

一九七九年夏季亚洲季风区上空 的区域能量分析*

段廷扬

李维亮

(成都气象学院)

(国家气象局气象科学研究所)

提 要

本文用美国气象中心(NWC)1979年6—8月资料计算了亚洲季风区上空的瞬变涡动能、区域的热源和能量变化。计算结果表明,1979年夏季印度季风区的印度半岛和孟加拉湾地区,东亚季风区的南海和西太平洋地区,我国东部大陆地区都是扰动活动频繁的地方,其对流层上部表现为强热源;南半球西印度洋热带地区和澳大利亚地区热带扰动不活跃,其上空为冷源区。

再有印度季风区扰动发展是正压不稳定和斜压不稳定,以后者为主;东亚季风区扰动发展靠斜压转换而来;大陆东部地区扰动发展也主要靠斜压转换过程。而南半球西印度洋热带地区和澳大利亚地区是通过和中纬度西风带大气的侧向耦合获得能量,并通过跨赤道气流的扰动把能量转送到北半球季风区。

一、引 言

亚洲季风区的热带扰动是产生这些地区降水的主要影响系统,多年来一直引起人们的重视。有的人对热带扰动的空间结构,活动特点作了许多研究;也有人对扰动的能量收支进行分析,从而研究热带扰动的发展机制。但是说法不一,问题还没有弄清。根据我国近年来对南亚季风环流系统的研究表明^[1,2],南亚季风系统包括两个独立的次级季风环流系统,即南海—西太平洋的季风环流系统,为东亚季风环流系统和印度季风环流系统。这两个季风环流系统各自有它的主要成员所组成。印度季风系统的主要成员可见文献[3];东亚季风系统主要成员为^[2]南海—西太平洋的季风槽和ITCZ,西太平洋副热带高压,澳大利亚冷高压,105°E和125°E之间低空越赤道气流,以及高空南支东风急流及其在100°E附近的强越赤道气流。无疑研究这二个季风环流系统所包含的各主要成员所在区域内扰动发展能量来源是很有意义的事。本文应用美国气象中心1979年6—8月逐日00时麦卡托投影图上风和温度的网格点资料,对赤道两侧热带地区七个有限区域分别进行涡动能收支分析作为初步的尝试。对于这七个有限区域的划分,我们查阅了美国Florida State University^[4]出版的1979年夏季的天气图。然后统计印度季风系统和东亚季风系统各主要成员在该时期内所在平均位置作为我们对亚洲季风区七个有限区域划分的参考。这七个区域的位置和范围如图1所示:

1区: 0°—24.24°N, 50°E—95°E; 这区包括阿拉伯海、印度半岛和孟加拉湾在内的

* 本文于1984年8月18日收到,1985年7月9日收到修改稿。

北印度洋地区，这是印度季风盛行的地区。

2 区：24.24°N—40.98°N, 70°E—100°E；正是我国青藏高原所在的位置，属于高原季风区域。

3 区：28.72°S—0°，40°E—80°E；索马里以东包含马斯克林群岛在内的南半球西印度洋热带洋面，这里是形成印度季风的主要气流源地和通道。

4 区：4.99°N—24.24°N, 95°E—160°E；中南半岛、南海和西太平洋部分地区，这是初夏西太平洋副热带高压脊进退活动之处，也是早期东亚季风气流盛行和印度季风气流影响的地区。

5 区：24.24°N—44.65°N, 100°E—120°E；我国东部大陆地区，这里初夏是处于副高北部边缘，印度季风气流和东亚季风气流在副高西南边缘汇合北上，可达长江流域；盛夏随着副高的增强和北跳，这区的南部大部分地区受副高控制，而季风气流亦向北推进可影响华北。

6 区：9.95°S—4.99°N, 90°E—150°E；印度尼西亚地区，为西太平洋季风槽和ITCZ经常影响的地区。

7 区：28.72°S—9.95°S, 100°E—160°E；澳大利亚地区，它是东亚季风气流的源地之一。

二、瞬变涡动动能的分布

这里对瞬变涡动动能的分布作一分析。瞬变涡动动能是按下式计算的：

$$K^* = \frac{1}{2} \langle u^{*2} + v^{*2} \rangle \quad (1)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示月平均，* 表示偏差。

1979 年 6 月 700 hPa 高度上，以阿拉伯海经孟加拉湾到南海南部，有一个东西向分

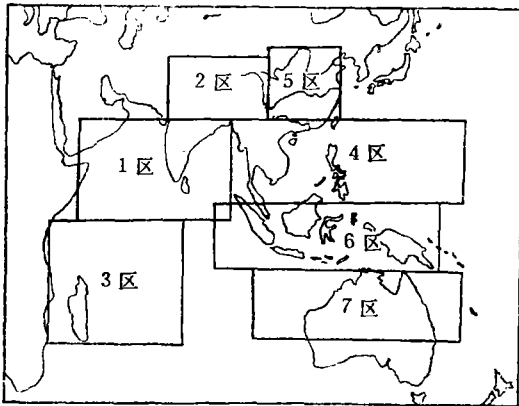


图 1 七个区域的位置和范围

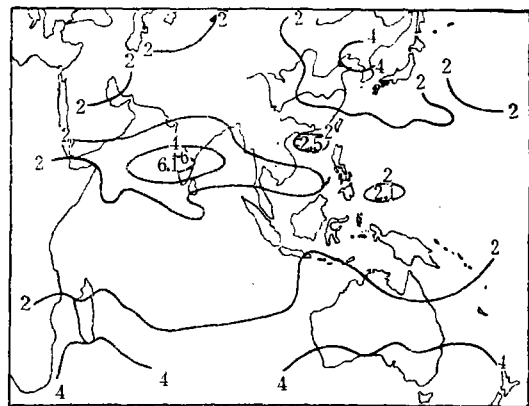


图 2 1979 年 6 月 700 hPa 高度上瞬变涡动动能分布
(单位: $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, 等值线间隔 2 个单位)

布的大 K^* 带，最大中心在印度半岛南端(图 2)。这恰好和季风槽活动的位置相一致。对照这个月逐日卫星照片，发现这个区域通常被大范围的云区覆盖，而且有大块云团自东向

西从孟加拉湾穿过印度半岛进入阿拉伯海,这些云团有的是从海口西移过来的。金祖辉,陈隆勋曾指出^[2],东亚季风系统中的扰动,通常是由太平洋向西传播,有的甚至可以到印度半岛以西。这表明,季风槽中不断有扰动产生西传。除此之外,图 2 还表明南海和菲律宾以东近赤道洋面上分别有一个范围很小的大 K^* 区,事实上,这两个地区也是东亚季风扰动活动频繁的地区。

7 月(图 3),北半球热带地区主要有个大 K^* 区,就是孟加拉湾到加里曼丹。印度半岛和我国南海的 K^* 值都比较小。另外,在日本及其以南广大洋面上有一个明显的大 K^* 区,这区位于副高七月平均脊线以北,这恰是日本梅雨锋上的扰动,其性质和热带扰动不一致。与 6 月相比,孟加拉湾的 K^* 值小。7 月,西太平洋高压脊线进一步北跳,而印度季风和东亚季风 7 月份发生了长达十多天的中断。曾昭美、郭其蕴分析这一年大气环流特征时也指出^[5],1979 年 7 月亚洲的夏季风风速小,季风层浅薄,水平范围也小,因而季风比常年弱。因此在南亚、北印度洋和我国南海地区热带扰动普遍比较弱。

8 月(见图 4),北半球热带地区 K^* 值普遍比 7 月大,特别是西太平洋地区更为明显,在台湾到吕宋岛附近出现了 $7.7 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 的最大中心,这与频繁的东风波、台风和热带气旋的活动分不开的。此外,中南半岛和印度半岛南端也分别有一个大 K^* 区,这实际上体现了随着 7 月下旬至 8 月中旬夏季风的又一次活跃引起季风扰动的又一次明显增强过程。

从图 2—4 还可以看出,整个夏季南半球除较高纬度受西风扰动影响使 K^* 较大外,南半球热带地区 K^* 都比较小。但分析发现,夏季三个月从澳大利亚北部,通过马来半岛到我国南海或菲律宾东部的西太平洋地区,都有一个相对大的 K^* 值带,在马斯克林群岛附近洋面到印度半岛南端也有一个相对大的 K^* 值带(图 4 更清楚),这显然与两支跨赤道气流有关。云图上也可发现,这两个地区常有南北半球交接在一起的云带。陈隆勋、金祖辉用南北半球 37 个站 u, v 分量交叉谱分析得到^[6],东亚季风系统的低空振荡起源于澳大利亚,它是由南半球向北半球传播的。上述结果说明,南半球常有热带扰动迭加在低空跨赤道气流上向北半球传播。

从以上分析可以得到,夏季热带扰动主要活动在 1 区、4 区和 6 区。5 区是东亚雨带

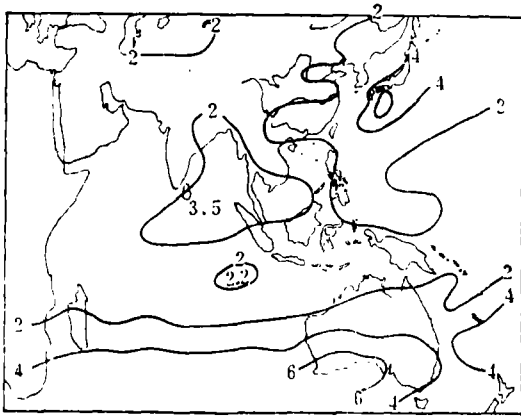


图 3 1979 年 7 月 700 hPa 高度上瞬变涡动动能分布 (说明同图 2)

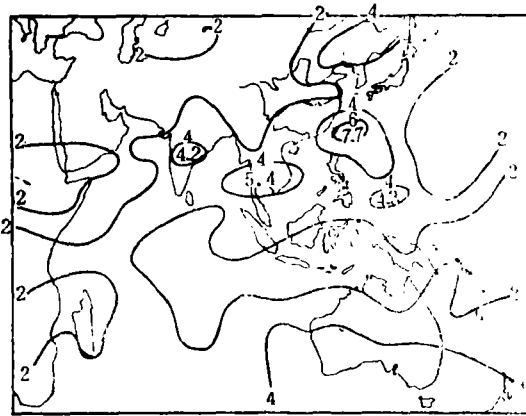


图 4 1979 年 8 月 700 hPa 高度上瞬变涡动动能分布 (说明同图 2)

季节性向北推进的影响地区, 其扰动性质不像上述三区那样单纯, 是温带和热带扰动的混合体^[9]。处在南半球近赤道地区的 3 区和 7 区瞬变涡动动能一直很小。由于青藏高原所在的 2 区, 700 hPa 层不能反映高原上的扰动活动, 这里暂不作分析。

三、区域平均加热场分析

为了讨论各个区域扰动能量的来源, 这里首先将各个区域非绝热加热的特征作一分析。单位质量的加热率应用麦卡脱投影图的热力学能量方程计算^[7], 方程中垂直速度可以由散度得到, 散度则直接用网格点上的风资料计算。方程中的温度局地变化项用 $\Delta t = 1 \text{ d}$ 的四级近似, 这样做具有较高的精度。表 1 给出 7 个区域 850 hPa—200 hPa 各层月平均和季节(6—8 月)平均的加热率, 同时计算了 200 hPa—850 hPa 层中积分的净加热率。从表 1 可以看到:

1 区整个夏季对流层 700 hPa 以上为热源, 850 hPa 为冷源, 加热最强的层次在 500

表 1 七个区域各层月平均和季节平均加热率
(单位: 10^{-5}wg^{-1} , 从 200 hPa 到 850 hPa 积分的净加热率单位: 10^2wm^{-2} , 2 区是从 200 hPa 到 500 hPa 积分)

月份	(hpa) 高度	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区	6 区	7 区
六 月	200	0.55	-2.05	-5.17	6.22	3.36	3.49	0.25
	300	0.84	-2.60	-5.80	3.78	2.65	2.35	-0.63
	500	4.07	0.59	2.02	-0.08	-0.97	0.88	-4.37
	700	2.09		2.60	-3.53	-4.66	-1.89	-1.39
	850	-1.93		4.87	-6.13	-7.52	-4.96	2.48
	净	1.318	-0.444	-0.72	-0.453	-0.962	-0.749	-1.034
七 月	200	1.22	2.56	-4.70	6.26	7.69	4.20	-4.16
	300	0.55	3.15	-4.66	3.44	5.84	3.44	-1.85
	500	2.86	-1.85	-1.34	1.01	-0.84	-0.21	-1.93
	700	1.30		2.65	-2.44	-4.37	-4.75	-0.84
	850	-5.42		6.13	-4.7	-6.89	-1.97	3.40
	净	0.663	0.425	-0.291	-0.156	-0.524	-0.291	-0.773
八 月	200	1.05	1.26	-6.51	7.56	2.18	3.90	-3.02
	300	0.34	-1.22	-5.33	2.90	0.38	3.78	-1.68
	500	3.40	-2.27	-0.55	-0.84	-1.25	-1.30	-1.43
	700	1.22		2.56	-1.68	-1.97	-3.70	0.08
	850	-4.58		5.12	-4.87	-2.37	-0.71	2.81
	净	0.661	-0.349	-0.417	-0.036	-0.581	-0.198	-0.474
季 节	200	0.92	0.59	-4.33	6.68	4.41	3.86	-2.31
	300	0.84	-0.21	-5.25	3.36	2.94	3.19	-1.39
	500	3.44	-1.18	-1.30	-0.63	-0.97	-0.21	-2.56
	700	1.72		2.60	-2.56	-3.56	-4.83	-0.71
	850	-3.99		5.38	-5.25	-5.59	-2.56	2.90
	净	0.880	-0.123	-0.476	-0.215	-0.689	-0.412	-0.760

hPa 高度,整层的净加热 6 月份最大,达 131.8 Wm^{-2} 。这个区是热带扰动活动最频繁的地区,对流层发展旺盛,因而大气中上部的热源主要是凝结潜热释放引起的。2 区 700 hPa 以下作为青藏高原地区已失去意义,我们仅给出 500 hPa 以上各层加热的数值。这个地区 7 月份大气加热比较显著。6 月份高空为冷源,低空为热源。8 月恰巧相反低空为冷源,高空为热源。造成这种情况,和青藏高原地区不同天气系统活动有关。4 区和 6 区整个夏季对流层 300 hPa 以上部表现为热源,500 hPa 及以下为冷源。这两个地区都处在热带海洋上,也是扰动经常活动的地区,对流层上部的加热无疑与对流凝结加热有关。5 区热源分布与 4 区、6 区比较相似,也是对流层上部为热源,中下部为冷源。这里纬度偏高,夏季既受来自低纬度的季风气流的影响,也受中高纬西风带扰动的影响,随着季节性变化其雨带由南向北推进,我们虽然算出的是月平均加热场,但其结果和文献[8]中所算的加热场类似,这加热场也往往和降水带有密切相联。3 区和 7 区的一部分处在扰动不太发展的南半球热带地区,对流不旺盛,对流层中上部通常是冷源,下层是热源。陈隆勋 李维亮曾给出夏季亚洲季风区多年平均的热源分布图^[9],最强的孟加拉湾热源中心包括在这里的 1 区内,可见 1 区出现强烈的加热是应当的。4 区虽然包含有多年平均的热源中心区,但是李维亮^[10]在计算 1979 年夏季南海季风区的大气热源时指出:平均热源仅出现在季风活跃期,而中断期平均是热汇。再之前面指出^[5]1979 年季风比常年弱。这样季节净加热就有可能会出现负值。6 区所跨经度范围较大,既包含多年平均的热源区,但也包括了部分冷源区^[9],故整个区域平均起来季节净加热出现负值就不奇怪了。3 区和 7 区分别是多年平均的南半球冷源区,这里 500 hPa 以上(3 区)和 700 hPa 以上(7 区)的强烈失热能够反映大气的加热特征。

四、区域平均涡动动能的收支

应用麦卡托投影图上涡动运动的能量方程^[7],

$$\frac{\partial[\bar{K}']}{\partial t} = I(K, K') + I(K', p') + F(K') + F(p') \quad (2)$$

式中“—”表示纬向平均,“,”是距平,[]是经向平均。 $K' = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)$ 是涡动动能,

$K = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$ 是平均纬向动能。(2)式右边各项的意义如下:

$$I(K, K') = - \left[\overline{u'v'} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\bar{u}}{\cos \theta} \right) \overline{u'\omega'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} \right] - \left[\overline{v'} \frac{\partial \bar{u}}{\cos \theta \partial y} + \overline{v'\omega'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial p} - \frac{\tan \theta}{a} \bar{v} \overline{u'^2} \right] \quad (3)$$

表示有限区域内涡动和纬向平均气流之间的相互作用。

$$I(K', p') = - \frac{R}{p} (\overline{\omega'T'}) \quad (4)$$

表示涡动有效位能向涡动动能的转换。

$$F(K') = F_x(K') + F_y(K') + F_p(K')$$

$$= -\left[\frac{\partial \overline{uK'}}{\cos \theta \partial x} \right] - \left[\frac{\partial \overline{vK' \cos \theta}}{\cos^2 \theta \partial y} \right] - \left[\frac{\partial \overline{\omega K'}}{\partial p} \right] \quad (5)$$

表示穿过边界的涡动动能通量产生的辐合,我们把它分解为纬向、经向和垂直三个分量,分别计算和分析。

$$F(p') = -\left[\frac{\partial \overline{u'\phi'}}{\cos \theta \partial x} \right] - \left[\frac{\partial \overline{v'\phi' \cos \theta}}{\cos^2 \theta \partial y} \right] - \left[\frac{\partial \overline{\omega'\phi'}}{\partial p} \right] - D(K') \quad (6)$$

表 2 七个区季节平均涡动动能的转换和输送 (单位: $10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$)

区	层次	$I(K, K')$	$I(K', p')$	$F_z(K')$	$F_x(K')$	$F_y(K')$	$F(p')$
一 区	200	-0.115	-0.088	0.153	-0.138	-0.023	0.051
	300	-0.220	0.135	0.019	-0.120	0.082	-0.024
	500	0.098	0.242	-0.265	-0.013	0.093	-0.064
	700	0.163	0.213	-0.160	0.075	-0.005	-0.055
	850	0.184	-0.189	0.056	0.208	-0.296	-0.078
二 区	200	-0.231	-0.914	-0.702	0.796	-0.225	0.326
	300	-0.518	0.112	-0.202	0.158	0.201	0.042
	500	-0.110	0.702	0.011	0.002	0.139	-0.204
三 区	200	-0.474	0.162	1.069	1.003	-0.667	-0.255
	300	-0.172	0.288	0.732	0.906	-0.092	-0.387
	500	0.145	-0.084	-0.054	0.485	0.241	-0.122
	700	-0.013	-0.029	-0.207	0.036	0.242	-0.004
	850	-0.042	0.202	-0.111	-0.085	0.144	-0.019
四 区	200	-0.115	1.021	-0.860	0.100	0.402	-0.160
	300	-0.061	1.559	-0.321	-0.209	0.123	-0.370
	500	-0.158	0.585	0.432	-0.154	0.063	-0.192
	700	-0.251	0.457	0.640	-0.219	-0.127	-0.118
	850	-0.088	0.156	0.641	-0.145	-0.326	-0.054
五 区	200	-0.728	2.247	-1.808	0.518	0.207	0.070
	300	-0.365	3.722	-2.169	0.722	-0.002	-0.191
	500	0.155	1.800	-1.050	0.351	-0.059	-0.275
	700	0.151	0.374	-0.736	0.227	-0.098	0.003
	850	0.141	0.067	-0.257	0.140	-0.134	-0.157
六 区	200	0.037	0.595	-0.349	-0.196	0.173	-0.082
	300	0.041	0.557	-0.074	-0.112	0.053	-0.136
	500	-0.203	0.349	0.423	-0.200	-0.053	-0.061
	700	-0.008	0.228	0.479	-0.008	-0.103	-0.097
	850	0.048	0.200	0.232	-0.031	-0.026	-0.097
七 区	200	-0.603	-0.207	-5.405	2.531	-0.874	1.017
	300	-0.825	-0.108	-4.323	1.732	-0.121	0.771
	500	-1.192	0.393	-0.993	0.600	0.037	-0.370
	700	-0.419	0.389	-0.288	0.118	0.175	-0.104
	850	-0.173	0.508	-0.148	-0.007	0.135	-0.065

由于没有位势高度 ϕ 的资料,这里是作为方程的余项来估算的,因此方程各项计算误差都会对它有很大影响,故对这一项不作详细讨论。

对七个区的计算结果给在表 2 中:

1 区 季节平均 $I(K, K')$ 在 300 hPa 以上为负, 500 mb 以下为正, 这表明对流层上部平均纬向气流以涡动运动获得能量, 而中下部平均纬向气流则向涡动提供能量, 因而中下层平均纬向气流是正压不稳定的。从 700 hPa 天气图上可以看到, 阿拉伯半岛经常有一支气流汇集到索马里急流中去, 成为印度季风气流的组成部分, 在这支气流上, 经常有东北—西南向的斜槽活动, 斜槽位于急流北侧, 这种扰动从平均纬向运动中获得能量。 $I(K', p')$ 从 700 hPa 到 300 hPa 层都为正值, 表示这里有强的斜压不稳定。 $F_z(K')$ 在 700 hPa 和 500 hPa 均为负, 这表明低层西南季风气流中, 有扰动动能的纬向辐散。 $F_y(K')$ 在 700 hPa 以下为正, 显然是随索马里急流穿过南部边界进入本区的扰动造成的。

2 区 这里, $I(K, K')$ 为负, $I(K', p')$ 为正, 表明青藏高原地区大气是正压稳定的, 扰动动能主要是由扰动有效位能转换来的。

3 区 除 500 hPa 层有弱的正压能量转换外, 其它层次都是正压稳定的。动能的经向和纬向辐合是维持这个区域扰动能量的来源。7 月 200 hPa 副热带西风可以北推到 10°S 左右, 西风带扰动常常北侵到这里, 从卫星云图也可证实这点。因此显著的涡动动能经向辐合意味着南半球西风带和东风带也存在很强的侧向耦合。

4 区 基本纬向气流是正压稳定的, 扰动动能的来源是通过斜压不稳定造成的扰动位能转换以及 500 hPa 以下各层涡动动能的纬向通量辐合。热带太平洋地区的东风扰动和热带气旋的西移, 从本区东界输入涡动动能, 造成 500 hPa 以下动能的纬向通量辐合。 $F_z(K')$ 为负, 表明有涡动动能的经向辐散, 这可能是西太平洋和南海热带扰动向中纬度移动造成的。

5 区 高层西风急流从 6 月到 8 月由南往北推进, 从中亚、新疆东移的扰动逆着西风梯度向北输送角动量, 显然高层基本纬向气流是正压稳定的。500 hPa 以下, 有平均动能向扰动动能的转换, 但数值很小。维持这里扰动发展的主要动能来源, 是斜压转换以及 4 区向北的动能通量输送。

6 区 这是初夏赤道槽影响的地区。计算结果表明: 这里正压能量转换很弱, 扰动的主要动能来源是斜压不稳定引起的能量转换以及 500 hPa 以下中低层的纬向动能辐合。

7 区 平均纬向气流是正压稳定的, 500 hPa 以下是斜压不稳定的。同时存在着强的涡动动能经向通量辐合, 这表明有不同纬度侧向耦合作用。存在强烈的涡动动能纬向辐散。

五、结 语

通过以上分析, 可见, 1979 年夏季印度季风区的印度半岛和孟加拉湾地区, 东亚季风区的南海和西太平洋地区都是扰动活动频繁地区。日本及其以南洋面和我国大陆东部地区也是扰动活动的地区, 但是扰动性质和热带地区不一样。这些地区对流层上部表现为很强的热源区; 南半球西印度洋热带地区和澳大利亚地区热带扰动不活跃, 这些地区上空

通常为冷源区。

其次,正压不稳定和斜压不稳定都为印度季风区的扰动提供动能,以斜压不稳定最显著,东亚季风区大气是正压稳定的,扰动的发展靠斜压能量转换来维持;我国大陆东部地区扰动虽也从平均纬向气流获得能量,但主要是由斜压不稳定产生的能量转换中获得涡动能。

再有南半球西印度洋热带地区和澳大利亚地区通过和中纬度西风带大气的侧向耦合获得扰动能量,并通过迭加在两支跨赤道气流上的扰动将南半球的一部分扰动能量分别输送到北半球的印度季风区和东亚季风区,这两个季风区都有扰动能量向我国大陆和其它较高纬度地区输送。

参 考 文 献

- [1] 李维亮、陈隆勋、金祖辉,印度地区强和弱季风时期亚洲和太平洋西部地区平均环流的结构和热源分布,全国热带夏季风学术会议文集,74—84,云南人民出版社,1981。
- [2] 金祖辉、陈隆勋,夏季东亚季风环流系统的中期变化及其与印度季风环流系统的相互关系,全国热带夏季风学术会议文集,204—217,云南人民出版社,1982。
- [3] Krishnamurti, T. N., et al., Oscillations of monsoon system, part I, observational aspects, *J. Atmos. Sci.*, **33**,10,1937—1954,1976.
- [4] Krishnamurti, T. N., et al., Quick Look 'SUMMER MONEX ATLAS', Part I—III, DEPARTMENT/METEOROLOGY FLORIDA STATE UNIVERSITY.
- [5] 曾昭美、郭其鑫,1979年7月南北半球低纬季风区大气环流特征,大气科学,7, No. 3,1983。
- [6] 陈隆勋、金祖辉,夏季东亚季风环流系统内中期变化的南北半球相互作用,全国热带夏季风学术会议文集,218—231,云南人民出版社,1982。
- [7] 村上多喜雄,冬季北太平洋南中国海和印度尼西亚诸海上空的区域能量学,国外气象参考资料第七辑,科学技术文献出版社重庆分社,1980。
- [8] 李维亮、章名立,1972年梅雨期长江中下游地区上空的能量输送,中国科学院大气物理研究所集刊第7号,科学出版社,1979。
- [9] 陈隆勋、李维亮,亚洲季风区夏季大气热量收支,全国热带夏季风学术会议文集,86—101,云南人民出版社,1981。
- [10] 李维亮、钟名森,1979年夏季南海地区大气热源和云对辐射中期振荡的影响,国家气象局气象科学研究所院刊《季风专刊》,气象出版社,1987。

THE REGIONAL ENERGY BUDGET OVER THE ASIAN MONSOON REGION IN THE SUMMER OF 1979

Duan Tingyang

(Chengdu College of Meteorology)

Li Weiliang

(Academy of Met. Science, State Met. Administration)

Abstract

In this paper, using data of the NWC(USA), the transient eddy kinetic energy, the regional atmospheric heat source and the energy transfer over the Asian Monsoon region in the summer of 1979 are calculated.