谱和带通滤波结合的方法研究东亚夏季风中的季节内振荡, 东亚夏季风区内低频振荡在夏季主要是以 30~60 天周期的振荡为主; 东亚夏季风的季节内振荡在东亚沿海呈波列的形式, 并表现为随时间向北传播的季风涌; 由于该季节内振荡的波动, 造成了东亚热带夏季风在东亚热带和副热带地区活动的反位相关系。

**关键词** 东亚夏季风 季风指数 季节内振荡 降水

文章编号 1006-9895(2005)02-0187-08

中图分类号 P462

文献标识码 A

## The Intraseasonal Oscillation of East Asian Summer Monsoon

JU Jian-Hua<sup>1</sup>, QIAN Cheng<sup>2</sup>, and CAO Jie<sup>3</sup>

1 Training Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Research Center for South-East Asian Climate and Environment, Yunnan University, Kunming 650091

**Abstract** Dynamic factor and thermodynamic factor are combined to develop a new East Asian summer monsoon (EAM) index ( $I_M$ ). This index has a clear physical meaning. The relationships between  $I_M$  and summer wind field, GHT and rainfall are studied. The study shows that  $I_M$  not only reveals the essence of the activities of the EAM over the subtropical area, but also reflects the features of the monsoon circulation. Moreover, it is good at describing the change of the summer rainfall and temperature in the middle and lower reaches of the Yangtze River. A meridional wave train along the East Asian coast is discovered. It is a 30-60-day intraseasonal oscillation (ISO) and propagates northward. It is revealed that the northward propagation of the ISO wave in the east coast of China is the main cause for the reverse activities of the EAM in the tropical area and the subtropical area respectively.

**Key words** East Asian summer monsoon, monsoon index, intraseasonal oscillation, rainfall

## 1 引言

我国位于东亚季风区, 是世界上著名的季风活动区之一。季风异常对我国天气和气候以及生存环境影响极大<sup>[1,2]</sup>。在东亚季风区, 普遍存在着 40~50 天的低频振荡。Murakami 等<sup>[3]</sup>曾用 1979 年资料证实了 40~50 天周期的低频波在夏季风区域 (60°E~150°E) 的存

在。陈隆勋等<sup>[4]</sup>利用 1980 年夏季的资料, 计算了 850 hPa 等压面上 40 天和 14 天周期振荡的纬向风和经向风的交叉谱的位相分布, 发现这两种振荡是从南半球向赤道地区变化。朱乾根等<sup>[5]</sup>利用 14°C 等露点线作为描述我国东部夏季风北界的参数, 发现夏季风在北进过程中存在明显的准 40 天、双周和 22 天左右低频振荡周期, 其中以准 40 天振荡周期最为显著。在过

收稿日期 2003-12-19 收到, 2004-03-05 收到修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40233033 和 40365001

作者简介 琚建华, 1956 年出生, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为全球气候变化和热带季风。E-mail: jujh@cma.gov.cn

去的研究中有种种迹象表明东亚沿海存在着一个南北向的波列,黄荣辉<sup>[6]</sup>和 Nitta<sup>[7]</sup>称之为东亚波列或 P-J 波列。李崇银<sup>[8]</sup>的研究也表明在东亚夏季风区存在明显的经向传播的低频振荡。

为了研究东亚季风中的这种季节内振荡以及对夏季降水和旱涝的影响,建立一个能表征季风强弱年际变化的指数是十分必要的。本文将结合动力学因子和热力学因子,定义一个新的东亚夏季风指数( $I_M$ ),并重点研究该指数的低频振荡特征。我们用功率谱和带通滤波结合的方法来讨论东亚夏季风中季节内振荡的特征及其沿经向的传播特征,以及这种季节内振荡对我国长江中下游地区降水的影响。

## 2 资料

本文所用的资料主要包括:中国气象局国家气候中心气候预测室制作的 1951~1999 年长江中下游区 17 个代表站的降水指数<sup>[9]</sup>;NCEP/NCAR 再分析大气环流月平均和逐日风场资料<sup>[10]</sup>;NOAA 的月平均和逐日向向外长波辐射(简称 OLR)资料<sup>[11]</sup>,中国气象局国家气候中心 1951~1999 年中国 160 站的月平均降水和月平均气温资料。此外,我们还用 Xie 和 Arkin<sup>[12]</sup>全球格点降水资料对测站降水资料的分析结果进行验证。1998 年长江中下游 9 个代表测站(南京、合肥、安庆、屯溪、钟祥、岳阳、宜昌、常德、长沙)的逐日观测雨量被定义为一个指数,代表长江中下游降水的平均特征。

## 3 东亚夏季风指数的定义

国内外气象学家已经对季风指数的研究进行了大量的工作,但不同的定义方法得到的季风指数在反映我国夏季气温和降水异常方面各具特色,对季风降水描述的能力也有一定差异。各个作者出于不同的研究目的而对季风指数进行了不同的定义,有的仅考虑了动力学因子,如环流指数<sup>[13~15]</sup>,有的只考虑了热力学因子,如海陆热力差指数<sup>[16~20]</sup>。对一个具体区域(如东亚夏季风区)来说,季风是多种要素共同作用的综合产物。如果仅考虑动力学因子的作用,或仅考虑热力学因子的作用,都不能全面反映出季风的区域特征。因此,把动力学因子和热力学因子相结合来构造该区域季风指数,才能较全面地描述季风的特征。张庆云和陶诗言的研究<sup>[21]</sup>发现:东亚夏季风系统中的热带辐合带(热带季风槽)和副热带辐合带(梅雨锋)的强度变化呈相反的趋势。从这一环流系统特点出发,他们将东亚热带季风槽区与东亚副热带地区 6~8 月平均的 850 hPa 纬向风分量的距平差定义为东亚夏季风指数。

通过考察气候平均的风场资料,我们发现东亚季风区夏季在 850 hPa 上最显著的环流特征是受西南气流控制。夏季降水是由季风活动造成的最直接的结果,由于夏季西太平洋副热带高压南北位置年际差异,东亚降水异常主要表现为南北向的正、负、正(或反向)雨型分布,长江中下游地区基本上位于这种雨型分布的中心<sup>[22]</sup>。就东亚季风系统而言,西太平洋副热带高压是关键的一环流系统之一,其中长江中下游地区的夏季降水在反映东亚夏季风年际变异方面具有较强的指示意义。因此,综合考虑上述分析,本文从受夏季风影响显著的长江中下游 17 代表站<sup>[8]</sup>的夏季降水出发,用其夏季(6~8 月)平均的降水指数与各种场作相关分析。结果发现,长江中下游区夏季降水与东亚沿海 850 hPa 西南风( $v_{SW}$ )存在负、正、负的相关关系(图 1a),而与 OLR 存在正、负、正的相关关系(图 1b)。这就表明了东亚夏季风在东亚热带和副热带地区的活动刚好是反相的。这也与张庆云和陶诗言<sup>[21]</sup>的研究结果是一致的:夏季东亚季风系统内热带季风槽和副热带梅雨锋两条辐合带的强度呈相反的变化趋势。而且,对各种物理量场进行分析得到的各种迹象表明,东亚沿海夏季存在一个南北向的波列,黄荣辉等<sup>[22]</sup>的研究指出,该波列可能是由西太平洋暖池附近的深对流活动激发出来的,会影响我国东部的汛期降水。而风场所呈现的现象正是这种对流活动所激发的低频振荡的反映。OLR 是表征对流活动的一个很好的指标,而且,在这里我们也看到 OLR 相关图(图 1b)反映了一种热力学波动在不同纬度的活动。因此,动力学量( $v_{SW}$ )和热力学量(OLR)既是环流形势的反映,同时又是热力学波动的反映,把两者综合起来,既能反映东亚季风区特殊的动力学和热力学特征,又能够更好地体现东亚夏季风的物理本质。因此,我们将东亚季风区内各格点上经过标准化处理的西南风( $v_{SW}$ )与 OLR 之差定义为东亚夏季风指数( $I_M$ ):

$$I_M = \frac{v_{SW} - \bar{v}_{SW}}{\sigma_v} - \frac{R - \bar{R}}{\sigma_R}, \quad (1)$$

式中  $v_{SW}$  为东亚季风区的夏季全风速在西南方向上的投影。 $R$  为向外长波辐射; $\bar{v}_{SW}$ 、 $\bar{R}$  为  $v_{SW}$  和 OLR 夏季的多年平均值; $\sigma_v$ 、 $\sigma_R$  分别为夏季  $v_{SW}$ 、OLR 的标准差。

吴尚森等<sup>[23]</sup>也用类似的方法构造南海夏季风强度指数。但是,他们仅是对局限在南海附近的一小块区域进行分析,并没有用热力学波动的概念将东亚季风在热带地区和副热带地区的不同活动特征联系起来,也没有分析南海夏季风与东亚副热带天气气候之

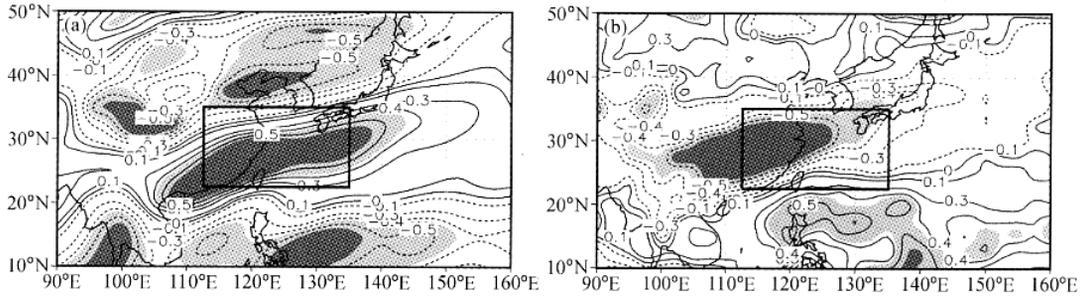


图 1 长江中下游夏季降水指数和同期的 850 hPa  $v_{sw}$  (a) 以及 OLR (b) 的相关分布图, 浅色阴影 通过 95% 显著性检验, 深色阴影 通过 99% 显著性检验, 矩形区 本文定义的东亚副热带地区

Fig. 1 The correlation coefficient between summer rainfall index over middle and lower reaches of the Yangtze River and  $v_{sw}$  at 850 hPa (a) and OLR (b) (95% confidence level is light shaded while 99% confidence level is dark shaded. The box outline is defined as the East Asian subtropical region in this paper)

间的联系。我们下面将重点研究东亚季风对东亚副热带地区的影响。将  $I_M$  计算区域 [图 1 中的矩形区域 (22.5°N ~ 32.5°N, 112.5°E ~ 135°E)] 平均, 构造东亚夏季风在副热带地区的活动指数 ( $I_{EA}$ )。

根据  $I_{EA}$  的年际变化, 选取活跃季风年 (1982、1993、1995、1998、1999) 和不活跃季风年 (1981、1985、1986、1990), 对夏季 (JJA) 850 hPa 和 200 hPa 的风场作强弱年的差值分析。在 850 hPa 环流差值图 (图 2) 上, 东亚夏季风在副热带地区活跃的年份, 副热带西太平洋为异常反气旋控制。副热带高压位置偏南, 高压脊线大约位于 20°N 附近。我国长江以南地区受副高外围的强西南气流影响显著。这支强劲的差值西南气流引导热带地区的水汽进入我国长江中下游地区。同时, 黄海、朝鲜、日本等地为一异常气旋控制, 我国东部长江以北地区为该异常气旋西侧的差值偏北气流控

制, 该差值偏北气流容易引导中高纬冷空气南下, 与长江以南差值西南气流向北引导的热带气流在长江流域交汇, 因而, 长江中下游—黄海—日本一带为辐合区控制, 容易造成多雨天气。同时我们也可注意到, 东亚夏季风在副热带地区活跃时, 热带地区低空向北的越赤道气流偏弱。这表明东亚副热带夏季风活跃年, 东亚热带夏季风偏弱。

我们分析了 1951 ~ 1999 年  $I_{EA}$  和同期夏季 (JJA) 的 200 hPa、500 hPa 和 850 hPa 高度场的相关分布后发现: 200 hPa 高度场上 (图略), 黄海、朝鲜、日本等地  $I_{EA}$  和 200 hPa 高度场是显著负相关, 这表明东亚夏季风在副热带地区活跃的年份, 黄海、朝鲜、日本等地高空为低压控制, 同时还可看到东亚 30°N 以南为正相关区, 这表明东亚副热带夏季风强年南亚高压偏弱。而在 500 hPa 高度场 (图 3) 上, 30°N 以南为一大片显著正相

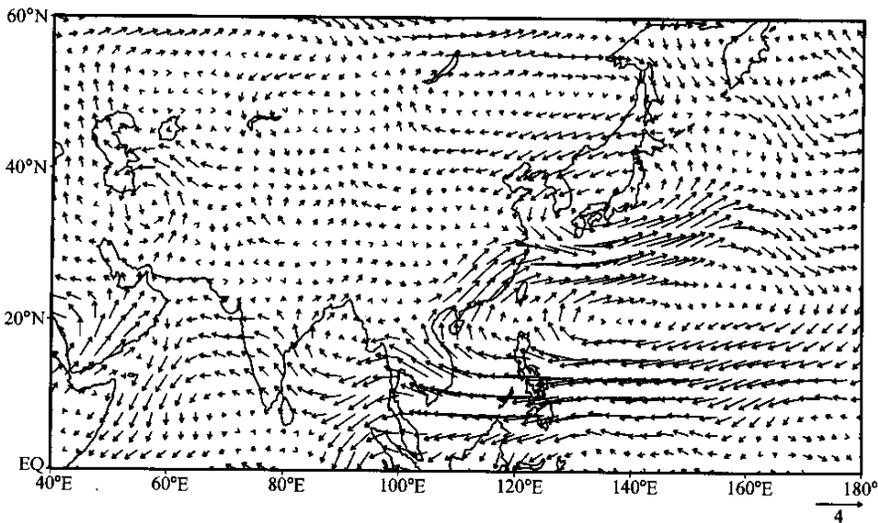


图 2 850 hPa 环流差值图 (东亚副热带夏季风活跃年减不活跃年)

Fig. 2 Circulation difference at 850 hPa (active  $I_{EA}$  years minus inactive  $I_{EA}$  years)

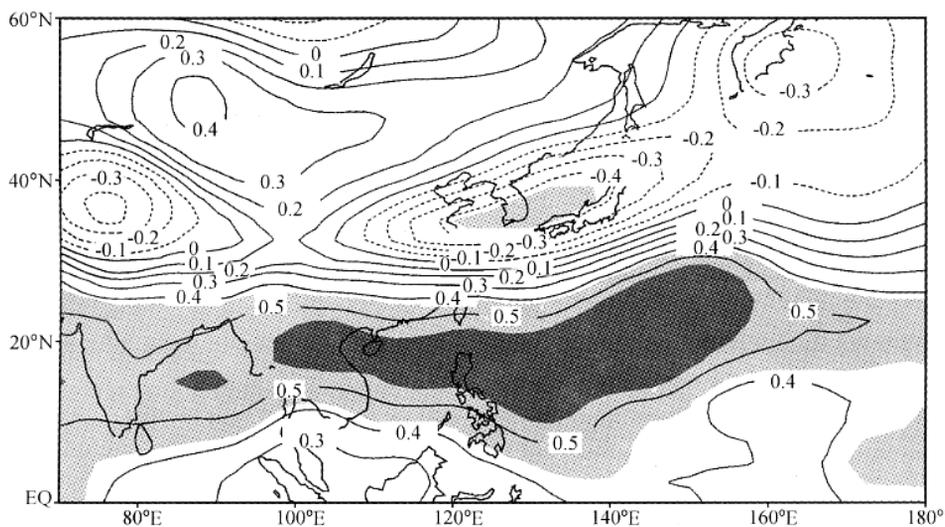


图 3  $I_{EA}$  与 500 hPa 高度场的相关分布( 浅色阴影区为通过 95% 显著性检验, 深色阴影区为通过 99% 显著性检验 )

Fig. 3 The correlation coefficient between  $I_{EA}$  and geopotential height at 500 hPa (95% confidence level is light shaded while 99% confidence level is dark shaded)

关区, 正相关中心位于 20°N 附近, 这表明东亚副热带夏季风强年, 西太平洋副热带高压偏南, 同时, 我们注意到黄海、朝鲜、日本等地为负相关, 这表明东亚副热带夏季风强年, 该地区 500 hPa 上也为低压控制。850 hPa 高度场也可以得到类似的结果, 负相关区随高度向西北方向倾斜。这表明东亚夏季风在副热带地区活跃年, 西太平洋副热带高压偏南, 黄海、朝鲜、日本等地为一深厚的低压控制。这个结论与对流场分析的结论是一致的。

我们做了 1951~1999 年  $I_{EA}$  和我国 160 站的站点夏季降水资料的同期相关( 图 4 ), 以考察该指数在反映我国夏季降水方面的能力。可以看到,  $I_{EA}$  和长江中下游地区的夏季降水存在正相关的关系( 且通过 95%

的显著性检验)。为了进一步验证上述分析结果, 我们用  $I_{EA}$  和全球  $2^\circ \times 2^\circ$  的格点降水资料<sup>[12]</sup>做了相关分析, 结果发现我国长江流域、黄海到日本一带为一条明显的正相关带( 图略), 我们把这条高相关带看成是东亚副热带地区的夏季风活动带, 在 20°N 附近的西太平洋上为一条负相关带, 可以把该区域看成是西太平洋副热带高压所在。我们用两套不同的资料( 格点和站点资料 )得到了相似的结果。

同时, 我们分析了  $I_{EA}$  在反映我国夏季气温方面的能力。图 4b 是  $I_{EA}$  和我国 160 站夏季气温的同期相关分布, 从图中看到,  $I_{EA}$  和长江中下游地区的夏季气温存在着很好的负相关关系, 即东亚副热带夏季风强( 弱 ) 时, 长江中下游地区夏季为低( 高 ) 温。

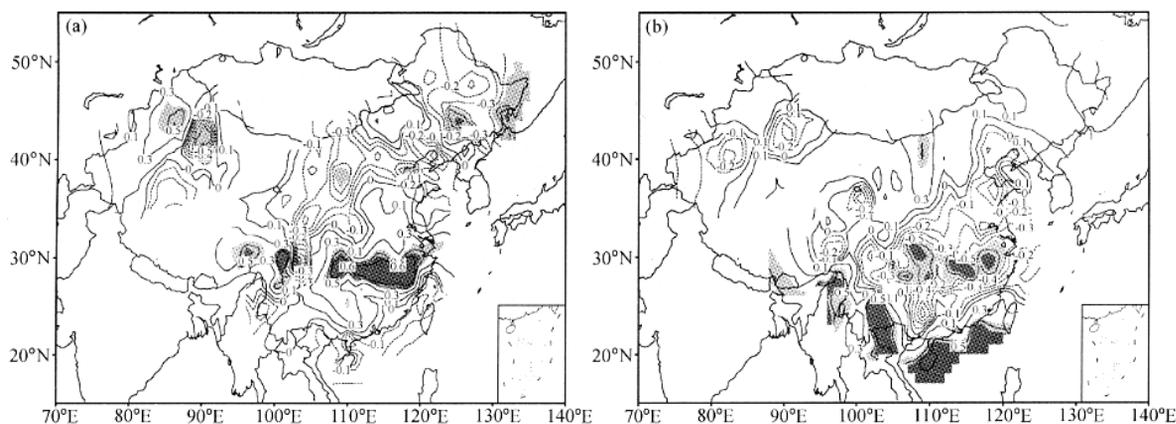


图 4  $I_{EA}$  与我国 160 站夏季降水 (a) 气温 (b) 的同期相关分布( 浅色阴影 通过 95% 显著性检验; 深色阴影 通过 99% 显著性检验 )

Fig. 4 Correlation coefficient between  $I_{EA}$  and summer rainfall (a) and temperature (b) at 160 stations of China (95% confidence level is light shaded while 99% confidence level is dark shaded)

### 4 东亚夏季风在副热带地区的季节内振荡

1998 年是一个非常典型的全球大气环流异常年。该年长江洪水是 20 世纪以来仅次于 1954 年的一次全流域型洪水。洪水发生之早、来势之猛、水量之大、水位之高、持续时间之长,为历史罕见。为此,我们选取 1998 年作为本文的研究个例进行研究。

我们对 1998 年夏季(从 5 月 1 日起,样本长度为 160 天)的  $I_{EA}$  作功率谱的  $F$  检验(图略)。可以发现,  $I_{EA}$  存在 30~60 天的显著低频振荡周期,该低频振荡周期的功率谱  $F$  值远远超过了 99% 的显著性检验。

为了进一步研究这种低频振荡在东亚夏季风区的活动特征,我们取 1998 年 NCEP 逐日 850 hPa 风场资料和同年 NOAA 的逐日 OLR 资料,按(1)式计算得到东亚季风区每个格点上逐日的  $I_M$  值,然后以中心频率为周期( $T_0 = 45$  d)对  $I_M$  进行 30~60 天的带通滤波<sup>[8]</sup>并沿 120°E 给出了纬度—时间剖面图(图 5)。

图 5 中的高  $I_M$  值区可以代表东亚夏季风的活跃区。在 5 月上旬至中旬,10°N~15°N 之间(位于西太平洋暖池西侧的菲律宾附近)还是  $I_M$  的低值区,表明这段时间东亚夏季风还没爆发。从 5 月下旬(大约 5 月 20 日左右)开始,菲律宾附近的  $I_M$  值明显地增大,该区域西南风和对流活动明显地增强,表明此时东亚夏季风开始在南海附近建立。这与一般认为南海夏季风爆发于 5 月第 4 候的结果是一致的。大约 25~30 天(6

月 10 日左右)后,该振荡中心向北移到了 25°N~30°N 之间,并在长江中下游一带有明显加强并继续北移。50~60 天(7 月 10 日左右)后,振荡中心移动到 30°N~40°N 之间。由此可见,该周期的低频振荡可能是由菲律宾附近的深对流活动激发出来的<sup>[6,22]</sup>,然后随着时间的推移,振荡中心逐渐向北移动。

进一步分析还可以看到,25°N~30°N 之间的副热带区 5 月下旬还是  $I_M$  的低值区,表明此时虽然南海夏季风(东亚热带夏季风)已经建立,但还没有推进到东亚副热带地区。6 月上旬,该区域的  $I_M$  值开始明显增大,6 月中旬起该区域  $I_M$  值达到最强。此时,西太平洋副热带高压完成了第一次北跳,该区域内西南风增大,热带季风气流、副热带高压外围转向的气流和中高纬冷空气三支气流在此交汇,水汽辐合上升,对流活动增强,长江中下游梅雨开始。7 月上旬,  $I_M$  值又明显地逐渐减小,表明此时副高第二次北跳,该区域为副高中心控制区,西南风和对流活动都很弱。此时,30~60 天的低频振荡已向北传播到了 35°N~40°N 之间,使得该地区的  $I_M$  值明显增大,我国的华北位于副高西北外围,西南风和对流活动有所增大,但强度远不及在副热带梅雨期时的强度,我国华北雨季开始。而此时,10°N~20°N 之间  $I_M$  值又有所增大,表明此时华南地区为副高南侧热带东风气流控制,热带系统的对流活动激发了新的 30~60 天低频振荡并又继续向北传播。在低频振荡北传的影响下,7 月下旬,25°N~30°N 之间长江中下游的  $I_M$  值又开始有所增大,夏季风在长江中下

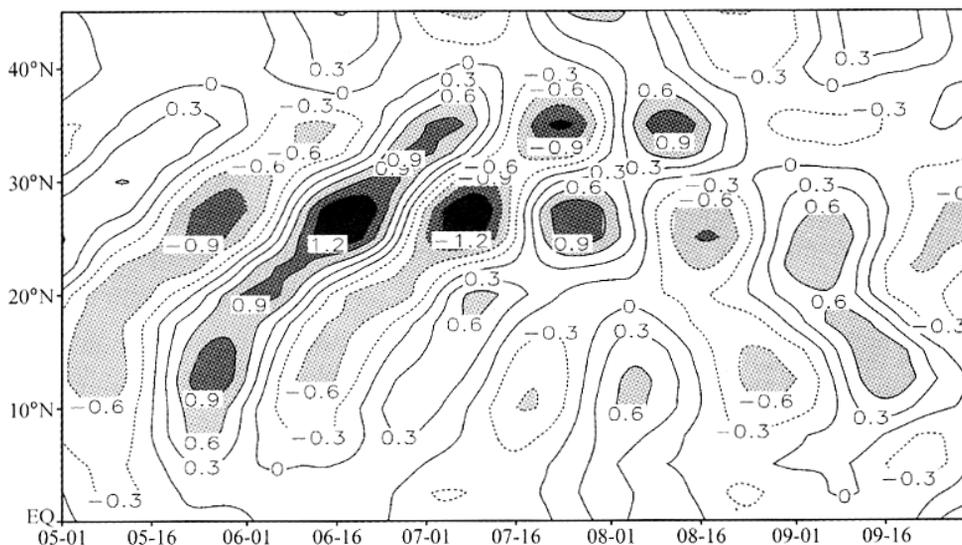


图 5 1998 年 30~60 天带通滤波的季风指数沿 120°E 的时间—纬度剖面  
Fig. 5 Time-latitude section of monsoon index after 30-60-day bandpass filtering

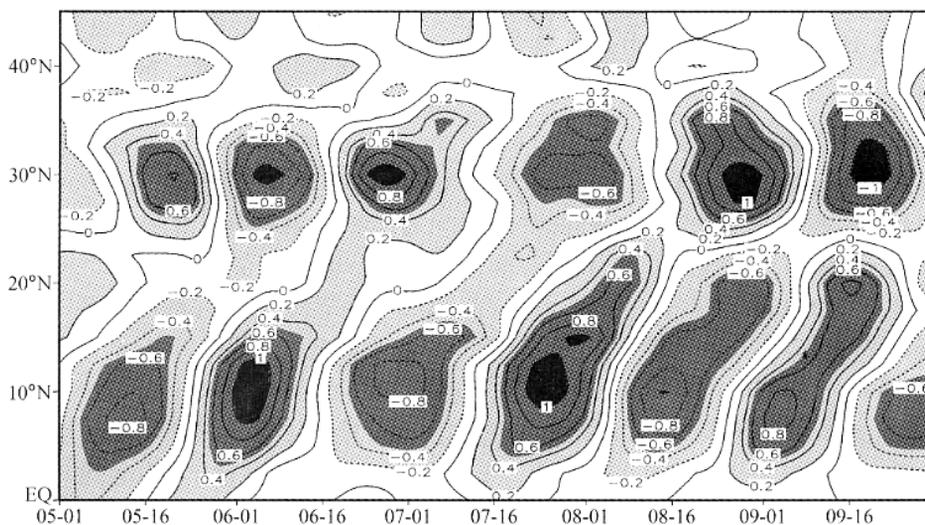


图6 同图5,但为1999年

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for 1999

游地区又一次进入活跃期(二度梅)。季风指数值出现交替变化,这正是低频振荡的周期变化所致。9月上旬以后,低频振荡迅速减弱,副高南撤,东亚夏季风气流逐渐地减弱。

图6是1999年经过30~60天带通滤波的 $I_M$ 沿120°E的纬度—时间剖面。在1999年, $I_M$ 同样表现了很强的30~60天低频振荡的信息,而且它所表现的低频振荡向北传播的特征比1998年还要明显。

从以上分析中我们注意到:10°N~20°N之间(东亚热带) $I_M$ 为高(低)值时,25°N~30°N之间(东亚副热带)的 $I_M$ 刚好是低(高)值。同时,低频振荡从东亚热带到东亚副热带刚好是半个波长,即东亚热带和东亚副热带刚好处于低频波的波峰(波谷)和波谷(波峰)。正是由于低频振荡在东亚沿海的向北传播,造成了东亚热带季风槽和东亚副热带梅雨锋刚好是反位相的,即热带季风槽偏弱,副热带梅雨锋偏强,江淮流域降水偏多;反之,热带季风槽偏强,副热带梅雨锋偏弱,江淮流域降水偏少。 $I_M$ 能很好地描述整个东亚夏季风的活动和我国雨带的分布特征。

## 5 东亚夏季风季节内振荡对长江中下游地区降水的影响

1998年,我国长江流域发生了特大洪涝灾害,长江中下游地区出现了二度梅现象,这与东亚夏季风在副热带地区的异常活跃是有密切关系的。许多研究<sup>[24,25]</sup>都指出,这与该年东亚热带季风的低频振荡异常有关。分析1998年 $I_{EA}$ 全年的30~60天带通滤波演变曲线,可以发现30~60天的低频振荡整年都存

在,但振幅在夏季明显加强。

图7给出了1998年6~8月的经过带通滤波(30~60天、10~20天)后, $I_{EA}$ 与长江中下游地区降水实况的对比,图中的实线为30~60天滤波的 $I_{EA}$ 的演变曲线,虚线为10~20天滤波的 $I_{EA}$ 的演变曲线。1998年,长江中下游的梅雨分别出现在两个阶段,第一阶段出现在6月11日~7月3日,第二阶段出现在7月16日~8月1日。这两个梅雨阶段正好对应着 $I_{EA}$ 低频振荡(30~60天)的两个最强的峰值,这两段时间也正是东亚季风在副热带地区最活跃的两段时间。由长江中下游9个代表站该年的平均降水演变特征表明,当季风活动进入活跃阶段(低频振荡的波峰阶段),江淮流域随之也出现梅雨集中降水阶段。在东亚季风区,除了存在30~60天低频振荡的季节内变化外,还存在着准双周(10~20天)振荡。比较这两个不同周期的振荡,我们发现进入夏季风季节后,30~60天的季节内振荡振幅逐渐增大并成为控制振荡,而准双周振荡在夏季风季节中其功率谱值并未通过99%的显著性检验。这一特征在1999年的计算中也得到了相同的结果(图略)。

从上述的分析中,我们很清楚地看到, $I_{EA}$ 所表现出很强的30~60天低频振荡的信息表明,东亚副热带地区的夏季风中存在很强的季节内振荡(30~60天)。低频振荡进入夏季后明显加强,当其振幅超过一定的量值时,夏季风建立,江淮梅雨开始。东亚季风中的这种低频振荡可以表征季风涌像波动般地向北推进。当低频波推进到我国华北地区时,夏季风也随之控制了这些地区。此时,在我国东部地区低频波表现为两个

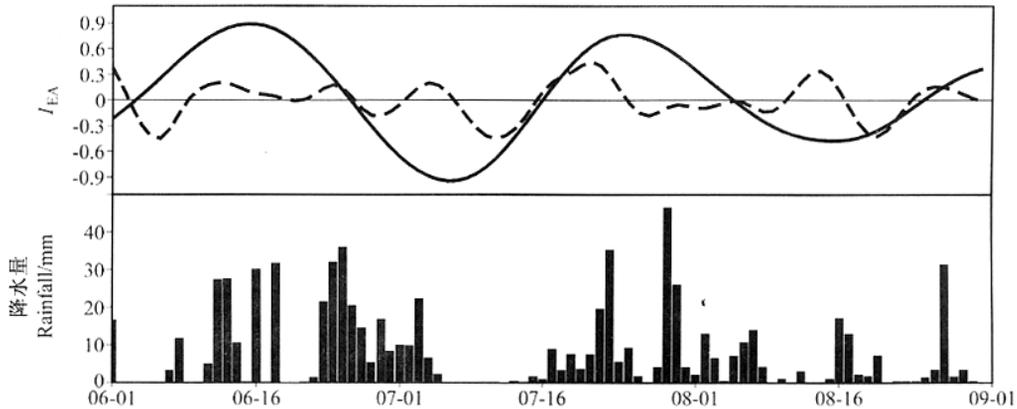


图 7 1998 年  $I_{EA}$  的 30 ~ 60 天(实线)、10 ~ 20 天(虚线)滤波曲线和长江中下游 9 站平均降水演变直方图

Fig. 7 Time series of  $I_{EA}$  30 - 60-day band-pass filtering (solid line), 10 - 20-day band-pass filtering (dashed line) and mean rainfall (shaded bar) at 9 stations of the middle and lower reaches of the Yangtze River in 1998

波峰(华北、华南)和一个波谷(江淮流域)对应着我国盛夏的南北两条雨带。由此看来,我们定义的  $I_M$  不仅能很好地描述东亚夏季风的物理本质,而且还能很好地描述我国雨带活动的特征。利用东亚夏季风中低频振荡的性质和其向北传播的特性,我们还可以根据  $I_M$  在热带地区的活跃程度来预测未来其传播到江淮流域以其华北的大致时间和强度。

## 6 结论

本文将动力学因子和热力学因子结合,构造了东亚季风指数 ( $I_M$ ),并着重研究了东亚季风中的季节内振荡及其对东亚副热带地区降水的影响,得到以下结论:

(1)  $I_M$  既是环流形势的反映,又是热力学波动的反映,将东亚季风在东亚热带地区和副热带地区的不同活动特征很好地联系起来; $I_M$  既反映了东亚季风区夏季特殊的动力学和热力学特征,又能更好地体现东亚夏季风的物理本质。

(2) 中国东部汛期降水与东亚季风关系为:东亚热带季风槽偏弱(弱东亚热带夏季风)时,西太平洋副热带高压偏南,对应东亚副热带梅雨锋偏强,江淮流域降水偏多,气温为低温;反之,对应东亚副热带梅雨锋偏弱,江淮流域降水偏少,气温为高温。

(3)  $I_M$  在夏季风季节中存在明显的季节内振荡,这种 30 ~ 60 天的振荡进入夏季后明显加强。东亚夏季风的季节内振荡在东亚沿海呈波列的形式,并表现为随时间向北传播的季风涌,其不同纬度的量值可以很好地描述夏季风的建立和江淮梅雨的开始。东亚夏季风中的这种低频振荡波动将东亚季风在热带和副热带地区的不同活动联系在一起,两者分别处于该低

频波的波峰和波谷,正是这种联系使得东亚季风在热带和副热带之间的活动互为反位相的关系。东亚季风在沿海低频振荡波动随时间向北传播,对于长江中下游地区降水的中长期预报有很好的指示意义。

致谢 感谢李崇银院士和吴国雄院士对本文的形成提出过很好的建议,同时感谢两位审稿人提出的修改意见。

## 参考文献

[ 1 ] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asian Summer Monsoon in China. *Monsoon Meteorology*. Oxford University Press, 1987, 60 ~ 92

[ 2 ] 陈隆勋,朱乾根,罗会帮,等. 东亚季风. 北京:气象出版社, 1991, 362pp  
Chen Longxun, Zhu Qiagen, Luo Huihang, et al. *The East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991, 362pp

[ 3 ] Murakami T, Nakazawa T, He Jinhai. On the 40-50 day oscillation during the 1979 Northern Hemisphere summer, Part I: Phase propagation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1984, **62**: 440 ~ 468

[ 4 ] 陈隆勋,罗绍华,沈如桂. 夏季亚洲季风环流的结构及其与大气环流季节变化的关系. 1980 年热带天气会议论文集. 北京:科学出版社, 1982, 82 ~ 99  
Chen Longxun, Luo Shaohua, Shen Rugui. The structure of the Asian Summer Monsoon circulation and its relationship with the seasonal variation of the general circulation. *The Anthology of the Tropical Synoptic Conference in 1980* (in Chinese). Beijing Science Press, 1982, 82 ~ 99

[ 5 ] 朱乾根,杨松. 东亚副热带季风的北进及其低频振荡. 南京气象学院学报, 1989, **12**: 249 ~ 257  
Zhu Qiagen, Yang Song. The northward advance and oscillation of the East Asian Summer Monsoon. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1989, **12**: 249 ~ 257

[ 6 ] Huang R H. The East Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia. *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, **1**: 25 ~ 36

- [ 7 ] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **65** 373 ~ 390
- [ 8 ] 李崇银. 大气低频振荡. 北京:气象出版社, 1993, 310pp  
Li Chongyin. *The Low Frequency Oscillation of the atmosphere* ( in Chinese ). Beijing :China Meteorological Press, 1993, 310pp
- [ 9 ] 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京:气象出版社, 2000, 100 ~ 101  
Chen Xingfang, Zhao Zhenguo. *The Research and Application of the Rainfall Prediction in the Flood Period of China* ( in Chinese ). Beijing : China Meteorological Press, 2000, 100 ~ 101
- [ 10 ] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** 437 ~ 471
- [ 11 ] Gruber A, Krueger A F. The status of the NOAA outgoing longwave radiation data set. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1984, **65** 958 ~ 962
- [ 12 ] Xie P, Arkin P A. A 17 year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78** 2539 ~ 2558
- [ 13 ] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118** 877 ~ 926
- [ 14 ] Goswami B N, Krishnamurthy V, Annamalai H. A broad scale circulation index for the interannual variability of the Indian summer monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125** 611 ~ 633
- [ 15 ] Lau K-M, Kim K-M, Yang S. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon. *J. Climate*, 2000, **13** 2461 ~ 2482
- [ 16 ] 郭其蕴. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析. 地理学报. 1983, **38** 207 ~ 216.  
Guo Qiyun. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation. *Acta Geographica Sinica* ( in Chinese ), 1983, **38** 207 ~ 216
- [ 17 ] 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常. 大气科学, 1996, **20** 575 ~ 583  
Shi Neng, Zhu Qiangen, Wu Bingui. The east Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* ( in Chinese ), 1996, **20** 575 ~ 583
- [ 18 ] 何金海. 东亚季风体系的研究进展以及爆发特征和可能机制. 现代大气科学前沿与展望. 北京:气象出版社, 1995, 51 ~ 55  
He Jinhai. The research advance in the East Asian Monsoon system as well as the characters and possible mechanism of its outset. *The Frontier and Outlook of the Modern Atmospheric Science* ( in Chinese ), Beijing :
- China Meteorological Press, 1995, 51 ~ 55
- [ 19 ] 孙秀荣, 陈隆勋, 何金海. 东亚海陆热力差指数与东亚夏季风强度关系探讨. 见:何金海等编. 南海夏季风建立日期的确定与季风指数. 北京:气象出版社, 2001. 96 ~ 108  
Sun Xiurong, Chen Longxun, He Jinhai. A discussion of the relationship between the East Asian land-sea contrasts index and the intensity of East Asian summer monsoon. *The Ascertainment of the Onset Date of the East Asian Summer Monsoon as well as Monsoon Indices* ( in Chinese ), He Jinhai et al, Eds. Beijing :China Meteorological Press, 2001, 96 ~ 108
- [ 20 ] 祝从文, 何金海, 吴国雄. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系. 气象学报, 2000, **58** :391 ~ 402  
Zhu Congwen, He Jinhai, Wu Guoxiong. East Asian Monsoon Index and its interannual relationship with large-scale thermal dynamic circulation. *Acta Meteorologica Sinica* ( in Chinese ), 2000, **58** :391 ~ 402
- [ 21 ] 张庆云, 陶诗言. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水. 应用气象学报. 1998 (增刊):16 ~ 23.  
Zhang Qingyun, Tao Shiyun. Tropical and subtropical monsoon over East Asia and its influence on the rainfall over eastern China in summer. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* ( in Chinese ), 1998, **9** ( Supplement ): 16 ~ 23
- [ 22 ] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状况及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. 大气科学, 1994, **18** :456 ~ 465  
Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the convection activities over the western tropical Pacific warm pool on the intraseasonal variability of the East Asian summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* ( in Chinese ), 1994, **18** :456 ~ 465
- [ 23 ] 吴尚森, 梁建茵. 南海夏季风强度指数及其变化特征. 热带气象学报, 2001, **17** 337 ~ 344  
Wu Sangshen, Liang Jianyin. An index of South China Sea summer monsoon intensity and its variation characters. *Journal of Tropical Meteorology* ( in Chinese ), 2001, **17** 337 ~ 344
- [ 24 ] 许晨海, 倪允琪, 朱福康. 1998 年 7 月西太平洋副高显著南落的原因. 气象, 2000, **26** 6 ~ 9  
Xu Chenhai, Ni Yunqi, Zhu Fukang. Cause of the West Pacific subtropical high southward withdraw in July 1998. *Meteorological Monthly* ( in Chinese ), 2000, **26** 6 ~ 9
- [ 25 ] 朱乾根, 徐国强. 1998 年夏季中国南部低频降水特征与南海低频夏季风活动. 气象科学, 2000, **20** 239 ~ 248  
Zhu Qiangen, Xu Guoqiang. The features of LFP in South China with SCS LF summer monsoon activity in the summer of 1998. *Scientia Meteorologica Sinica* ( in Chinese ), 2000, **20** 239 ~ 248