

# 亚洲夏季风结构和变动与大气运动流场的 斜压和正压特征: 正压模分析\*

管兆勇 徐建军 哈承智

(南京气象学院, 南京, 210044)

## 摘 要

使用 ECMWF 1980—1986 年 7a 格点资料对大气运动的正压模进行了分析。指出: 对流层中大气正压运动流场显示的副热带高压带仅能反映出行星风带的季节性移动; 与亚洲夏季风有关且反映季风局地性的则是副热带高压带南侧的东风带上的波状扰动; 东风带上的经向风分量存在着纬向传播且传播方向和扰动幅度与印度、东亚季风子系统有关; 随着北半球夏季的到来, 亚洲季风区大气运动的斜压模有较大的增长且斜压运动动能占气柱内整层平均总动能的绝大部分, 而在赤道附近的其他经度上则是正压运动动能的成分明显增长。

关键词: 亚洲夏季风, 正压和斜压模, 诊断分析。

## 1 引 言

季风是由海陆热力差异, 行星风带的季节性位移和大地形共同作用的结果<sup>[1-3]</sup>。季风不但具有地面盛行风季节性反转, 高空风季节性改变<sup>[1]</sup>, 而且风速风向随高度具有较大的变化甚至气流方向相反, 这正反映出季风流场具有较强的斜压性。即使是低频时间尺度上的运动分量也具有明显的斜压特点<sup>[4]</sup>。因此, 提取斜压模用以分析季风的内在结构和变动具有重要意义。分析表明<sup>[5]</sup>, 亚洲夏季风的建立与稳定与该地区大气运动的斜压模增长有关; 流场斜压分量的变化可反映出夏季风的进退; 斜压分量强弱的水平分布显示出夏季亚洲地区为一强斜压区。由于大气运动由正压与斜压两部分构成, 所以, 除了分析斜压模之外, 尚需对正压模进行分析。那么, 大气运动的正压分量具有什么样的空间分布? 正压流场与夏季风变动的关系如何? 它与斜压分量的比较有什么结果? 这些问题将在文中讨论。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

采用 1980—1986 年 ECMWF (欧洲中期预报中心) 逐日格点资料, 包括  $u$  (纬向风)、 $v$  (经向风)、 $H$  (位势高度)、 $T$  (温度) 等, 地形资料取自文献[6]。

### 2.2 方法

\* 初稿时间: 1995 年 9 月 20 日; 修改稿时间: 1996 年 4 月 26 日。

资助课题: 国家自然科学基金(编号 49375250)。

对于物理量  $u, v$ , 其垂直方向上的平均值为

$$\bar{u} = \frac{1}{p_s - p_T} \int_{p_T}^{p_s} u dp, \bar{v} = \frac{1}{p_s - p_T} \int_{p_T}^{p_s} v dp \quad (1)$$

这里  $p_s$  为地面气压,  $p_T$  为上边界等压面气压, 取  $p_T = 1000\text{hPa}$ 。这样  $\bar{u}, \bar{v}$  表示了对流层中运动速度随高度不变的部分, 按通常对正压运动的理解, 将  $\bar{u}, \bar{v}$  看成是正压模部分。大气运动的斜压模部分则可写为<sup>[5]</sup>

$$u = u - \bar{u}, \quad v = v - \bar{v} \quad (2)$$

正压流场的流速大小为

$$\bar{V} = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

斜压运动速度的平均大小为

$$V_B = \int_{p_T}^{p_s} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} dp / (p_s - p_T) \quad (4)$$

斜压运动动能  $K_{BC} = \frac{1}{2} \int_{p_T}^{p_s} (u^2 + v^2) dp / (p_s - p_T)$ , 正压运动动能是  $K_{BT} = \frac{1}{2} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$ ,

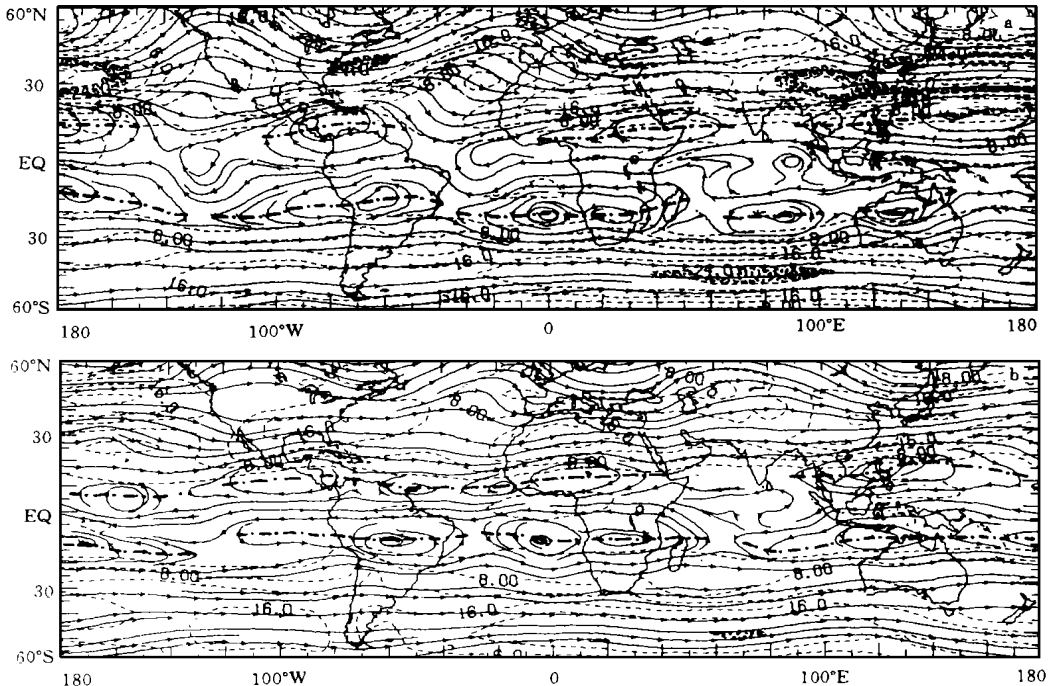
气柱内整层平均动能是  $\bar{K} = K_{BC} + K_{BT}$ 。定义比例参数  $\sigma$

$$\sigma = \frac{K_{BT}}{\bar{K}} \times 100\% - 50\% \quad (5)$$

$\sigma > 0$  则表示正压运动强, 而  $\sigma < 0$  则表示斜压运动强。

文中的所有计算均在将格点资料处理成候平均或月平均(再进行多年平均)后进行。

### 3 季风与正压流场



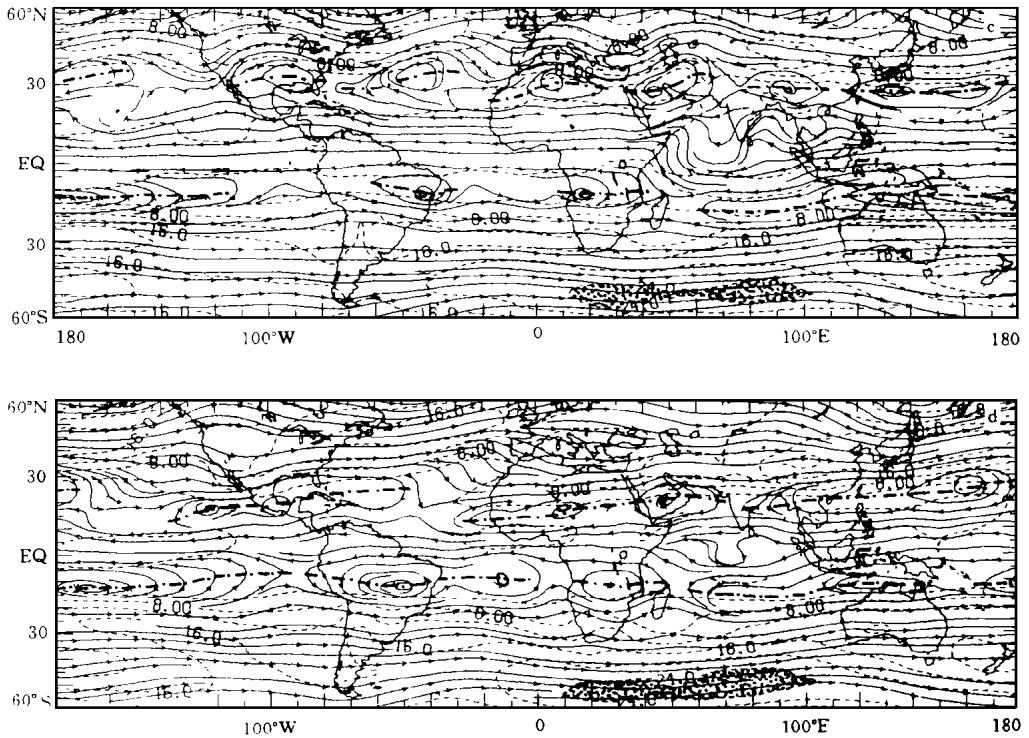


图1 正压流场及正压运动速度(虚线为等值线)的水平分布

(a. 1 月份; b. 4 月份; c. 7 月份; d. 10 月份。点划线为副热带高压脊线, 点影区表示  $V > 24\text{m/s}$ , 等值线间隔  $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

亚洲季风是行星尺度局地环流现象, 其变化必然具有局地特征。如果在多年平均的月平均流场中提取正压模, 那么正压流场的变化是否与亚洲夏季风之间存在联系呢?

图1给出了正压流场的流线分布及流速分布。由图看出, 对流层整层平均流场可反映大气环流的一般特征: 低纬地区存在东风带, 副热带高压带, 中高纬存在西风带。正压气流的最强处位于南北半球的东半球中纬度地区。

由于南北半球海陆分布和非绝热加热的作用, 正压环流存在明显的季节性调整。急流在北半球夏季明显减弱且位置北移。

需要强调的是, 副热带高压带具有整体性的季节性经向移动。因而正压环流能够反映行星风带的季节性调整。副热带高压带向北移动最为显著的时间是6月份(图略)。对于亚洲地区, 副热带高压带与其他经度上的副热带高压带一样处于同一纬度且随季节变化而调整。因而副热带高压带的移动并不能反映亚洲季风的局地性环流变化特征。而在正压流场图上, 亚洲的特殊性反映在哪里呢? 由图1c知, 北半球副热带高压带的南侧存在着平直的东风气流(20—120°E地区除外)。在亚洲的低纬地区, 存在着东风带上的波状流型, 这是该地区特有的现象。它的形成不能单纯使用正压位势涡度方程在地形存在的情况下进行解释, 而需要考虑地形、非绝热加热率及其他因素的作用。亚洲低纬地区东风气流

上的波扰特征实际上自 5 月份开始一直延续到 9 月份。

因此,正压模分析揭示出:副热带高压带的季节性北移主要反映行星风带的季节性调整,这种季节性调整与亚洲局地区季节环流具有一定的联系。副热带高压南侧的东风气流在亚洲地区则有明显的纬向扰动,它的存在与夏季风时期相对应。

由于北半球季夏亚洲低纬地区存在东风扰动,取经向风的正压模制作了时间-经度剖面,用以揭示这一地区的扰动是否具有纬向传播和亚洲季风结构。

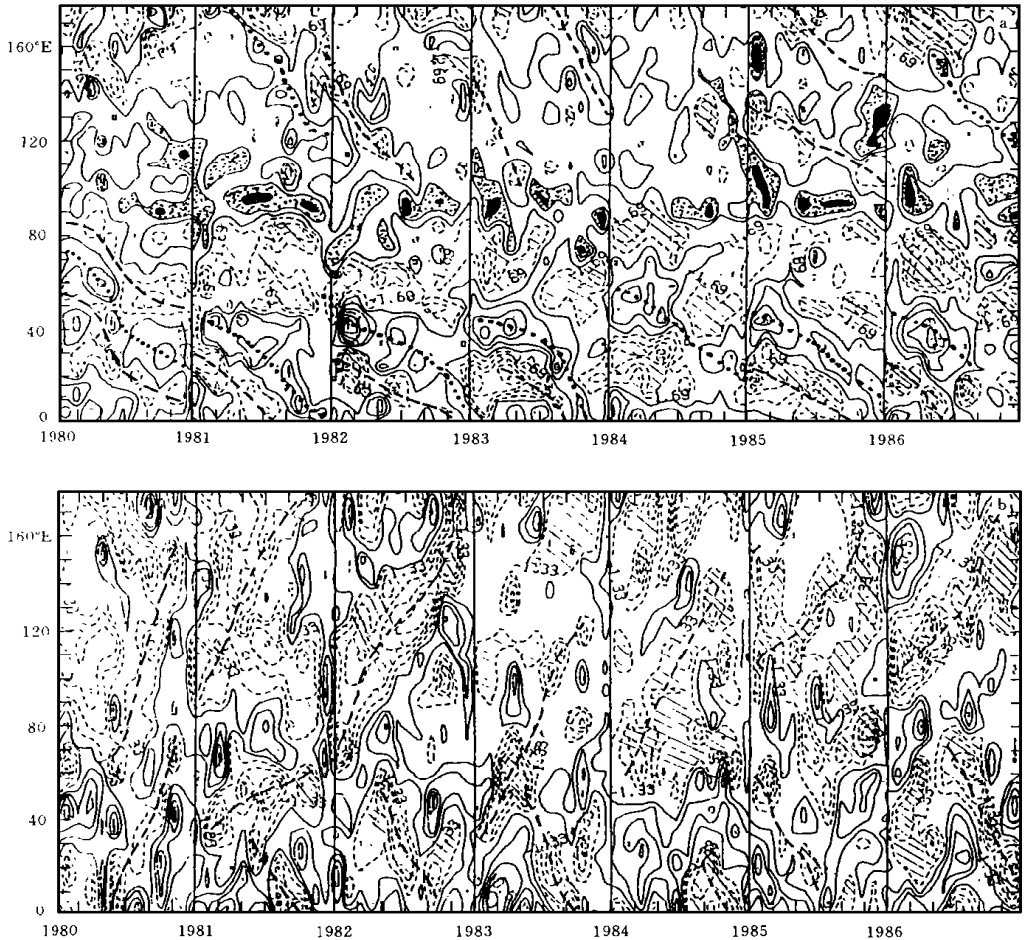


图 2 1980—1986 年 5—6 月逐候经向风正压分量在赤道及 20°N 处的变化

(a. 赤道地区,斜线区数值  $-1.69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,等值线间隔  $1.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

b. 20°N 地区,斜线区数值  $-1.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,等值线间隔为  $2.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

首先,据图 2a 讨论赤道气流的变化情况。亚洲夏季风环流系统中重要成员之一是越赤道气流,它的存在和变化在南北半球间的相互作用及亚洲季风的形成、维持和变化中起着极为重要的作用。关于越赤道气流有过许多研究<sup>[7]</sup>,但就整层平均情况来说,越赤道气流怎样变化还不清楚。这里从正压模分析角度出发来研究 5—6 月与亚洲低纬地区东风带上扰动相联系的(图 1c)越赤道气流变化情况。为叙述简便,将南向北的越赤道气流记为

SNF, 而由北向南的越赤道气流则为 NSF。

由图 2a 看出, 比较稳定的 SNF 区域出现在 40 E 和 90 E 附近, 而 NSF 区域则主要在 20 E, 60 E 附近。在 100 E—180 这区间内, 越赤道气流相对较弱且不够稳定, 也就是较大的经向风扰动主要出现在 0—100 E 之间, 这与图 1c 所示平均状况相一致。越赤道气流的强度、位置在不同的时间和不同的年份都有不同。在同一年份里, 扰动具有自东向西传播的趋势, 这种传播主要出现在赤道上空 80 E 以西的地区, 它可能与赤道地区重力罗斯贝混合波有关。由图看出 100 E 两侧的大气扰动程度是不同的, 它正对应于东亚夏季风系统与印度季风系统<sup>[8]</sup>。

在 20 N 地区, 经向风扰动分量具有明显的纬向传播。在 100 E 以东主要向东传播而在 80 E 以西则主要是向西传播。这也反映了东亚夏季风与印度夏季风子系统的存在。

与这些经向风分量的传播相应, 月平均图上(图 1c)的亚洲低纬地区的波扰存在着低频时间尺度上的强弱和位置变动。同时, 产生于孟加拉湾上空的扰动将具有明显的东传, 从而对东亚季风产生影响。

#### 4 正压模与斜压模的比较

前面指出, 正压流场上副热带高压带的季节性移动不能反映出亚洲夏季风的局地性。

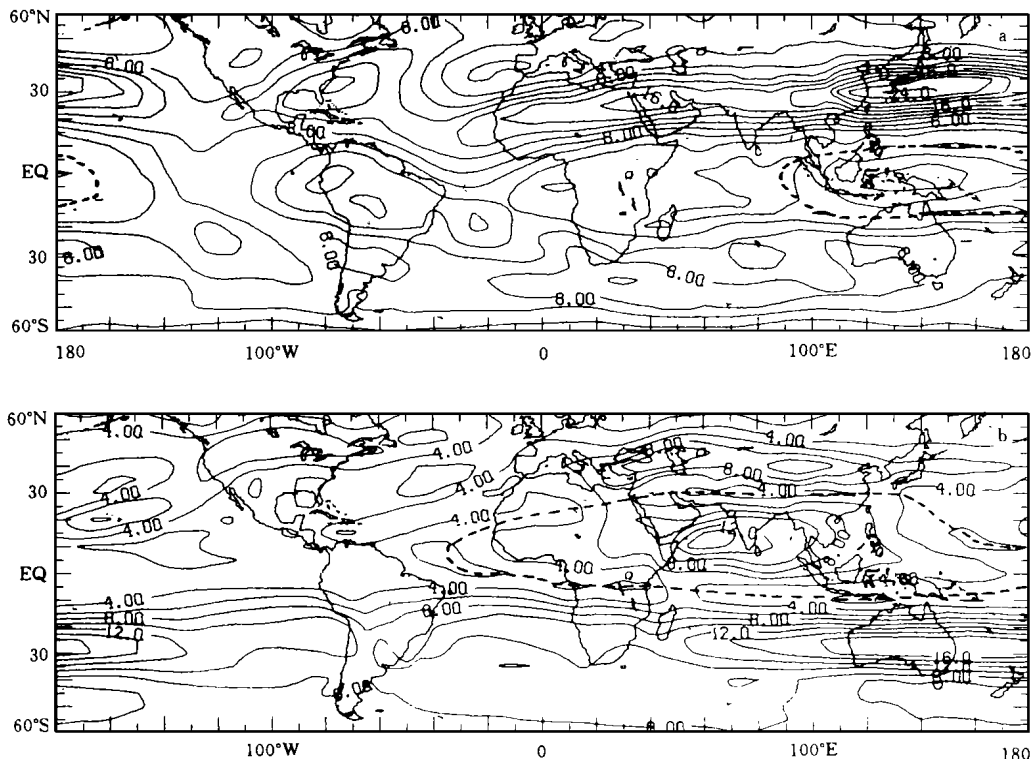


图 3 斜压模大小  $V_B$  的水平分布

(a. 1 月份; b. 7 月份。等值线间隔  $2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 虚线为  $V_B$  极小值的连线)

能反映亚洲季风局地性的只是副热带高压带南侧东风气流上的波状扰动, 虽然这些波扰动随时间具有强弱变化或纬向传播。与正压模相比较, 斜压模具有什么样的反映呢?

按式(4) 计算出的气柱内平均斜压运动速度  $V_B$  的水平分布如图 3 所示。由图看出, 在东半球冬季(1 月份), 中纬度地区为一强斜压带所控制, 而位于澳大利亚北侧还存在另一  $V_B$  大值区。根据大气环流的基本知识, 这两个大值区分别处于西风带和东风带之中。随着北半球夏季的到来, 斜压西风带逐步北退和减弱。而低纬地区的  $V_B$  大值区则逐步向西北移动并在 5 月份之后加强, 或者说整个亚洲季风区斜压运动得到了重新加强, 至 7 月份, 为一椭圆型的  $V_B$  大值区所控制, 这一椭圆区域反映了亚洲夏季风的基本范围, 也反映了东亚季风与印度夏季风的内在统一与联系。显然, 与正压模相应的流场分析相比较, 斜压模更能反映夏季风的存在或局地性。

既然正压、斜压模在反映大气环流的季节变化和夏季风进退之中有不同的作用, 那么, 斜压、正压运动动能具有什么样的比例和季节变化呢?

按照公式(5), 计算了正压动能与斜压运动动能的比例。当  $\sigma = 0$  时表示气柱内平均(按高度)斜压、正压动能相等。若  $\sigma < 0$  且  $\sigma = 40\%$  时, 表示斜压运动动能占总动能的 90%。图 4 给出了正压运动动能占总动能的百分率  $\sigma$ 。

由图看出, 不论是北半球还是南半球, 冬夏两季在中纬度地区均以正压运动为主, 在

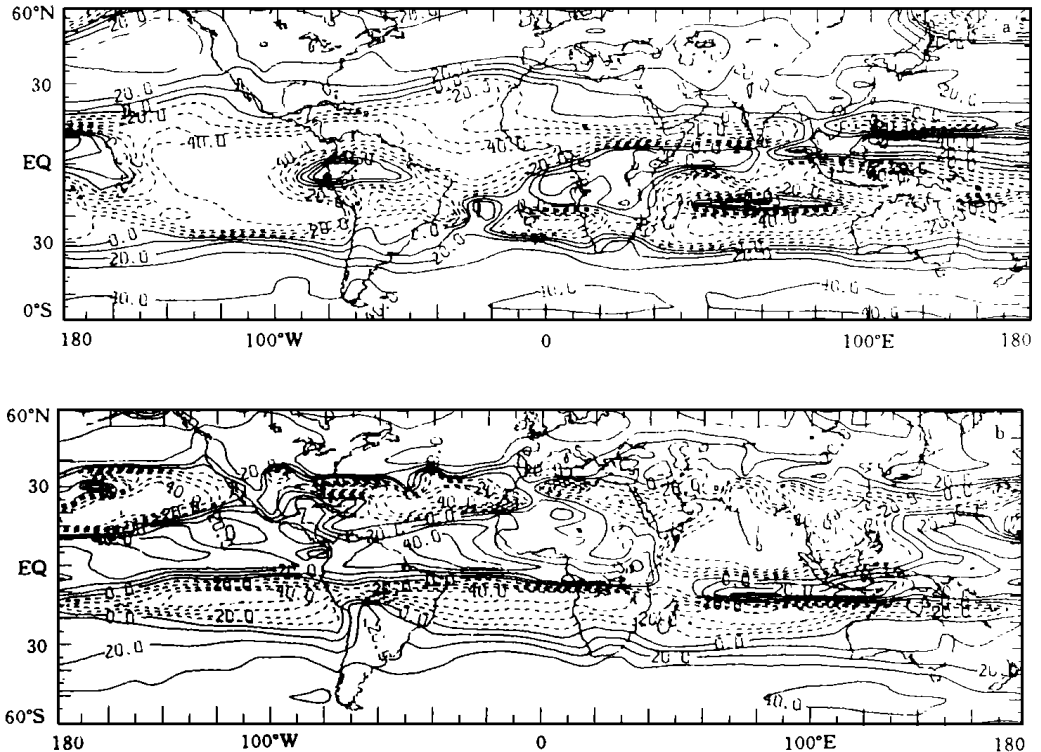


图 4 正压运动动能占气柱内总动能(按高度平均)的百分率(以 50% 作为零等值线)  $\sigma$

(a. 1 月份; b. 7 月份。等值线间隔 10%; 实线为  $\sigma = 0$ , 虚线表示  $\sigma < 0$ )

某些地区甚至  $\sigma = 40\%$ ; 也就是正压动能占整层平均动能的 90% 以上。在热带地区, 情况则不同。1 月份, 15°N 及 20°S 附近存在一斜压带, 在赤道附近存在几个正压运动大值区。在东半球, 正压、斜压运动强弱对比存在比较复杂的水平结构。

7 月份, 赤道附近(40—140°E 除外) 正压运动加强且在海洋上空  $\sigma = 40\%$ 。与这一特征形成明显的对比, 在亚洲季风区, 大气运动的斜压动能的比例反而得到增长, 在一片较大的水平范围内  $\sigma = 40\%$ , 亦意味着在亚洲季风区的低纬地区斜压运动动能占了总动能的绝大部分。因此, 亚洲夏季风时期, 斜压模有了明显的增长并且斜压分量成为该地区大气运动中的主要部分。

由此看来, 在对低纬地区大气运动作用动力学描写时, 夏季 7 月份季风区外的地区可用正压模式作近似而季风区则需用斜压模式, 对于北半球 15—30°N 的纬带斜压模式是合理的。冬季(1 月份), 描写热带大气运动用斜压模式可能更好。

## 5 结 语

综上所述知:

(1) 对流层中大气运动的正压模的水平分布反映出西风带、东风带及副热带高压带具有明显的季节变化。副热带高压带与季风环流具有一定的联系, 但主要的是反映行星风带的季节性移动。

(2) 在北半球热带东风带上, 夏季在亚洲地区存在着波状扰动, 它亚洲夏季风相应; 在候平均图上, 正压运动的经向风分量在东半球赤道及低纬(北纬)地区存在着纬向传播并反映出印度季风与东亚季风系统的存在。

(3) 随着北半球夏季的到来, 亚洲季风区大气运动的斜压模有较大的增长且斜压运动动能占大气运动(气柱内整层平均)总动能的绝大部分, 而在赤道附近的其他经度则是正压动能的成分明显增加。这为低纬度地区大气运动动力学模型的简化提供了观测依据。

需要说明的是文中在分析中时, 对因边界摩擦而引起的水平动量的垂直变化给予特别考虑。事实上, ECMWF 资料中仅有一层(850hPa 之下)资料位于边界层内; 且假定在大尺度运动分析中, 边界层分析的结论(风随高度的变化规律在赤道以外( $\varphi > 7^\circ$ )的地区)成立。

## 参考文献

- [ 1 ] Ramage C S. Monsoon meteorology. New York and London: Academic press, 1971. 6- 20.
- [ 2 ] 张家诚. 大气环流的季节变化和季风的科学概念. 全国热带夏季风学术会议论文集. 云南: 云南人民出版社, 1983. 1—9.
- [ 3 ] 朱乾根, 胡江林. 青藏高原大地形对夏季大气环流和亚洲夏季风影响的数值试验. 南京气象学院学报, 1993, 16: 120—129.
- [ 4 ] Krishnamurti T N, Sulochana Gadgil. On the structure of the 30 to 50 day mode over the globe during FGGE. Tellus, 37A, 1985, 4: 336- 360.
- [ 5 ] 管兆勇, 徐建军, 郭品文, 王川. 亚洲夏季风结构和变动与大气运动的斜压和正压特征: 斜压模分析. 气象学报, 1997, 55( 2 ): 146—153.
- [ 6 ] Louis Berkofsky and Eugene A Bertoni. Mean topographic charts for the entire earth. Bull Amer Meteor Soc,

1955, 36: 350–355.

- [ 7 ] Li Zengzhong and Lou Guangpin. A study of the eastern Hemisphere Cross-equatorial flow during the northern summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1987, 11: 363–371.
- [ 8 ] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 8—13.

## THE STRUCTURE AND VARIATIONS OF ASIAN SUMMER MONSOON REVEALED BY BAROTROPIC AND BAROCLINIC MODES: THE BAROTROPIC CHARACTERISTICS

Guan Zhaoyong Xu Jianjun Ha Chengzhi

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044*)

### Abstract

By using the observational data, the relationships between the barotropic mode of the atmosphere and the structure/time evolution of Asian summer monsoon have been investigated. It is pointed out that the subtropic high belt revealed by barotropic mode of air flow in troposphere can only show us that the planetary wind belt moves seasonally in meridional direction. Something which is associated with Asian summer monsoon and makes us know where the summer monsoon could probably be is the wavelike disturbance on eastlies of subtropic high. Both the directions in which the meridional component of barotropic flow in eastlies propagates zonally and the amplitude of meridional wind disturbances are closely related to the subsystems of India and East-Asian monsoon. When summer comes, the baroclinic mode grows rapidly in Asian monsoon area. The main part of total kinetic energy averaged over a whole air column in troposphere is the energy of baroclinic motion. In equatorial region beyond the monsoon area, the barotropic mode grows quickly when the summertime is coming in Northern Hemisphere.

**Key words:** Asian summer monsoon, Barotropic and baroclinic modes, Diagnostic analysis.