

# 亚洲夏季风区大气能量谱分析

沈如桂 冯志强 冯涛

(大气科学系)

## 摘要

用1979年FGGE—Ⅱb资料,对亚洲及其邻域的总能量、大气显热源和水汽汇进行谱分析。结果表明:准40天振荡是亚洲夏季风区的主要特征振荡。振荡方差贡献的分布以及振荡源中心位置反映出在印度、孟加拉湾、南海和东亚大陆上空夏季风系统具有一定的独立性。长江以北地区主要受中纬度系统影响,华南沿海和云贵地区则分别受南海和孟加拉湾地区夏季风系统的影响。振荡从主要振荡源向外传播,东亚季风区振荡主要从东南向西北传播。总能量和水汽汇振荡的传播还表明,从南半球有明显的向北传播通道。这些通道与越赤道气流通道大致相对应。大气显热源的振荡则无此特征,但它对大气环流准定常状态的维持有一定的影响,孟加拉湾湾头和南海既是热源中心,亦为准双周振荡的源区。

**关键词** 大气总能量, 大气显热源, 大气水汽汇, 大气振荡, 谱分析, 季风环流, 亚洲

## 1 引言

自谱分析方法被广泛采用以来,人们相继发现了亚洲夏季风区的各种振荡周期。不少学者还对这些振荡的传播特征、形成机制和气候背景进行过探讨。Krishnamurti等<sup>[1]</sup>计算了印度季风系统9个参数的谱值,发现了准双周和准5天振荡;分析了各要素振荡的位相关系,提出了云—辐射激发机制。Yasunari<sup>[2]</sup>指出了这种振荡周期的存在,认为它是整个亚洲夏季风系统活跃—中断交替的表现。Murakami和Nakazawa<sup>[3]</sup>研究了大范围地区的谱值,发现准40天振荡在印度洋和赤道西太平洋之间最强烈,具有明显的季风区属性;振荡的东传和北传与赤道上空Walker环流和印度季风中期变化有密切关系。金祖辉和陈隆勋<sup>[4]</sup>讨论过准40天振荡的传播,指出100°E是一条分界线,西边的印度季风系统和东边的东亚季风系统的振荡是分别向东和向西传播;各系统内部的振荡几乎是同步的,位相差很小。

本文以总能量、大气显热源和水汽汇为要素,研究其谱值分布和结构、各种振荡的

本文1988年1月收到

传播特性和相互作用, 从而探讨亚洲及其邻近海域上夏季风系统的环流特征。

## 2 资料和计算方法

用1979年FGGE—Ⅲb常规格点资料, 讨论范围为 $30^{\circ}$ — $140^{\circ}$ E,  $0^{\circ}$ — $56^{\circ}$ N, 网格距为 $5.4^{\circ} \times 5.4^{\circ}$ , 共5层: 100, 400, 500, 700和850hPa层。1979年南海夏季风在5月中旬起影响南海<sup>[6]</sup>, 故资料时段取5月16日至8月24日, 共102天, 空缺资料用月平均值填补。

运算前, 先作去趋势处理, 化非平稳时间序列为平稳时间序列。具体方法是用一个三阶非线性方程来拟合, 以除去序列中的趋势项部份。为了保持各种振荡周期, 序列不再作任何滤波处理。

总能量定义为:  $E_t = C_p T + gZ + Lq + v^2/2$ , 即为显热能、位能、潜热能和动能之和。总能量的谱值是逐项计算 $C_p T$ ,  $gZ$ ,  $Lq$ 和 $v^2/2$ 的谱值, 再进行合成, 实质上是一个波包的振荡谱值。每个格点上的功率谱及其与右、上方邻近点的凝聚谱、位相滞后谱均用快速富氏变换系数计算, 其中 $v^2/2$ 项是用卷积方法求取。

大气显热源( $Q_1$ )和水汽汇( $Q_2$ )定义分别为:

$$Q_1 = \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E \cdot \vec{v}) + \frac{\partial}{\partial p} (\omega \cdot E)$$

$$Q_2 = -L \left( \frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (q \cdot \vec{v}) + \frac{\partial}{\partial p} (\omega \cdot q) \right)$$

其中, 干静力能 $E = C_p T + gz$ , 其它符号如常定义。 $Q_1$ 和 $Q_2$ 谱值亦由各分项谱值合成。

为了使所得的离散功率谱更接近连续功率谱, 对谱值进行了五点三角窗平滑。窗函数为

$$h_t = \begin{cases} (1 - |t|/3)/2 & 0 \leq |t| \leq 3 \\ 0 & \text{其它,} \end{cases} \quad \text{其中 } t \text{ 为离窗中心的距离序值。}$$

分析振荡传播路径前, 所有凝聚谱值都要通过凝聚性检验, 要求凝聚系数 $\Gamma_{xy}(f)$ , 对于0.05的信度, 满足 $\tanh\{w(f) - 0.206\} \leq \Gamma_{xy}(f) \leq \tanh\{w(f) + 0.186\}$ , 其中 $w(f) = \tanh^{-1} \Gamma_{xy}(f)$ 。从经凝聚性检验后两格点间的位相滞后谱值, 可确定振荡在任一点上的传播方向。

## 3 总能量的功率谱值

为了解振荡的谱结构, 先比较不同层次上沿不同经度和纬度线的功率谱值, 图1a, b, c分别为100, 500和850hPa沿 $106.9^{\circ}$ E线上三个纬度点( $0^{\circ}$ ,  $22.5^{\circ}$ N,  $45^{\circ}$ N)和沿 $16.9^{\circ}$ N线上三个经度点( $67.5^{\circ}$ E,  $101^{\circ}$ E,  $135^{\circ}$ E)的谱值线。可见, 尽管不同地点谱线峰值不同, 但大体集中在准40天、准三周、准双周和准单周周期上。另外, 振荡的振幅在中、下层大气内较大, 高层大气中, 尤其在中、高纬地区, 谱值相当小。

为了比较各种振荡的相对大小和分析其水平分布, 用方差贡献比较法。某振荡周期的方差贡献 $\sigma_L$ 为该周期功率谱值 $P_L$ 与平均谱值 $\bar{P}$ 之比, 即 $\sigma_L = P_L/\bar{P}$ 。由于振荡在对流层中、下层较明显, 故用400hPa以下三层平均值来讨论。

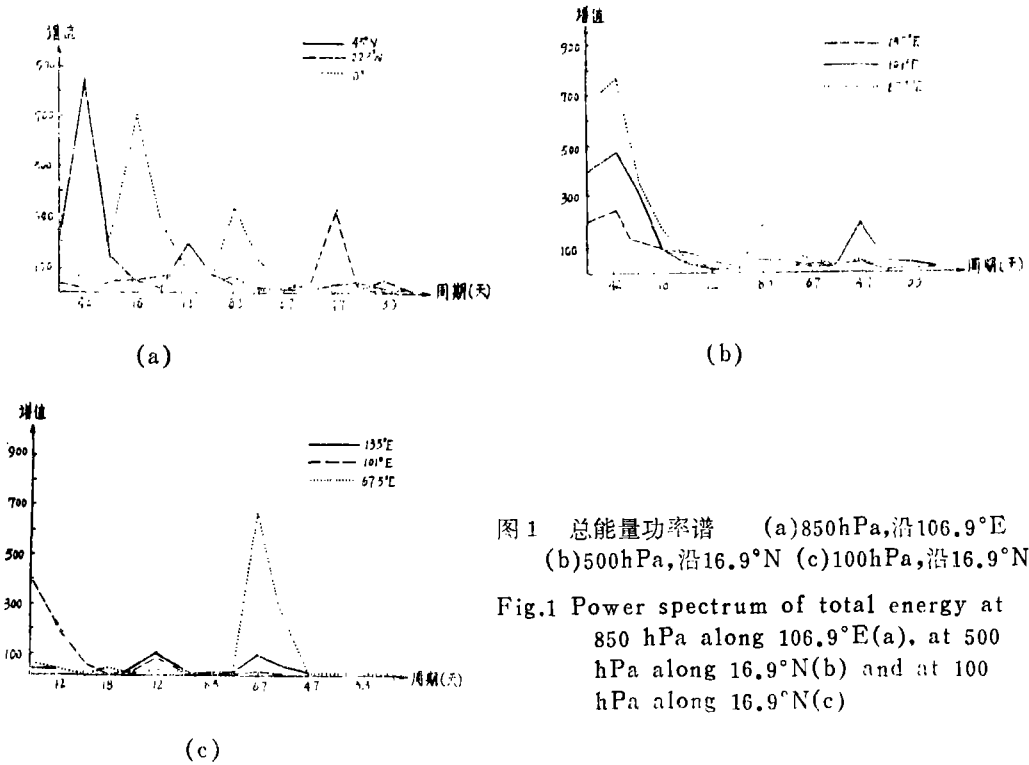


图 1 总能量功率谱 (a)850hPa,沿106.9°E (b)500hPa,沿16.9°N (c)100hPa,沿16.9°N

Fig.1 Power spectrum of total energy at 850 hPa along 106.9°E(a), at 500 hPa along 16.9°N(b) and at 100 hPa along 16.9°N(c)

43天振荡的方差贡献分布见图 2。整个区域的方差值几乎都大于 20，三个中心值甚至高于 40。无疑，43 天振荡是该区最主要的振荡。大值中心分别位于：①长江流域，华南和东海；②南海，中南半岛和孟加拉湾；③印度半岛北部和巴基斯坦，北纬 20° 线和东经 90° 线大致上把这三个中心分隔开。从气候上看，长江流域和华南是夏季雨带活动最明显地区，它与西太平洋副高的活动有直接关系。南海，中南半岛则是夏季 ITCZ 活动的区域，它反映了半球之间系统的共同作用。

而印度季风槽的变化则与季风的活跃与中断密切相连。因此，三个振荡大值中心实质上反映了亚洲夏季风三个子系统的活动。印度季风的活跃不同于东亚季风，而东亚地区，大陆的季风系统与南海的季风系统在活动上亦彼此有一定的独立性。从图 2 还可看出，云南至华南沿海是一条低值带，这表明，尽管那里夏季风很活跃，但并不是活动中心，它们受来自不同季风环流系统的影响。

准 25 天振荡过去研究不多，周静亚等<sup>[6]</sup>指出过这种周期的存在。从方差贡献分布图(图 3)来看，其量值不大，且与季风活动区无明显的对应关系。几个相对大值中心分别在阿拉伯海、南海和黄海海区上，大陆地区为低值区。这种在海、陆上空的

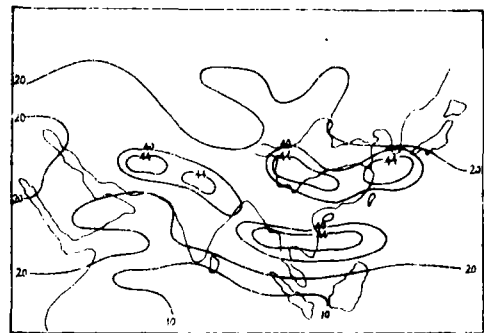


图 2 总能量准 40 天振荡方差贡献分布 (850—500hPa)

Fig.2 Variance contribution of quasi-40 days oscillation of total energy (850—500 hPa)

量值差异表明准25天振荡可能是一种海洋自身振荡对大气作用的反映。

图4为准双周振荡的方差贡献分布图。其量值远小于准40天振荡而略高于准25天振荡。方差大值区主要位于副热带，中心分别位于日本南部海域、中国西北地区和阿拉伯半岛北部。另外，在华中、缅甸、波斯湾和索马里各有一个次大值中心。然而，在季风活跃的印度半岛、中南半岛和中国华南沿海方差值都较小，这表明尽管亚洲夏季风区存在准双周振荡，但不是主要的振荡。

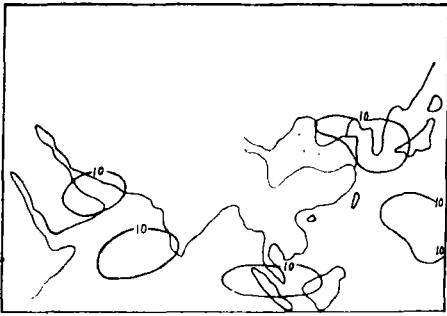


图3 总能量准25天振荡方差贡献分布  
(850—500hPa)

Fig.3 Same as Fig.2 but for quasi-25 days oscillation

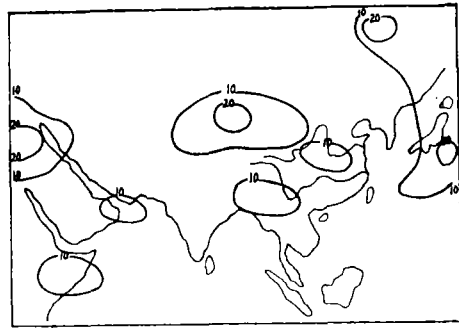


图4 总能量准双周振荡方差贡献分布  
(850—500hPa)

Fig.4 Same as Fig.2 but for quasi-biweekly oscillation

#### 4 总能量振荡的传播

利用两点间的位相滞后谱可确定振荡的传播，再用矢量合成法可得出逐点的振荡传播矢量。因为振荡可以向各方向传播，故在振源区传播矢量呈辐散状。准40天振荡方差贡献最大，下面以它为例，讨论在不同层次上振荡源、汇的分布，传播规律及其气候学意义。

图5a,b,c分别是准40天振荡在850, 700和500hPa层的传播图。图中最显著的特征是在亚洲夏季风区的“丁”字形汇合线。纬向的一段从中国西南经华南直伸至西太平洋。经向的一段经南海折向中南半岛。比较汇合线在各层的位置还发现，纬向一段随高度增加由华南沿海北移至长江流域，而经向一段则逐渐转为东北—西南向，尾部伸至孟加拉湾。沿着汇合线，传播矢量主要是由西向东，由南向北。在“丁”字形汇合线各侧均为辐散区（振荡源），源区在各层的位置少变。东部一个在南海——菲律宾海，振荡向西北方向传播为主。北边的中心位于华北和黄海，以向南传播为主。西边的辐散区较分散，分别在阿拉伯海、孟加拉湾和巴基斯坦附近。西边各辐散区之间也有相应的汇合线，其中以印度半岛上的一条较明显。振荡辐散区大致与振荡方差贡献大值区相对应，反映了该地区能源中心的活动。换言之，中纬地区的斜压能，西太平洋，孟加拉湾地区的潜热能和南亚地区的感热能，它们自身存在着周期性振荡且向外传播。从振荡辐散区的地理分布亦可反映出各季风环流系统的影响范围。以700hPa层为例，印度半岛的辐散区表明了印度季风系统的存在，长江以北地区受华北辐散区控制，反映了中纬度系统

的活动。而华南沿海、中南半岛东部、南海至西太平洋的辐散区则为南海季风环流的影响范围。值得一提的是缅甸、孟加拉湾湾头和中国云贵地区为另一个独立的振荡源区。尤丽钰等<sup>[7]</sup>曾提出孟加拉湾季风系统的概念。40天振荡源的存在支持了这种观点。

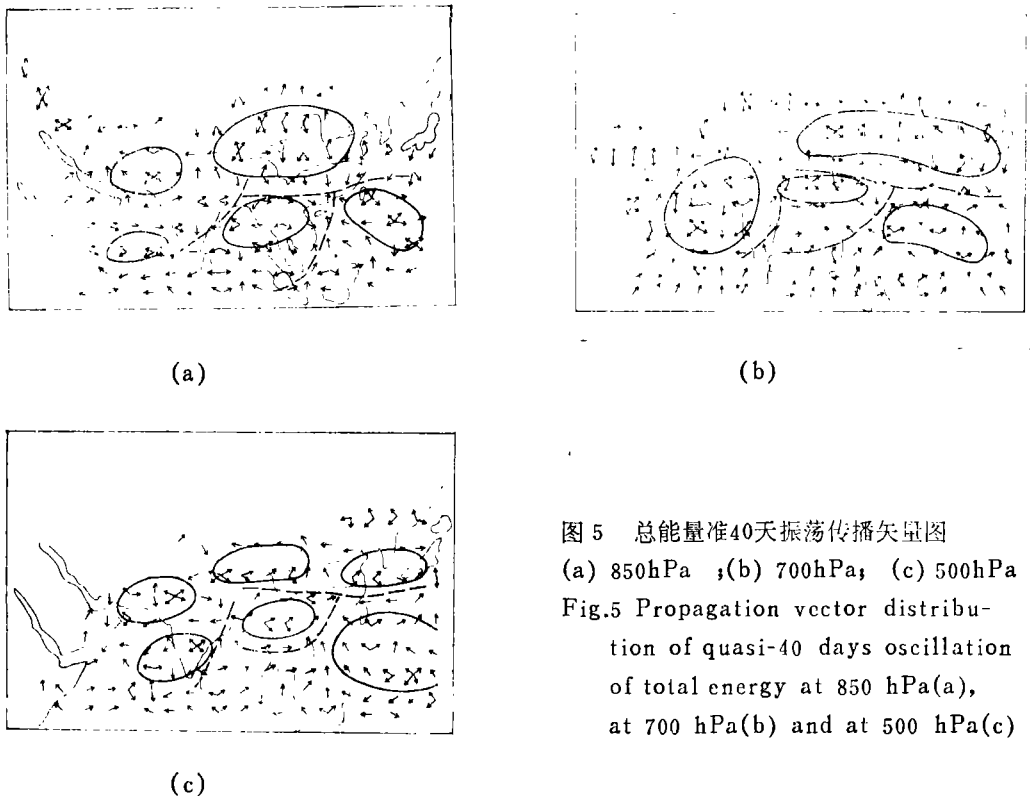


图5 总能量准40天振荡传播矢量图  
(a) 850hPa ;(b) 700hPa; (c) 500hPa  
Fig.5 Propagation vector distribution of quasi-40 days oscillation of total energy at 850 hPa(a), at 700 hPa(b) and at 500 hPa(c)

累计各格点间的位相滞后值,可以估算出总能量振荡的传播速度。计算结果表明,在振荡源区内各点间位相差都较小,即季风系统内振荡大体上是同步的。此外,在汇合线两侧传播矢量是相向的,而沿着汇合线传播基本上是向东和向北,相速也不大。如从印度中部至长江中游,700hPa层上位相差只落后大约一天。1979年印度季风爆发日期是6月18日,而入梅日期为19日,两者相差一天。若印度季风爆发与长江中、下游入梅期存在相关关系,则总能量振荡传播可能是这种遥相关的机制。即看成是能量传播的一种形式。印度季风爆发,造成总能量的增大,这种在大范围内几乎是同步的振荡沿着汇合线向东传播,在长江流域同其它能量系统的振荡相遇,激发成梅雨天气。因此,振荡辐散区反映了该地区相对稳定的环流系统的活动,而在汇合线附近,来自不同源区,具有不同振幅、位相的振荡相互叠加,造成天气的中期变化。汇合线是不同能量的交汇处,往往是天气活动强烈的地区。

从700hPa振荡传播图还发现,赤道附近有三条向北传播通道(140°E, 105°E和90°E),振荡可沿着通道从南半球传至印度和中国南部沿海,且都与夏季越赤道气流主要通道相一致。这表明总能量振荡的传播实质上就是水汽、动量的输送,即振荡传播本身就是物理量的传送过程。但在索马里急流(45°E)附近却无明显的振荡传播通道。

其原因可能是, 动能在总能量中占的比值小, 那里虽然风速大, 但冷海水的上翻使空气温度降低, 水汽含量减少, 因而反映不出总能量值传送通道的存在。

### 5 大气显热源与水汽汇谱分析

近年来已利用FGGE资料对1979年亚洲夏季风区的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 作了一定的研究。除详细讨论过热源的分布外, 亦对热源的振荡进行过探讨。Murakami等<sup>[8]</sup>(1984)分析了热源的40—50天振荡, 指出这种振荡向北、向东的传播是造成夏季风活跃、中断的原因。陈隆勋等<sup>[9]</sup>讨论过高原上空热源的准双周振荡, 发现它是仅次于季节变化的振荡。

与分析总能量振荡一样, 我们逐点, 逐层计算了 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的谱值。发现它们的功率谱都较小。谱值较大层次 $Q_1$ 在400hPa,  $Q_2$ 在700hPa, 这与最大值出现的层次一致。从谱值线(图6)可见, 短周期的功率谱较长周期的大,  $Q_2$ 的谱值比 $Q_1$ 的大, 这是因为显热源 $Q_1$ 系由大气净辐射、感热输送和潜热释放三项所决定, 一般而言, 净辐射(大气冷却)变化不大, 而感热与潜热是反相变化, 因而 $Q_1$ 变化较 $Q_2$ 几乎小一个量级。

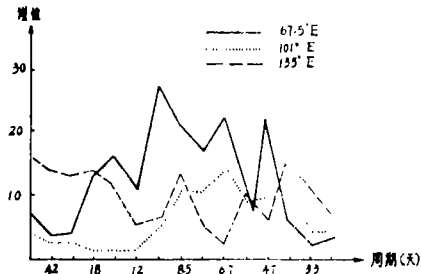
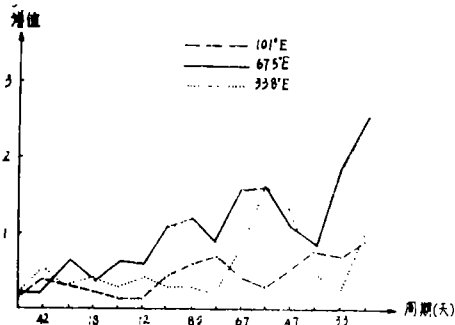


图6 (a)400hPa沿16.9°N $Q_1$ 功率谱;

(b)700hPa沿16.9°N $Q_2$ 功率谱

Fig.6 Power spectrum of  $Q_1$  at 400 hPa along 16.9°N(a), and of  $Q_2$  at 700 hPa along 16.9°N(b)

从图7可见, 方差值很小且较均匀, 准双周振荡大值区在黄河、长江的上游区和西亚大陆。准单周振荡的大值区与此相近, 只是分别稍向东和向南移。另外, 把图7 a, c与同年初夏 $Q_1$ 分布图<sup>[10]</sup>比较, 发现 $Q_1$ 的分布与振荡方差的分布差异很大。这表明大气显热源 $Q_1$ 在整个夏季期间相对较稳定,  $Q_1$ 分布对大气环流准定常状态的影响可能远比中期变化作用重要。 $Q_2$ 的振荡方差贡献中心与 $Q_2$ 的大值区有较好的对应, 两个中心分别在阿萨姆地区和华南—南海地区。水汽汇 $Q_2$ 是由潜热释放与蒸发耗热所确定, 后者变化很小, 因此 $Q_2$ 几乎是与降水量同步变化, 也自然与季风的中期变化相关。但在阿拉伯海附近,  $Q_2$ 的振荡有一个大值区, 原因尚需进一步探讨。

由于 $Q_1$ 在400hPa层,  $Q_2$ 在700hPa层振荡较明显, 下面以这两层为例讨论 $Q_1$ 和 $Q_2$ 准双周振荡的传播。 $Q_1$ 振荡本身不强, 但振荡源区仍相当清楚, 源区分别在印度—青藏高原, 中南半岛—南海, 华中—东海, 阿拉伯海和菲律宾海。把图8a与7月份 $Q_1$ 分布图<sup>[11]</sup>比对, 发现振荡源几乎都是大气显热源或汇。看来显热源振荡对大气环流的影响

主要是源区内几乎同步的振荡位相，而不是振幅。 $Q_1$ 振荡源区间的汇合线不明显，也不存在明显的从南半球向北半球的传播通道。然而 $Q_2$ 的振荡则不同（见图8b），主要振荡源在孟加拉湾和南海，与振荡方差贡献中心和 $Q_2$ 大值中心都重合。汇合线从中南半岛经华南伸至东海，那里正是东亚夏季雨带最活跃的地区。前已指出，来自不同源区的总能量振荡在汇合线上交迭，促成雨带的形成。 $Q_2$ 振荡汇合线则从水汽变化的角度反映了雨带的活动。 $Q_2$ 振荡有两条明显的越赤道向北传播通道，分别在 $85^\circ\text{E}$ 和 $105^\circ\text{E}$ 附近，亦与越赤道气流相一致，这表明越赤道气流对东亚夏季风系统的重要作用。掌握前期南半球越赤道气流的变化（对动量、能量和水汽输送），可为预测后期中南半岛、孟加拉湾和华南地区天气的变化提供依据。

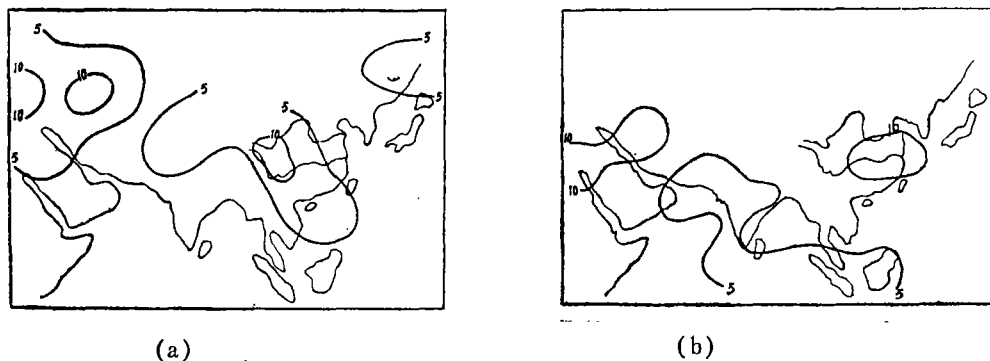


图7 准双周振荡方差贡献分布

(a)  $Q_1$ ; (b)  $Q_2$ ; (c)  $Q_1$  准单周振荡方差贡献分布

Fig.7 Variance distribution of  $Q_1$  quasi-biweekly oscillation

(a) of  $Q_1$  quasi weekly oscillation  
 (b) and of  $Q_2$  quasi-biweekly oscillation  
 (c) (850 hPa-100 hPa for  $Q_1$  and 850 hPa-400 hPa for  $Q_2$ )

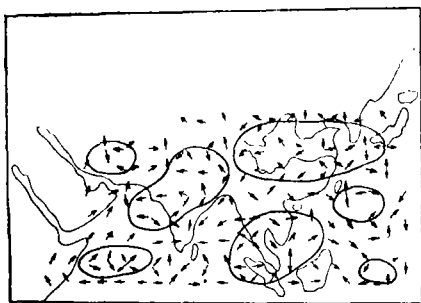
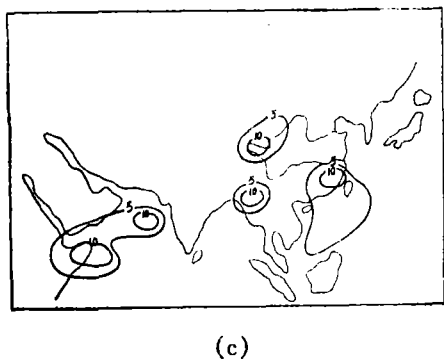


图8 准双周振荡传播矢量图

(a) 400hPa,  $Q_1$

(b) 700hPa,  $Q_2$

Fig.8 Propagation vector distribution of  $Q_1$  quasi-biweekly oscillation at 400 hPa (a) and of  $Q_2$  quasi-biweekly oscillation at 700 hPa (b)

## 6 小结

通过对亚洲夏季风区总能量, 显热源和水汽汇进行谱分析发现: ①大气中存在准40天, 准25天, 准双周和准单周振荡。其中准40天振荡方差贡献最大, 是亚洲夏季风区最主要的振荡。准25天振荡可能是海洋自身振荡对大气作用的反映。在垂直方向上, 中、下层大气的振荡较上层明显, 表明夏季风活动主要在对流层中、下层之中。②总能量振荡有三个明显的振荡中心, 反映了在印度、南海和中纬大陆三个季风系统的活动。振荡从振荡源向外传播, 不同位相振荡的交汇造成汇合线上天气系统的活跃。这可能是中国南方雨带以及印度—孟加拉湾地区季风雨的形成机制之一。③振荡沿汇合线传播方向大致是向东, 向北。但东亚季风区内传播方向为西北向, 中纬地区传播方向为向南。总能量与 $Q_2$ 振荡有明显的越赤道向北传播通道。它们对东亚季风区降水的变化有重要的影响。④大气显热源 $Q_1$ 与水汽汇 $Q_2$ 的振荡较弱, 只是 $Q_1$ 在400hPa,  $Q_2$ 在700hPa层上有稍强的短周期(双周以下)振荡,  $Q_2$ 准双周振荡在南海有明显的方差大值区和辐散传播源, 表明了南海热源的重要性。

上述讨论只限于对1979年夏季风振荡的分析, 尚难反映常年的状态。

## 参 考 文 献

- [1] Krishnamurti T.N. and H.N. Bhalme, *J. Atmos. Sci.*, 33(1976), 1937—1954.
- [2] Yasunari, *J. Met. Soc. Japan*, 57(1979), 3, 227—242.
- [3] Murakami T. and T. Nakazawa, *J. Atmos. Sci.*, 42(1985), 1107—1122.
- [4] 金祖辉、陈隆勋, 全国热带夏季风学术会议文集—82, 云南人民出版社, 昆明, 1983, p. 204—217.
- [5] 沈如桂等, 全国热带夏季风学术会议文集—82, 云南人民出版社, 昆明, 1983, p. 137—146.
- [6] 周静亚等, 热带气象, 2(1986), 3, 195—203.
- [7] 尤丽钰等, 长江流域暴雨文集, 气象出版社, 北京, 1982, p.60—71.
- [8] Murakami T., T. Nakazawa and He, *J. Met. Soc. Japan*, 62(1984), 6, 469—484.
- [9] Chen L.X., E. Reiter and Feng Z. Q., *Mon. Wea. Rev.*, 113(1985), 10, 1771—1790.
- [10] Luo H. B. and M. Yanai, *Mon. Wea. Rev.*, 112(1984), 5, 966—989.
- [11] 陈隆勋等, 全国热带夏季风学术会议文集—81, 云南人民出版社, 昆明, 1983, p.86—101.

## A Spectrum Analysis of the Atmospheric Energy Over the Asian Summer Monsoon Areas

*Shen Rugui Feng Zhiqiang Feng Tao*

(Department of Atmospheric Sciences Zhongshan University)

### Abstract

Using the FGGE-III(b) data of 1979, this paper analyzed the spectrum structure of the total energy, the apparent heat source and the moisture sink over the Asian summer monsoon areas. The spectrum distribution for different periods and the propagation of oscillations are investigated. It is found that these distribution and propagation have their synoptic and climatologic meaning, when they are compared with the summer monsoon circulation.

The results also show that the quasi-40 days oscillation is the most significant one in these areas. The distribution of spectrum variance and the propagation pattern indicate the independence of the monsoon systems over India, the Bay of Bengal, the South China Sea and the continental East Asia. Different monsoon systems are dominant in different areas, respectively. For instance, the midlatitude system is dominant in north China north of the Yangtze River, the coastal area in south China is controlled by the monsoon of the South China Sea, and the southwest China, such as Yunnan, is mainly influenced by the monsoon of the Bay of Bengal. Near the equator, there are some passages for propagating oscillations of the total energy and moisture, which are consistent with those for the northward cross-equatorial flows. However, such a feature does not belong to the oscillation of apparent heat source of the atmosphere, which makes its contribution mainly to the quasi-stable state of the atmospheric general circulation.

**Keywords** atmospheric total energy, atmospheric apparent heat source, atmospheric moisture sink; spectrum analysis, atmospheric oscillations; monsoon circulation, Asia