

## 1979年7月热带地区的动能平衡\*

陈 受 钧

(北京大学, 地球物理系)

U. C. 穆 哈 蒂

(大气科学中心, 印度技术学院, 印度)

### 提 要

应用欧洲中期预报中心的 FGGE III-b 客观分析资料计算了 1979 年 7 月热带大气的动能平衡。热带环流系统的动能主要集中在定常涡旋部分。对流层下层, 105°E 和 150°E 为两半球间瞬变涡旋的通道。对流层上层, 瞬变涡旋的通道和洋中槽相联系, 位于 150°E 和 30°W 附近。

索马里急流是对流层下层制造动能的主要环流系统。对流层上层, 南亚东风急流入口区制造动能, 出口区破坏动能, 其动能收支与中纬度西风急流相似。

非洲-阿拉伯海季风区和孟加拉湾-南海季风区的动能平衡很不相同。动能的垂直输送可能在季风环流中很重要。

### 一、引 言

大气中动能平衡的诊断有过不少工作<sup>[1,2]</sup>, 但大部分都局限于中高纬度的有限区域。在热带, 常规的记录稀少, 等压面高度的观测精度较差, 而动能的诊断需要准确的风场和质量场的观测资料和分析。所以在热带地区估计动能的收支是很困难的。

FGGE III-b 是目前最好的分析资料。不仅应用常规的观测资料, 而且还收集了飞机, 浮标站和卫星遥感等非常规资料<sup>[3]</sup>。对欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 处理的 FGGE III-b 作的天气、气候研究表明质量是可靠的<sup>[4]</sup>。ECMWF 编辑的 FGGE III-b 资料有两种, 单纯客观分析的 and 经过初值化和四维同化后的。在资料稀少地区, 四维同化后的格点分析更多的依赖于初值化和数值模式。ECMWF 的绝热非线性正规波初值化方法在低纬度遏止了在动能平衡中极为重要的风的散度部分<sup>[3]</sup>。所以本文应用的是客观分析数据。这种资料中风场与质量场之间可能有不一致的地方。但从计算结果来看是基本合理的。

诊断区域为 20°S—45°N。1979 年 7 月每日取 00 GMT 一个时次。格距 3.75 经度/纬度。垂直方向 9 层, 即 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 200, 150 和 100 hPa。由于分辨率较粗, 只能得到大尺度运动动能收支的特征。在热带地区, 中尺度对流系统对于动能收支可能起重要作用<sup>[5]</sup>。但在目前资料条件下, 不可能在大范围的热带区域内对这个问题作较深入的研究。

\* 本文于 1986 年 8 月 11 日收到, 1987 年 7 月 29 日收到修改稿。

## 二、平均动能、平均运动动能和瞬变动能

以 $(\bar{\quad})$ 表示月平均。 $(\quad)' = (\quad) - (\bar{\quad})$ 为对平均的偏差。平均动能 $\bar{K}$ ，平均运动(定常涡旋)动能 $K_M$ 和瞬变动能 $K_T$ 分别为： $\bar{K} = \frac{1}{2}(\overline{u^2 + v^2})$ ， $K_M = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$ 和 $K_T = \frac{1}{2}(\overline{u'^2 + v'^2})$ 。它们之间有如下关系：

$$\bar{K} = K_M + K_T$$

夏季，热带地区对流层下层最显著的环流特征是在东非海岸有一支越赤道气流——索马里急流。这支越赤道气流在阿拉伯海上空转向东流过印度次大陆一直伸展到南海，即西南季风。另一方面，在海洋上随着副热带高压北移，东北信风发展。图1为850 hPa上 $\bar{K}$ ， $K_M$ 和 $K_T$ 的分布。 $\bar{K}$ 分布的最明显特征是在 $30^\circ\text{E} - 60^\circ\text{E}$ 之间从 $15^\circ\text{S}$ 起向北越过赤道后再转向东的一个大值区。其最大值达 $230 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ，相当风速 $21 \text{ m s}^{-1}$ 。这一特征是和索马里急流相联系的。 $K_M$ 的分布和 $\bar{K}$ 很一致。索马里急流的 $K_M$ 与 $\bar{K}$ 有近于同样形式的分布与数值。两大洋上信风带的 $K_M$ 值约为 $\bar{K}$ 的0.9左右。说明热带地区对流层下层环流是以定常涡旋为主要特征。

$K_T$ 的分布很有规律。天气学分析发现夏季在 $90^\circ\text{E} - 105^\circ\text{E}$ 之间有一支越赤道气流<sup>[6]</sup>。王作述等在分析夏季西太平洋低空环流时强调 $150^\circ\text{E}$ 新几内亚岛附近越赤道气流的重要性<sup>[7]</sup>。在 $K_T$ 分布图上， $90^\circ\text{E} - 105^\circ\text{E}$ 和 $130^\circ\text{E} - 160^\circ\text{E}$ 之间都是相对大值区( $\sim 20 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ )。说明这两支越赤道气流是瞬变涡旋性质的，这两个区域可视为南北半球间瞬变波的通道。另一方面，索马里急流的 $K_T$ 在 $5 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 左右，仅为其 $K_M$ 的1/20。表明这支急流是准定常的，这个区域内半球间相互作用以定常涡旋为主。

孟加拉湾，南海和菲律宾以东洋面上是 $K_T$ 的大值区，也是热带扰动和热带风暴活跃区。瞬变涡旋主要发生在强西南气流的东北侧，这和中纬度西风急流下游为 $K_T$ 大值区<sup>[8]</sup>相似。阿拉伯海上空 $K_T$ 在 $5 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 以下，表明这个区域季风的动力性质和孟加拉湾—南海的是不同的。

非洲大陆上空 $K_T$ 达 $20 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ，成为一个瞬变涡旋的源区。这种瞬变涡旋的重要性已经有过一些研究<sup>[9]</sup>。

200 hPa上北半球热带环流的主要特征是亚洲南部的东风急流及其北的南亚高压和太平洋、大西洋副热带区域的洋中槽<sup>[10]</sup>。图2a为200 hPa上 $\bar{K}$ 的分布，大致上和环流的主要特征相似。一个 $\bar{K}$ 大值区沿 $15^\circ\text{N}$ 从西太平洋向西延伸到非洲，最大值在印度中部，达 $250 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ，相当风速 $22 \text{ m s}^{-1}$ 。Chen计算的1976年夏季200 hPa上 $\bar{K}$ 最大值位于 $5^\circ\text{N}$ <sup>[11]</sup>，而1978—1983年7月平均东风急流位于 $10^\circ\text{N}$ <sup>[12]</sup>。南亚东风急流的年际变化是显著的。在东太平洋和东大西洋副热带地区各有一个东北—西南向的 $\bar{K}$ 大值区，这和洋中槽前的强西南气流相联系，也和Chen的结果一致。 $K_M$ 的分布和 $\bar{K}$ 相似(图2b)，尤其是在东风急流区， $K_M$ 约为 $\bar{K}$ 的0.95左右，说明对流层上层低纬度地区环流是以波数为1的定常涡旋为主要特征。在西太平洋( $10^\circ\text{N} - 20^\circ\text{N}$ ,  $140^\circ\text{E} - 170^\circ\text{E}$ ) $K_T$ 有一个大值区。这一区域位于太平洋中部槽的南端，是对流层上层的涡旋运动活跃区。Sadler<sup>[13]</sup>曾指出，这

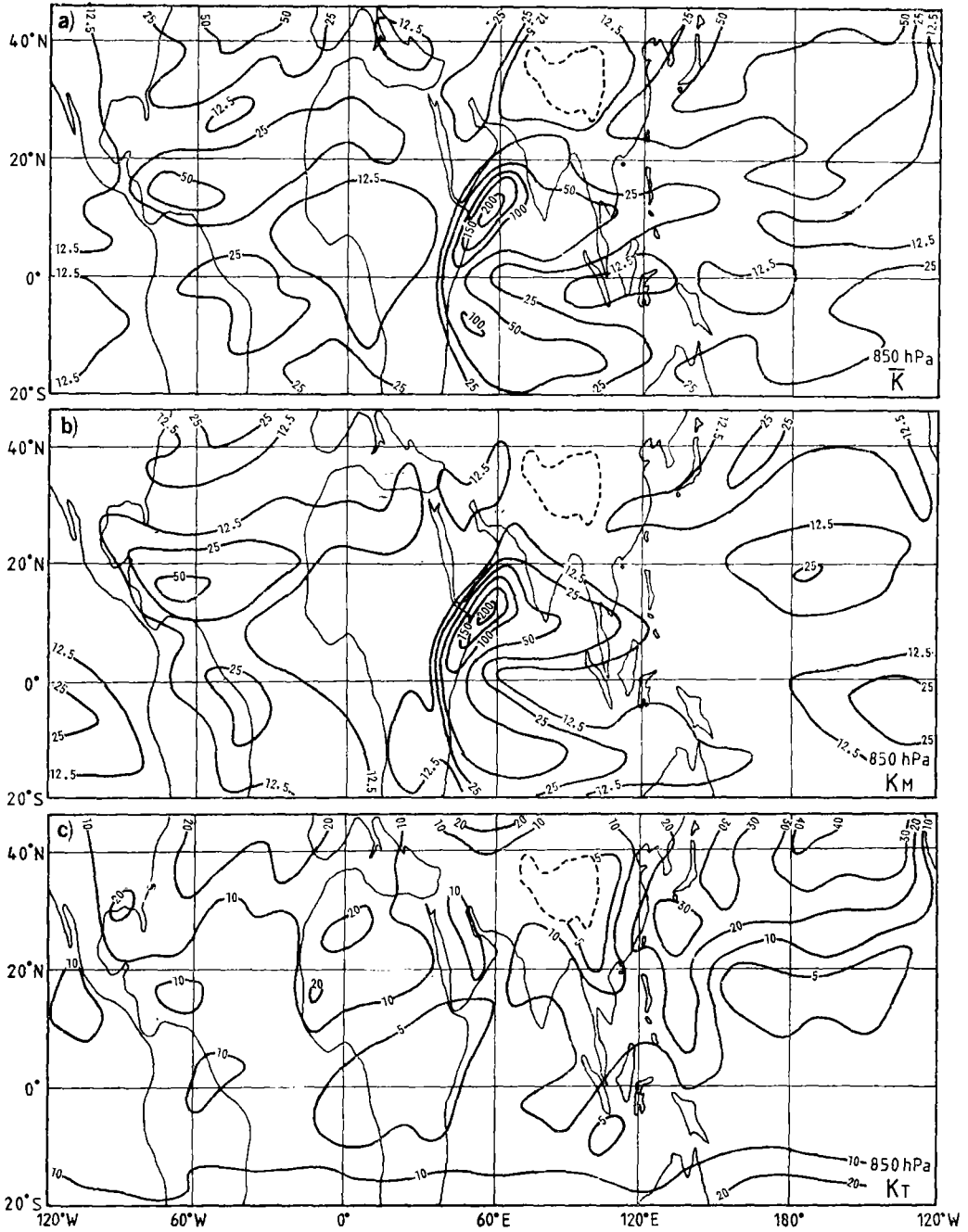


图 1 1979年7月850 hPa上平均动能  $\bar{K}$  (a), 平均运动动能  $K_M$  (b) 和瞬变动能  $K_T$  (c) 的分布 (单位:  $m^2s^{-2}$ )

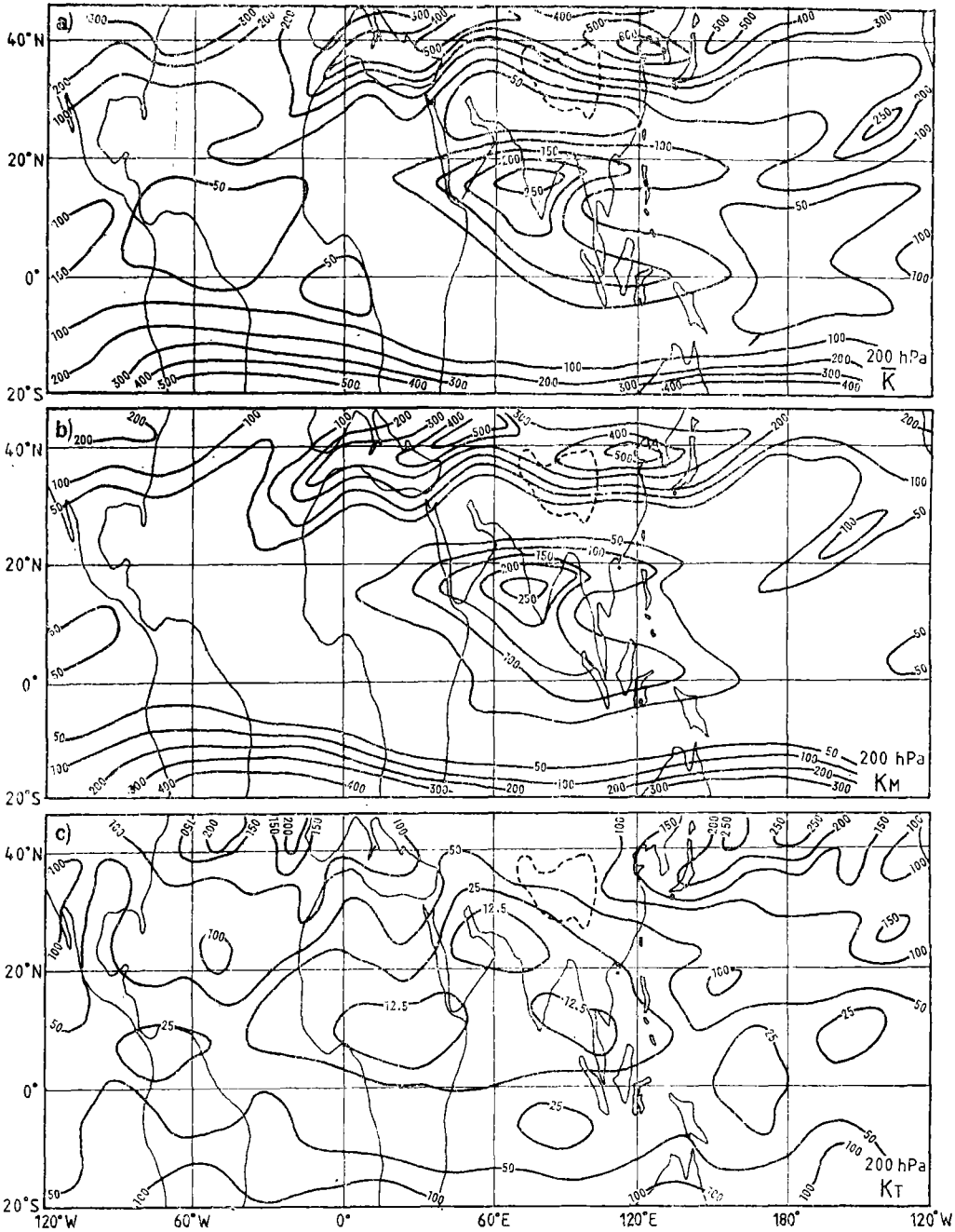


图 2 1979 年 7 月 200 hPa 上平均动能  $\bar{K}$  (a), 平均运动动能  $K_M$  (b) 和瞬变动能  $K_T$  (c) 的分布 (单位,  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ )

种源于太平洋中部槽南端的气旋涡旋加强了西太平洋台风上空的流出通道, 对其发展有重要作用。这一大值区向南延伸, 通过伊里安岛与澳大利亚的大值区相联。在 200 hPa 上亦存在一个和 850 hPa 上一致的瞬变涡旋通道。大西洋洋中槽南端  $K_T$  的分布与此相

似,在 40°W附近瞬变波的另一个通道,这两个区域在月平均图上均为西风,所以瞬变波可以越过赤道而不被截陷<sup>[14]</sup>。

Chen 在分析 1976 年夏季 200 hPa 上瞬变涡旋能量时发现从东风急流延伸到下游有一个  $K_T$  大值区。在图 2 c 上没有出现这个特征。再次表明东风急流及其动力过程的年际变化是显著的。

30°N以北,副热带海洋上,  $K_T$  与  $K_M$  的数值相当( $\sim 100 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ )。成为太平洋和大西洋的“风暴路径”区<sup>[15]</sup>。850 hPa 上的  $K_T$  也达 20—40  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ,表明夏季副热带扰动最不稳定的区域是在大洋上。

### 三、动能制造与动能通量散度

时间平均,垂直积分的动能平衡方程为:

$$-\frac{1}{g} \int_{p_0}^0 \overline{\mathbf{V} \cdot \nabla \phi} dp = \frac{1}{g} \int_{p_0}^0 \overline{\nabla \cdot K \mathbf{V}} dp - \frac{1}{g} \int_{p_0}^0 \overline{\mathbf{V} \cdot \mathbf{F}} dp$$

MGK                          MDK                          DKE

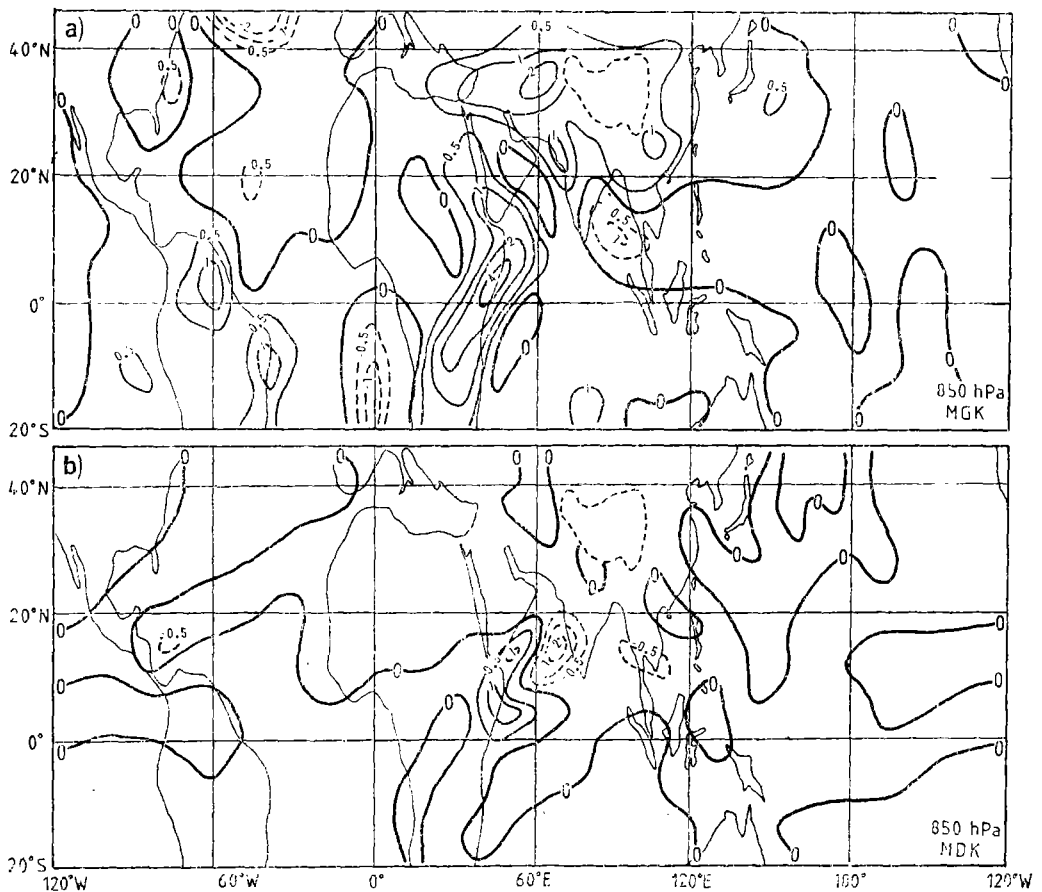


图 3 1979 年 7 月 850 hPa 上平均动能制造(MGK)(a)和平均动能通量散度(MDK)(b)的分布(单位:  $10^{-4} \text{ W kg}^{-1}$ )

式中左边为平均动能制造(MGK),右边为动能通量散度(MDK)和摩擦与次网格尺度效应(DKE)。摩擦的动能耗散很难估计,所以我们只讨论MGK和MDK的特征。

850 hPa上最大的动能制造区在东非海岸,与索马里急流相联系(图3a)。850 hPa上非洲,沙特阿拉伯为热低压,阿拉伯海上空气压梯度力向北。越赤道气流有强的穿越等压线指向低压的运动。Krishnamurti和Ramanathan<sup>[16]</sup>指出索马里急流中的散度风和旋转风的量级相同。Gill<sup>[17]</sup>的理论分析得到近赤道的非绝热加热将诱导出强的越赤道气流。索马里急流中强的动能制造,非绝热加热是重要的。应该指出,这一区域中瞬变涡旋的动能制造为 $0.2 \times 10^{-4} \text{Wkg}^{-1}$ (图略),仅为定常涡旋的0.1左右。所以索马里急流是自身维持的。

自印度次大陆向东到南海,西南季风风速减小,气块处于超地转状态,非地转风指向高压,消耗动能。的确,自 $80^\circ \text{E}$ 向东到南海,MGK为负值。孟加拉湾上空西南季风的维持决定于周围环境的动能输入与次网格尺度效应。

850 hPa上动能通量散度的数值较小。索马里急流上游 $\text{MDK} > 0$ ,其值约为MGK的1/3。下游自阿拉伯海到南海 $\text{MDK} < 0$ ,补偿了一部分这一区域内负的动能产生率。



图4 1979年7月200 hPa上平均动能制造(MGK)(a)和平均动能通量散度(MDK)(b)(单位,  $10^{-4} \text{W kg}^{-1}$ )

对流层上层东风急流是主要的动能源(汇)区(图4)。东风急流上游入口区( $140^{\circ}\text{E}-80^{\circ}\text{E}$ )制造动能,最大值达 $6 \times 10^{-4} \text{Wkg}^{-1}$ ,位于孟加拉湾上空。东风急流下游出口区( $80^{\circ}\text{E}-30^{\circ}\text{E}$ )动能制造为负值。阿拉伯海上空达 $-4 \times 10^{-4} \text{Wkg}^{-1}$ 。按照Namias和Clapp的中纬度急流汇合理论,急流入口区(出口区)有穿越等高线向低压(高压)的横向流动<sup>[18]</sup>。Krishnamurti<sup>[10]</sup>对东风急流三维环流的诊断分析得到在急流入口区为正的热力环流,出口区为负的热力环流。本文计算的MGK分布证实了南亚东风急流的能量学与中纬度西风急流相似。孟加拉湾北部(以及青藏高原)上空的热源加强了上升运动及侧向环流。这可能是东风急流入口区动能产生率较大的一个原因。东风急流入口区动能通量辐散,出口区动能通量辐合(图4b)。这和Chen<sup>[11]</sup>的结果相同。出口区动能通量辐合量( $\sim -2 \times 10^{-4} \text{W kg}^{-1}$ )不足以补偿动能的破坏。这一区域有净的动能亏损。

太平洋和大西洋洋中槽前部有一长条东北-西南向的正值MGK带并伴有动能通量的辐散。洋中槽区域内MGK为负值。虽然这一区域内动能通量是辐合的,但其值较小。有净的动能亏损。洋中槽是一个瞬变涡旋活跃区(图2c),可能是由次网格尺度系统维持的。

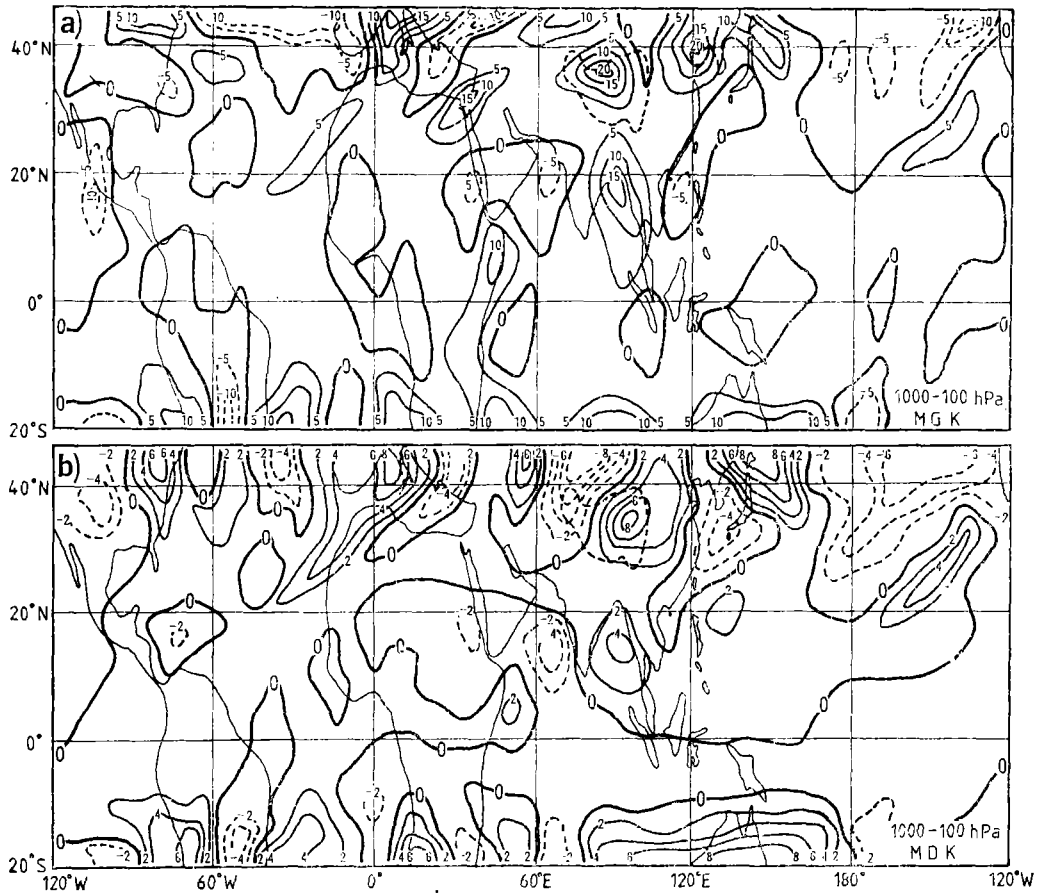


图5 1979年7月1000—100 hPa的平均动能制造(a)和平均动能通量散度(b)(单位,  $\text{W m}^{-2}$ )

图 5 a, b 分别为 1000—100 hPa, 9 层积分的 MGK 和 MDK 的分布。除了东非沿岸有一条与索马里急流相联系的大动能产生率( $\sim 10 \text{ W m}^{-2}$ )外。总的特征和 200 hPa(图 4 a)上的很相似。说明热带地区对流层上层的动能制造是主要的。同样比较图 5 b 与 4 b 可得出, 动能通量的散度也以对流层上层为主。

最强的动能制造在孟加拉湾上空( $15 \text{ W m}^{-2}$ 以上), 伴有动能通量辐散( $4 \text{ W m}^{-2}$ )。东非—阿拉伯海动能产生率在 $-5 \text{ W m}^{-2}$ 左右, 动能通量辐合量为 $-4 \text{ W m}^{-2}$ 。南亚东风急流是热带地区动能平衡的主要环流系统。

图 6 a 为纬向平均的动能制造[MGK]的径向分布。 $7.5^\circ\text{N}$ — $28.75^\circ\text{N}$ 间[MGK] $\sim 1.6 \text{ W m}^{-2}$ , 可视为热带地区平均动能制造, 其值和 Oort 和 Chan<sup>[19]</sup>的计算值相当。赤道地

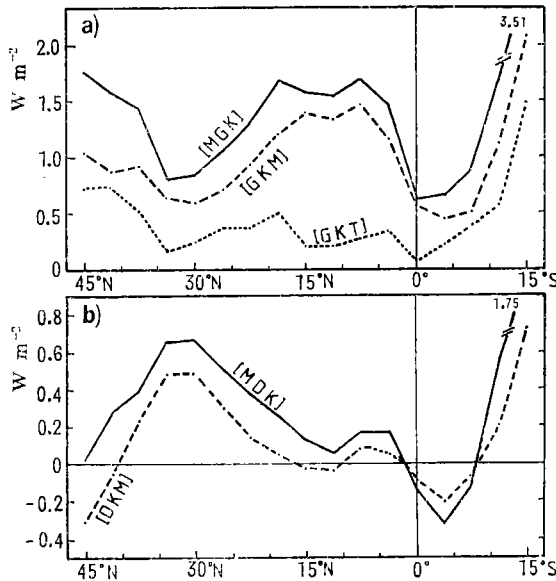


图 6 沿纬圈平均的平均动能制造(实线), 平均运动动能制造(虚线)和瞬变动能制造(点线)(a)和沿纬圈平均的平均动能通量散度(实线)和平均运动的动能通量散度(虚线)(b)(单位:  $\text{W m}^{-2}$ )

区[MGK]为小值, 另一小值区在  $30^\circ\text{N}$  附近, 正是南亚高压所在的平均纬度。将[MGK]分解成定常涡旋的动能制造[GKM]和瞬变涡旋的动能制造[GKT]。在热带, [GKM]约占[MGK]的 0.7—0.85 左右, [GKT]仅为 0.3—0.15 左右。在中高纬度, 平均环流主要是由瞬变涡旋维持的<sup>[20]</sup>, 而热带环流主要是由定常涡旋维持的。从[MDK]的径向分布可看出, 整个北半球热带地区动能通量是辐散的。在南亚大陆高压所在的纬度带[MDK]值最大, 其中定常涡旋动能通量散度[DKM]占主要地位。

#### 四、季风区的动能平衡

根据东风急流和西南季风的范围, 取  $0^\circ$ — $30^\circ\text{N}$ ,  $3.75^\circ\text{E}$ — $153.75^\circ\text{E}$  为季风区。在季风区中, 按照东风急流中心分成两个相等的区域:  $3.75^\circ\text{E}$ — $78.75^\circ\text{E}$  和  $78.75^\circ\text{E}$ — $153.75^\circ\text{E}$ , 分别为非洲—阿拉伯海(A-A)区和孟加拉湾—南海(B-S)区。图 7 为这两个区域



平均的 MGK 和 MDK 的垂直分布。

A-A区内, 700 hPa 以下MGK 为正值, 索马里急流是动能制造源。700 hPa以上为负值, 最大在 100 hPa, 相应为东风急流出口区动能破坏。MDK 在对流层内均为辐合, 下层值很小, 700 hPa 以上其值不足以补偿动能的破坏。再考虑到摩擦的动能耗散, 700 hPa 以上有净的动能亏损。动能向上的输送在动能平衡过程中可能是重要的。

B-S 区 MGK 的垂直分布相反。1000—900 hPa 的正值是边界层摩擦效应的结果。900—500 hPa 动能制造为负值, 相应的弱的动能通量辐合不足以补偿动能的破坏。500 hPa 以上MGK为正值。最大值在 150 hPa 达  $1.70 \times 10^{-4} \text{Wkg}^{-1}$ , 相应于东风急流入口区的动能制造。动能通量是辐散的, 但其值较小, 总的说来有净的动能制造。因此向下的动能通量可以维持垂直方向的动能平衡。

季风区内, 垂直方向的耦合是重要的。而这种耦合在 A-A区和B-S区是不同的。

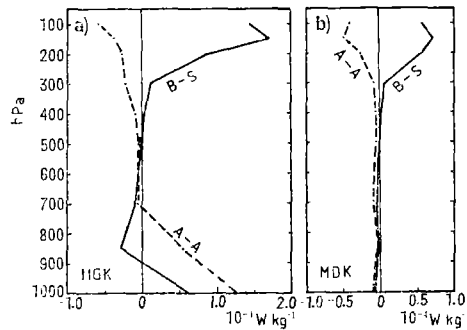


图 7 非洲-阿拉伯海区(虚线)和孟加拉湾-南海区(实线)平均动能制造的垂直分布(a)和同a)但为平均动能通量散度的垂直分布(b)(单位:  $\text{Wkg}^{-1}$ )

## 五、结 论

通过前面的分析,可以得到以下几点结论:

1. 热带地区动能集中在平均运动上,瞬变涡旋的动能相对说来是小的。表明热带环流以定常涡旋为主。对流层下层的索马里急流和对流层上层东风急流是主要的定常涡旋,瞬变动能在 0.1 以下。对流层下层  $105^{\circ}\text{E}$  和  $150^{\circ}\text{E}$  为两半球间瞬变涡旋的通道,索马里急流是定常涡旋的通道。对流层上层瞬变涡旋的通道和洋中槽相联系。

2. 对流层下层索马里急流是制造动能的主要环流系统。对流层上层南亚东风急流入口区制造动能,出口区破坏动能。定常涡旋的动能制造占全部动能制造的 0.8 左右。低纬度平均环流是自身维持的。副热带洋中槽地区是净的动能汇,次网格尺度系统在该区域的动能平衡中可能起重要作用。

3. 非洲—阿拉伯海季风区中 700 hPa 以上有动能净亏损,要求向上的动能通量。孟加拉湾—南海季风区, 900—500 hPa 之间有动能净亏损,要求向下的动能输送。季风区中上下层环流的耦合是重要的。而这两个区域内耦合的方式不同。

动能诊断分析的准确性依赖于资料的特性与质量, GFDL 和 ECMWF 处理的 FGGE III-b 资料,即使用于中高纬度环流的能量诊断,其结果亦有比较大的差别<sup>[21]</sup>。因此本文

的结果仅仅是初步的。目前,ECMWF正在对FGGE II-b资料重新分析,应用非绝热正规波初值化方法,改进垂直方向插值等<sup>[22]</sup>。可以预计FGGE III-b新版本的完成可能对动能平衡的研究有所改进。

### 参 考 文 献

- [1] Kung, E. C., Diurnal and long-term variation of the kinetic energy generation and dissipation for a five year period, *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 593—606, 1967.
- [2] Savijarvi, H., The atmospheric energy budgets over North America, the North Atlantic and Europe based on ECMWF analysis and forecasts, *Tellus*, **35A**, 39—50, 1983.
- [3] Bengtsson, L., M. Kanamitsu, P. Kallberg and S. Uppala, FGGE 4-dimensional data assimilation at ECMWF, *Bull. Am. Met. Soc.*, **63**, 29—43, 1982.
- [4] —, —, —, and —, FGGE research activities at ECMWF, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **63**, 279—303, 1987.
- [5] Vincent, D. G., and T. W. Schlatter, Evidence of deep convection as a source of synoptic-scale kinetic energy, *Tellus*, **31**, 493—504, 1979.
- [6] 王兴东、陶诗言, 西太平洋越赤道气流的初步研究, *海洋学报*, **6**, 160—173, 1984.
- [7] 王作述、何诗秀, 南海至西太平洋一带夏季低空越赤道气流和季风的初步研究, *气象学报*, **37**, 4, 67—78, 1979.
- [8] Holopainen, E., A diagnostic study of the kinetic energy balance of the long-term mean flow and the associated transient fluctuations in the atmosphere, *Geophysica*, **15**, 125—145, 1978.
- [9] Albignat, J. P., and R. J. Reed, The origin of African wave disturbances during Phase III of GATE, *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1827—1839, 1980.
- [10] Krishnamurti, T. N., Observational study of the tropical upper tropospheric motion field during the North Hemisphere summer, *J. Appl. Met.*, **10**, 1066—1096, 1971.
- [11] Chen, T. C., On the kinetic energy budget of the summer mean flow at 200 mb in the tropics, *Tellus*, **34**, 55—62, 1982.
- [12] Atlas of the tropical and subtropical circulation derived from National Meteorological Center operational analysis, NOAA, NMC, 1986.
- [13] Sadler, J. C., Mid-season typhoon development and intensity changes and the tropical upper tropospheric trough, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1137—1152, 1978.
- [14] Webster, P. J., and J. R. Holton, Cross equatorial response to middle latitude forcing in a zonally basic state, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 722—733, 1982.
- [15] James, I. N., Some aspects of the global circulation of the atmosphere in January and July 1980, 'Large Scale Dynamic Process in the Atmosphere', 5—26, 1983.
- [16] Krishnamurti, T. N., and Y. Ramanathan, Sensitivity of the monsoon onset to differential heating, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1290—1306, 1982.
- [17] Gill, A. E., Some simple solutions for heat-induced tropical circulation, *Quart. J. R. Met. Soc.*, **106**, 447—462, 1980.
- [18] Namiàs, J., and P. F. Clapp, Confluence theory of the high tropospheric jet stream, *J. Met.*, **6**, 330—336, 1949.
- [19] Oort, A. H., and P. H. Chan, On the role of the Asian monsoon in the angular momentum and kinetic energy balance of the tropics, *PAGEOPH*, **115**, 1167—1186, 1977.
- [20] Wallace, J. M., A historical introduction 'The General Circulation' NCAR, 1—14, 1979.
- [21] Kung, E. C., and H. Tanaka, Energetics analysis of the global circulation during the special observation periods of FGGE, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 2575—2592, 1983.
- [22] Arpe, K., Fit of FGGE level III-b analyses by ECMWF and by GFDL to observational data during the period 27 February to 7 March 1979, GARP Special Report 44, 1—36—45, 1984.

## THE KINETIC ENERGY BUDGET IN THE TROPICS

Chen Shoujun

*(Department of Geophysics, Peking University)*

U. C. Mohanty

*(Centre for Atmospheric Sciences, I. I. T., India)*

### Abstract

The FGGE III-b data compiled by ECMWF of the July 1979 is used to diagnose the kinetic energy (KE) budget of the tropical flow. The results reveal that the horizontal distribution of the mean flow KE is very similar to that of mean KE. This similarity indicates that the major features of the tropical summer circulation are standing eddy phenomenas. The transient KE formed two hemispheric interaction channels near  $105^{\circ}\text{E}$  and  $150^{\circ}\text{E}$  at 850 hPa and near  $150^{\circ}\text{E}$  and  $30^{\circ}\text{W}$  at 200 hPa. Also, large value transient KE occurred over the mid-ocean trough areas, the so called "storm track".

At 850 hPa, Somali jet is the main circulation system which generates KE. At 200 hPa, the generation is positive (negative) in the upstream (downstream) region of the tropical easterly jet. It indicates that the kinetic energetics of the easterly jet is similar to that of the westerly jet in the mid-latitude.

In the Africa-Arabian Sea monsoon region, the net generation of KE (KE generation plus KE flux divergence) is negative in the upper troposphere. While in the Bay of Bengal-South China Sea region the net generation is negative in the lower troposphere. Such deficiencies of KE may be compensated by the vertical transport of KE, i. e., the vertical coupling of the upper and lower tropospheric flow is quite important in the monsoon area.