中国科学
1985 年 10 月　　B 辑　　第 10 期

台风中动能收支的研究

——I. 总动能和涡动动能收支*

丁一汇　　刘月贞
(中国科学院大气物理研究所,北京)　(福建省气象科学研究所,福州)

摘　　要

本文研究了 1975 年 7 号台风中总动能和涡动动能的收支,特别是无辐散风和辐散风对动能制造和输送的作用. 研究发现:

1. 在总动能收支中,随着台风的发展和加强,辐散风产生动能相对减小,而无辐散风产生动能显著增大,最后在成熟阶段成为主要的动能产生项.但就整个台风生命期平均,辐散风产生动能是主要的动能源(约 $4W/m^2$),无辐散风动能只有 $0.5W/m^2$.

2. 在涡动动能收支中,台风由初期从外界输入大量涡动动能转变为成熟期向外输出大量扰动动能. 气压梯度力在边界作功项和有效位能转换项是主要动能源. 后者与台风中加热场(主要是凝结加热)的增强密切有关. 正压能量转换是破坏涡动动能的.

一、引　　言

台风中动能收支的计算是研究台风演变的一个重要方面. Anthes[1] 曾对这方面的工作作过较全面的总结. Vincent 等[2,3]和 Kornegay 和 Vincent[4] 研究过一个大西洋飓风在北美登陆前后的动能收支. 由于研究的个例、天气形势和研究区大小不同,所得到的结果有一定差异. 最近,Dimego 和 Bosart[5] 研究了大西洋热带风暴 Agnes 转变成温带气旋时的动能收支,他们发现,主要的动能源是辐散风的作功项. 对于西太平洋地区的台风动能收支过去很少有人研究过,尤其用辐散风和无辐散风的动能方程,还没有人研究过西太平洋台风的情况. 本文是这方面的一个初步尝试. 我们首先计算了 7507 号台风总气流动能的收支,其次计算了扰动动能的收支,希望以此了解台风发展与主要能源的关系.

二、资料和计算方法

本文的研究区是 118.5—141.0°E, 16.0—42.5°N. 我们尽可能多的收集这个地区的探空和地面资料以及船舶报告,然后在 15 层上(地面, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70 和 50 mb)进行分析. 特别仔细地考虑系统和气象场的时空连续性. 最

本文 1984 年 8 月31日收到, 1985 年 4 月 17 日收到修改稿.
* 张健同志参加了部分工作.

后每隔 1.5° 经度/纬度读取风 (u, v)，温度 (T)，露点 (T_d) 和高度 (H) 值．研究的时段是从 1975 年 8 月 17 日 08 时到 23 日 08 时(北京时，下同)，即从台风的初始扰动出现在东海开始，到日本登陆和迅速减弱为止．整个台风的生命史可分四个阶段：(1) 扰动阶段 (8 月 17 日 08 时—8 月 18 日 20 时)．扰动的平均地面中心气压为 996mb，最大风速小于 18m/s．(2) 发展阶段 (8 月 19 日 08 时—8 月 21 日 08 时)，台风的平均地面中心气压为 985mb，最大风速 22m/s．(3) 成熟阶段 (8 月 21 日 20 时—8 月 22 日 20 时)，平均地面中心气压为 970mb，最大风速 34m/s．(4) 减弱时期 (8 月 23 日 08 时)，平均地面中心气压为 985mb，最大风速 23m/s．我们将只给出前三个阶段的动能收支．

台风是移动性系统，因而采用准 Lagrange 坐标系中的动能方程．用辐散风和无辐散风向量代替总的风向量，不难推出下列单位质量总气流的动能方程：

$$\frac{\delta K}{\delta t} = F_\psi(K) + F_\chi(K) + F_V(K) + F_c(K) + G_\psi(K) + G_\chi(K) + D(K). \tag{1}$$

上式中 $K = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$，$F_\psi(K) = -J(\psi, K)$，$F_\chi(K) = \nabla\chi \cdot \nabla K$，$F_V(K) = -\omega\frac{\partial K}{\partial p}$，$F_c(K) = \boldsymbol{C} \cdot \nabla K$，$G_\psi(K) = -J(\psi, \phi)$，$D(K) = \boldsymbol{V} \cdot \boldsymbol{F}$．$\boldsymbol{C}$ 是台风系统移动速度，$\frac{\delta}{\delta t}$ 是移动坐标系中动能的局地变化，χ 是速度势，ψ 是流函数，ϕ 是位势高度，ω 是 p 坐标的垂直速度，u 和 v 分别是风向量 $\boldsymbol{V}$ 的纬向和经向分量，$\boldsymbol{F}$ 是摩擦力．对(1)式进行面积平均，即用 $\frac{1}{S}\int_S (\quad) dS$ 作用每一项，可以得到区域平均的动能方程．S 是台风区面积，大约等于半径为 500km 的圆面积．本文只给出各阶段区域平均的结果．同时还对气压层进行积分 $\left(即取 \frac{1}{g}\int_{p_t}^{p_b} (\quad) dp\right)$，求出各气压层的积分值．$p_b$ 和 p_t 分别是各气压层的下、上边界气压．$D(K)$ 是作为余项算出．

(1) 式中 $F_\psi(K)$，$F_\chi(K)$ 和 $F_c(K)$ 分别代表无辐散风、辐散风和台风系统移动引起的动能水平输送，$F_V(K)$ 是动能的垂直输送，$D(K)$ 是摩擦消耗和网格尺度与次网格尺度之间的交换，$G_\psi(K)$ 和 $G_\chi(K)$ 分别是无辐散风和辐散风的动能，两者之和为总的动能．

有限区中准 Lagrange 坐标的涡动动能收支方程为：

$$\frac{\delta K_E}{\delta t} = I(K_Z, K_E) + I(P_E, K_E) + F_H(K_E) + F_V(K_E) + F_C(K_E) + F_H(P_E) + F_V(P_E) + D(K_E), \tag{2}$$

上式中

$$I(K_Z, K_E) = \overline{-[u'v']\frac{\cos\varphi}{a}\frac{\partial}{\partial\varphi}\frac{[u]}{\cos\varphi}} - \overline{[v'v']\frac{1}{a}\frac{\partial[v]}{\partial\varphi}} - \overline{[u'\omega']\frac{\partial[u]}{\partial p}} - \overline{[v'\omega']\frac{\partial[v]}{\partial p}} + \overline{[u'u'][v]\frac{\tan\varphi}{a}},$$

$$I(P_E, K_E) = -\frac{R}{p}\overline{[\omega'T']},$$

$$F_H(K_E) = -\overline{\left[\frac{1}{a\cos\varphi}\frac{\partial uK_E}{\partial\lambda}\right]} - \overline{\left[\frac{1}{a\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}vK_E\cos\varphi\right]},$$

$$F_V(K_E) = -\overline{\left[\frac{\partial\omega K_E}{\partial p}\right]},$$

$$F_c(K_E) = \overline{\left[\frac{c_\lambda}{a\cos\varphi}\frac{\partial K_E}{\partial\lambda}\right]} + \overline{\left[\frac{c_\varphi}{a\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}K_E\cos\varphi\right]},$$

$$F_H(P_E) = -\overline{\left[\frac{1}{a\cos\varphi}\frac{\partial u'\phi'}{\partial\lambda}\right]} - \overline{\left[\frac{1}{a\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}v'\phi'\cos\varphi\right]},$$

$$F_V(P_E) = -\overline{\left[\frac{\partial\omega'\phi'}{\partial p}\right]}.$$

其中[ ]代表纬向平均,"′"代表对纬向平均的偏差,$\overline{[\ \ ]}$ 代表纬向平均值的经向平均,即区域平均. $K_E = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)$ 是单位质量涡动动能. $K_Z = \frac{1}{2}\overline{([u]^2 + [v]^2)}$ 是区域平均的纬向平均动能. $I(K_Z, K_E)$ 代表纬向平均动能与涡动动能之间的转换,即通过正压过程进行的能量转换. $I(P_E, K_E)$ 是有效位能向涡动动能的转换,即通过斜压过程进行的能量转换. $F_H(K_E)$ 和 $F_V(K_E)$ 分别是涡动动能的水平通量散度和垂直通量散度. $F_c(K_E)$ 是由台风系统的运动(移动速度为 $\boldsymbol{C}(C_\lambda, C_\varphi)$) 所造成的涡动动能水平通量散度. $F_H(P_E)$ 和 $F_V(p_E)$ 分别定涡动位能的水平通量散度和垂直通量散度. $D(K_E)$ 是涡动动能的消耗,这里作为余项算出. $\frac{\delta K_E}{\delta t}$ 是台风区区域平均涡动动能的时间变率.

三、台风中总动能的收支

在台风扰动阶段(表 1),除了平流层下部以外,各层动能都是增加的 $\left(\frac{\delta K}{\delta t} > 0\right)$. 这主要通过辐散风作功产生动能的过程 ($G_\chi(K)$) 和动能输入引起. $G_\chi(K)$ 是这个阶段主要的内部动能源,几乎整层通过 $G_\chi(x)$ 都产生动能,500mb 以下很显著. 与此相反,无辐散风产生动能几乎整层为负,即破坏动能,其中以对流层下部和对流层上部及平流层下部动能破坏最显著. 由于 $G_\psi(K)$ 对动能的破坏比 $G_\chi(K)$ 的产生大得多,为使扰动发展,必须从外界输入大量动能. 这主要由辐散风的动能输送完成 ($F_\chi(K)$). 这种动能输入在中低层很大. 另外,$F_\psi(K)$, $F_c(K)$ 也输入一部分动能. 这说明直径约 1000km 的台风是一个开系,它与周围环境有明显的动能交换.

$D(K)$ 在 300mb 以下主要为负(摩擦消耗),以上为正,整层积分也为大的正值. 这表明通过涡动扩散过程(可解释为积云对流)次网格尺度(积云尺度)的动能向网格尺度动能的转换,结果使动能增加,因而它是另一种重要的动能源 ($5.40\mathrm{W/m^2}$). 这也表明积云对流对台风扰动的发展是非常重要的. 但由于这一项是作为余项算出,还包括所有可能的计算误差,因而上面对 $D(K)$ 的解释仅有参考意义.

表 1 中还给出四个层次的各项积分值. 在对流层中层 (300—800mb) 和下层 (800mb—

表 1　7507号台风扰动阶段的动能收支（单位：W/m²）

项目 / 层次 (mb)	$F_\phi(K)$	$F_c(K)$	$F_\chi(K)$	$F_V(K)$	$G_\phi(K)$	$G_\chi(K)$	RHS*	$\frac{\delta K}{\delta t}$	$D(K)$
50—70	0.07	−0.00	0.04	0.55	−0.95	0.54	0.24	−0.06	−0.30
70—100	0.01	0.03	0.21	0.25	−2.24	0.66	−1.08	−0.07	1.01
100—150	0.09	0.06	0.20	−0.02	−2.83	−0.43	−2.92	0.02	2.95
150—200	0.16	0.01	−0.02	−0.04	−2.52	0.05	−2.36	0.29	2.64
200—250	0.04	0.01	0.00	−0.05	−1.03	0.16	−0.83	0.03	0.86
250—300	−0.00	0.00	0.04	−0.01	−0.21	−0.02	−0.20	0.10	0.30
300—400	−0.01	0.02	0.16	−0.07	0.39	0.09	0.57	0.22	−0.35
400—500	0.03	0.00	0.19	−0.17	0.51	0.33	0.88	0.14	−0.74
500—600	0.04	0.01	0.20	−0.05	−0.17	0.34	0.38	0.13	−0.25
600—700	−0.01	0.05	0.26	0.01	−0.72	−0.43	0.03	0.08	0.05
700—800	−0.06	0.10	0.26	−0.08	−0.92	0.44	−0.26	0.08	0.34
800—850	0.01	0.07	0.19	−0.04	−0.52	0.40	0.12	0.11	−0.01
850—900	0.02	0.09	0.26	−0.04	−0.46	0.56	0.69	0.12	−0.57
900—地面	−0.05	0.12	0.51	−0.08	−0.43	0.54	0.60	0.07	−0.53
50—地面	0.33	0.57	2.50	0.16	−12.05	4.08	−4.41	0.98	5.40
100—300	0.29	0.08	0.22	−0.12	−6.59	−0.24	−6.36	0.44	6.80
300—800	−0.01	0.18	1.07	−0.36	−0.91	1.63	1.60	0.75	−0.85
800—地面	−0.02	0.28	0.96	−0.16	−1.41	1.50	1.15	0.30	−0.85
100—地面	0.26	0.54	2.25	−0.64	−8.91	2.89	−3.61	1.49	5.1

* RHS 是 (1) 式右边前六项之和.

地面）由 $G_\chi(K)$ 产生的动能最大，而 $G_\phi(K)$ 在对流层上部（100—300mb）破坏动能最显著．在对流层中下层通过辐散风有明显的动能流入．

表 2 是台风发展阶段的动能收支．与扰动阶段相比，最明显的变化是 $G_\phi(K)$ 项．在此阶段 250mb 以下是产生动能的．这种变化与台风的发展有密切关系．但 $G_\phi(K)$ 的整层积分值（2.88W/m²）仍比 $G_\chi(K)$（4.30W/m²）小得多．随着台风的发展，$G_\chi(K)$ 在对流层上部和平流层下部逐渐由产生动能变成破坏动能，而在对流层中下部动能明显增加．对整个对流层由 2.89W/m² 增加到 5.05W/m²．动能的通量仍然十分重要，由外界输入了 1.52W/m² 的动能．$F_\chi(K)$ 仍是主要的动能输入项．因而发展阶段动能收支的主要特征是：由辐散风（主要产生动能项）和无辐散风（次要项）产生的动能不足以抵消对流层的摩擦消耗，必须依靠辐散风从外界输入一部分动能以维持平衡，使台风发展，约 21% 的动能是从外界输入的．

在台风的成熟阶段（表 3），$G_\phi(K)$ 成为主要的动能产生项，整层积分值约为 $G_\chi(K)$ 的三倍半．在对流层中下部（300mb 以下）$G_\chi(K)$ 产生动能仍是增加的，但由于在对流层上部和平流层下部出现愈来愈强的动能破坏，使 $G_\chi(K)$ 的整层积分值明显减小．中低层 $G_\chi(K)$ 使动能增加与台风流场（或气压场）和辐散风场的同时加强有关．因为 $G_\chi(K)$ 取决于 $\nabla\chi$ 与 $\nabla\phi$ 梯度的相对取向，在中低层两者是同方向的，故产生动能；而在上层，气流从台风中心向外流，而高度场在台风中心为低压区，外围为高压环[6]，因而 $\nabla\chi$ 与 $\nabla\phi$ 的方向相反，使 $G_\chi(K)$ 为负，破坏动能．随着台风达到成熟阶段，高层辐散环流愈强，因而动能的破坏也愈大．

表 2　7507 号台风发展阶段的动能收支（单位：W/m²）

项目 / 层次（mb）	$F_\varphi(K)$	$F_c(K)$	$F_z(K)$	$F_V(K)$	$G_\varphi(K)$	$G_z(K)$	RHS	$\frac{\delta K}{\delta t}$	$D(K)$
50—70	0.01	−0.02	0.02	0.41	−0.53	−0.17	−0.28	−0.02	0.26
70—100	0.03	−0.04	−0.16	0.45	−0.47	−0.54	−0.70	−0.06	0.64
100—150	0.08	−0.05	−0.50	−0.50	−0.34	−0.30	−1.61	−0.11	1.50
150—200	0.07	−0.01	−0.28	0.02	−0.59	−0.26	−1.05	−0.04	1.01
200—250	0.05	0.00	−0.07	0.08	−0.31	−0.16	−0.41	−0.06	0.35
250—300	−0.01	−0.01	0.06	0.06	0.02	−0.38	0.50	−0.06	−0.56
300—400	−0.02	−0.05	0.26	−0.21	0.54	0.66	1.20	−0.07	−1.27
400—500	−0.03	−0.05	0.57	−0.08	0.80	0.89	2.10	0.05	−2.06
500—600	−0.01	−0.08	0.51	0.10	0.85	0.92	2.28	0.09	−2.19
600—700	−0.01	−0.09	0.36	0.07	0.75	0.08	1.97	0.09	−1.88
700—800	−0.05	−0.13	0.49	−0.03	0.89	0.96	2.15	0.14	−2.01
800—850	−0.05	−0.06	0.18	−0.06	0.45	0.36	0.79	0.07	−0.72
850—900	−0.06	−0.05	0.10	−0.13	0.37	0.32	0.60	0.05	−0.55
900—地面	−0.01	−0.03	0.60	−0.40	0.44	0.40	1.02	0.06	−0.96
50—地面	0.08	−0.65	2.09	−0.13	2.88	4.30	8.57	0.14	−8.44
100—300	0.11	−0.07	−0.79	−0.34	−1.22	−0.34	−2.57	−0.27	2.30
300—800	−0.12	−0.40	2.19	−0.15	3.83	4.31	9.71	0.30	−9.41
800—地面	−0.12	−0.14	0.88	−0.49	1.26	1.08	2.41	0.18	−2.23
100—地面	−0.04	−0.59	2.28	−0.83	3.88	5.05	9.55	0.21	−9.34

表 3　7507号台风成熟阶段动能的收支（单位：W/m²）

项目 / 层次（mb）	$F_\varphi(K)$	$F_c(K)$	$F_z(K)$	$F_V(K)$	$G_\varphi(K)$	$G_z(K)$	RHS	$\frac{\delta K}{\delta t}$	$D(K)$
50—70	−0.08	−0.07	0.07	0.11	0.23	−0.51	−0.26	−0.07	0.18
70—100	−0.04	−0.08	−0.01	0.16	0.50	0.93	−0.40	−0.03	0.37
100—150	0.00	0.03	−0.20	0.19	0.67	−1.02	0.33	0.16	−0.17
150—200	0.15	0.29	−0.57	0.15	−0.07	−0.93	−0.98	0.25	1.23
200—250	0.16	0.30	−0.64	0.19	0.18	−0.57	−0.38	0.22	0.60
250—300	0.04	0.13	−0.24	0.01	0.58	−0.07	0.45	0.32	−0.13
300—400	0.05	0.13	0.39	−0.46	0.87	0.87	1.85	0.84	−1.01
400—500	0.14	0.12	0.48	−0.20	0.59	0.94	2.07	0.76	−1.31
500—600	0.32	0.21	0.21	0.21	0.92	1.09	2.96	0.76	−2.20
600—700	0.37	0.24	0.16	0.25	1.31	0.91	3.24	0.76	−2.48
700—800	0.31	0.20	0.28	0.16	1.84	0.40	3.19	0.56	−2.63
800—850	0.15	0.08	0.29	0.08	1.03	0.33	1.96	0.26	−1.70
850—900	0.11	0.03	0.45	−0.07	1.00	1.05	2.57	0.36	−2.21
900—地面	0.19	−0.05	0.93	−0.59	1.01	1.54	3.03	0.51	−2.52
50—地面	1.87	1.56	1.59	0.17	10.64	3.09	18.92	5.65	−13.27
100—300	0.35	0.75	−1.65	0.54	1.36	−2.59	−1.24	0.95	2.19
300—800	1.19	0.90	1.52	−0.04	5.53	4.21	13.31	3.68	−9.63
800—地面	0.45	0.06	1.67	−0.58	3.04	2.92	7.56	1.13	−6.43
100—地面	1.99	1.71	1.54	−0.08	9.93	4.54	19.63	5.76	−13.87

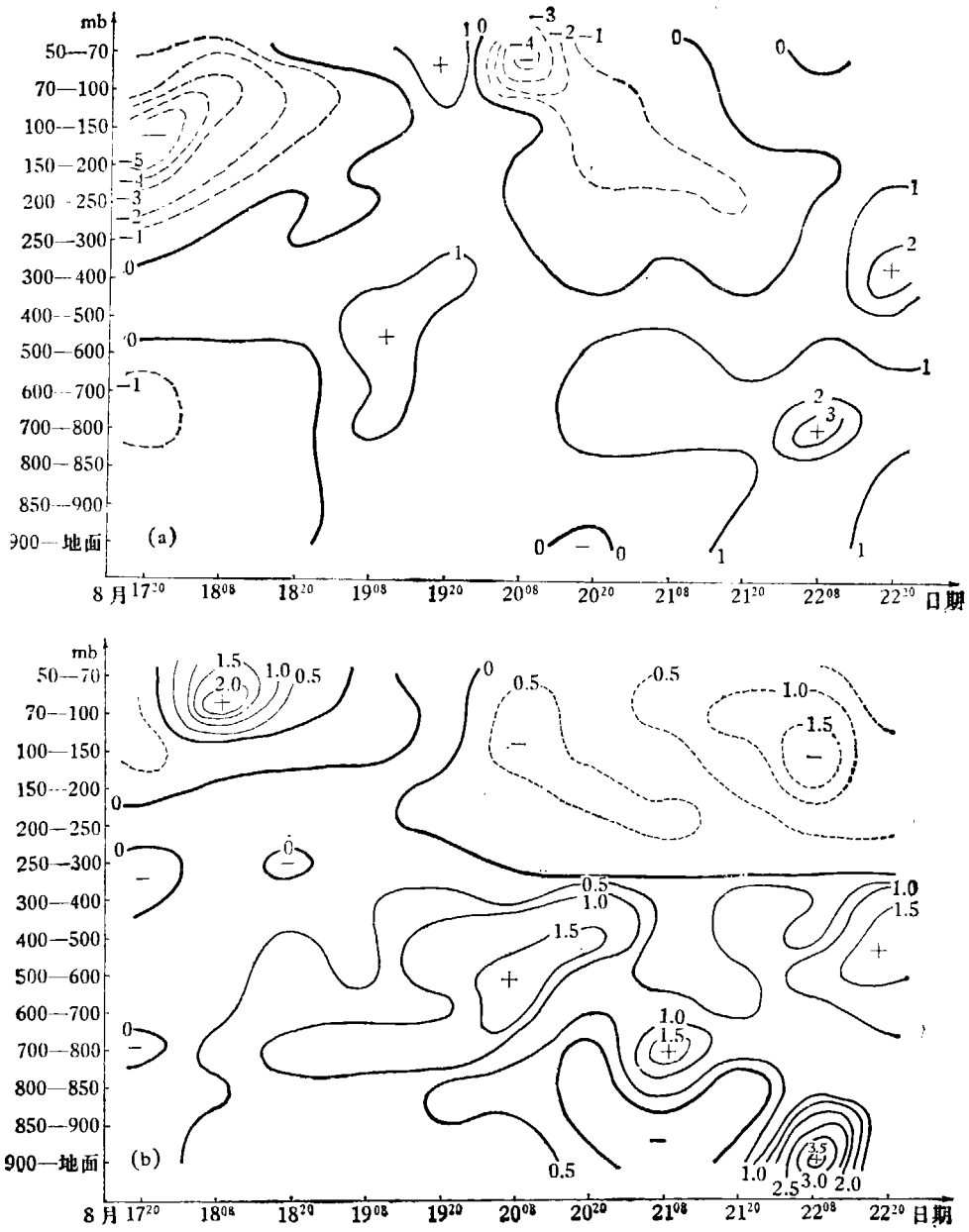

图 1　7507 号台风中无辐散风产生动能 ($G_\psi(K)$, 图 (a)) 和辐散风产生动能 ($G_\chi(K)$, 图 (b)) 的时间剖面图

(代表整个台风区平均的各层积分值. 实线为正值(产生动能),虚线为负值(破坏动能). 单位 W/m^2)

成熟期另一个明显的特点是 $F_\psi(K)$ 的输送作用显著增大,成为这个阶段动能的主要输入项. 这与 Agnes 热带风暴的计算结果一致[5]. 总通量项 ($F(K) = F_\psi(K) + F_\chi(K) + F_c(K)$) 现达到 $5.02W/m^2$, 约占总动能的 37%, 这说明从外界的动能输入即使在成熟期对于台风的能量收支也是十分重要的.

图 1 进一步给出整个台风生命期(不包括减弱时期)产生动能的 $G_\psi(K)$和$G_\chi(K)$项的时间

剖面图(对整个台风区域平均). $G_\psi(K)$ 一般也称正压能量转换过程，$G_\chi(K)$ 为斜压能量转换过程. 在初期，$G_\psi(K)$ 在对流层中下层和 250mb 以上是破坏动能的，在对流层中层为弱的正动能. 随着台风的发展，中低层逐渐转变为正动能，高层负动能明显减小，有时变为正值. $G_\chi(K)$ 的变化在对流层中上部和平流层下部正好与 $G_\psi(K)$ 相反. 因而从台风的内部动能源看，在扰动期主要通过斜压过程产生动能. 在发展阶段，两者都产生动能，到了成熟阶段，以正

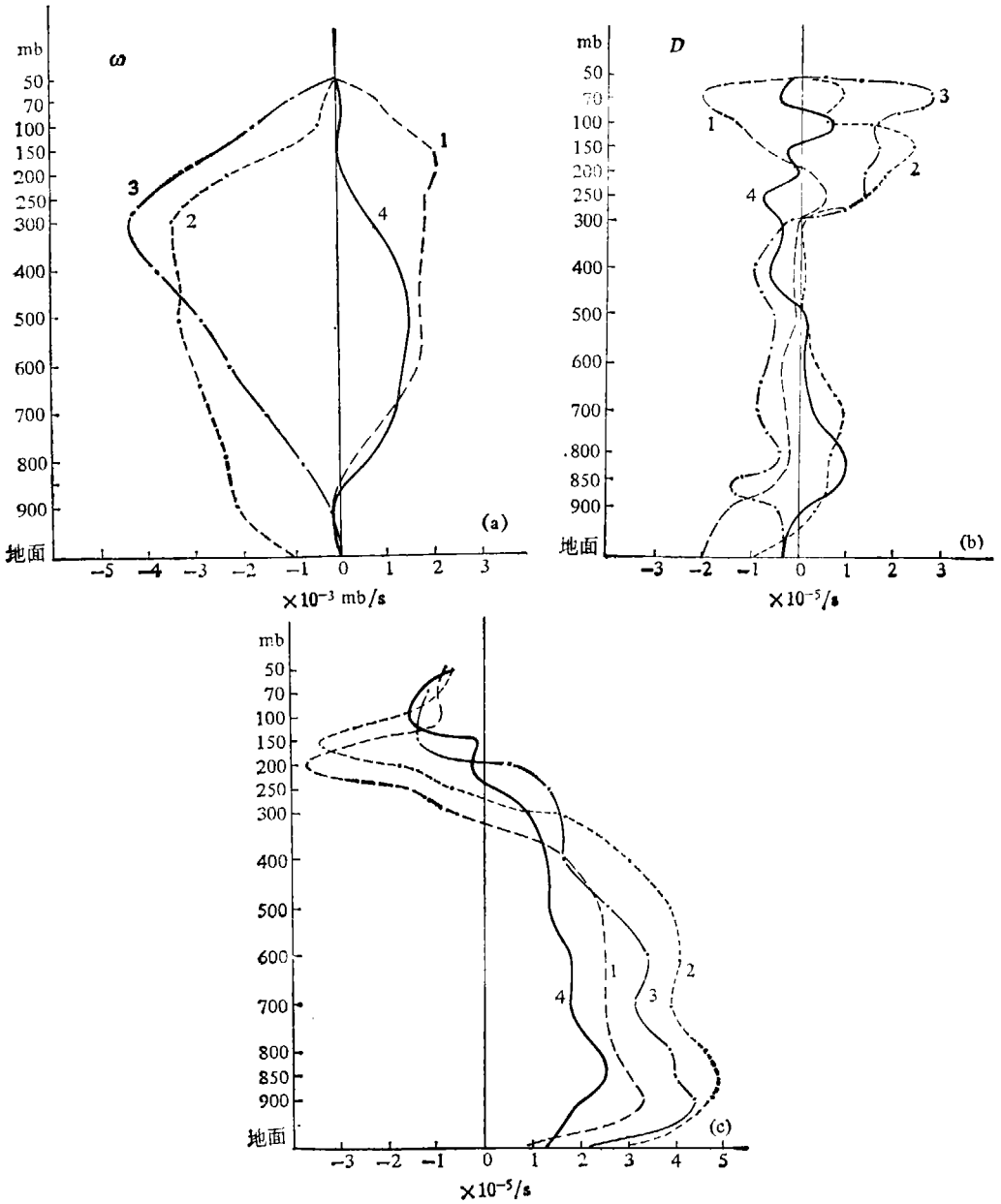

图 2 台风成熟期各象限垂直速度 (a) 散度 (b) 和涡度 (c) 的平均垂直分布

(曲线 1, 2, 3, 4 分别代表东北、东南、西南和西北象限.
单位: 垂直速度: 10^{-3}mb/s; 散度: 10^{-5}/s; 涡度: 10^{-5}/s)

压过程产生能动为主，尤其在对流层中下部．对于台风发展的三个阶段平均而言，$G_\chi(K)$ 约为 $4W/m^2$，$G_\psi(K)$ 为 $0.5W/m^2$，因而辐散风产生动能是主要的动能源，这与温带气旋[7]和变性台风中的结果相近．

四、台风中不同象限的动能收支

7507 号台风在整个生命史期间都具有不称性[6]．主要的云雨区、上升运动区和低层辐合区位于台风南半部．图 2 是台风成熟期四个象限平均的垂直速度 $\left(\omega=\frac{dp}{dt}\right)$、散度和涡度垂直廓线图．强上升运动位于东南和西南象限，而在东北和西北象限为下沉运动．散度和涡度分布南北两部分也有明显差异．由于篇幅所限，这里只重点讨论 $G_\psi(K)$ 和 $G_\chi(K)$ 的分布和变化．表 4 是台风三个阶段各象限平均的 $G_\psi(K)$ 和 G_χ 整层平均值．$G_\chi(K)$ 在各象限

表 4　台风各阶段各象限的动能制造（单位：W/m^2）

象限 \ 项目 / 阶段	$G_\psi(K)$			$G_\chi(K)$		
	扰动阶段	发展阶段	成熟阶段	扰动阶段	发展阶段	成熟阶段
东北	18.1	29.9	68.1	4.4	5.5	8.7
西北	0.2	11.9	−15.7	2.3	4.1	5.2
东南	−15.3	−3.5	13.4	5.7	5.2	5.0
西南	−15.4	−16.4	−32.7	4.4	2.6	0.1

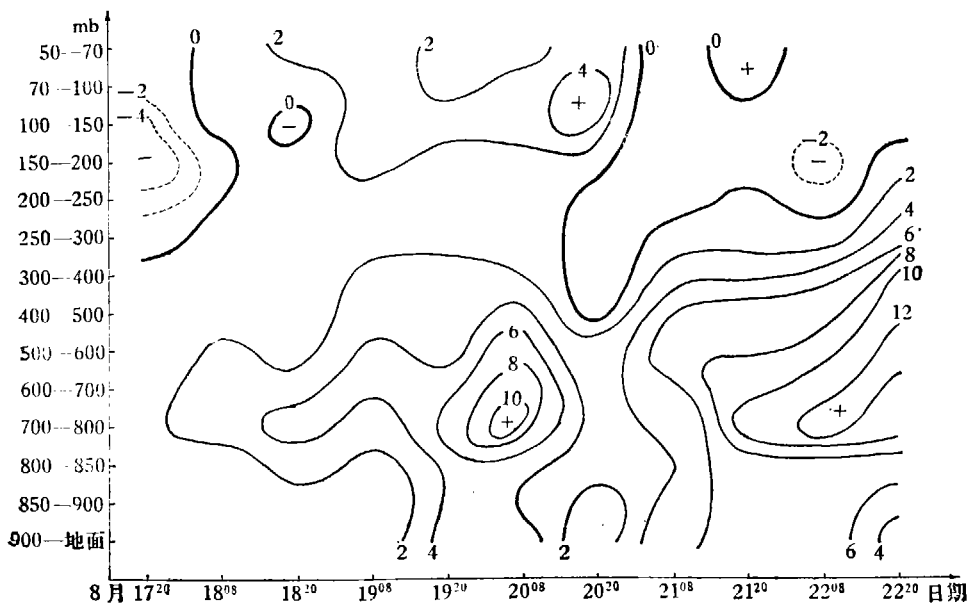

图 3　台风东北象限平均的 $G_\psi(K)$ 时期剖面图
（虚线为负值，实线为正值．单位：W/m^2）

各阶段都为正值,在东北象限有最大值. $F_\psi(K)$ 和 $F_\chi(K)$ 也在东北象限有很大的输入(图略). 台风的东北象限与副热带高压相邻,气压梯度是指向台风内区,而在中低层,气流明显向中心辐合,因而使 $\nabla\chi\cdot\nabla\phi$ 为大的正值,产生动能.

正压产生动能 ($G_\psi(K)$) 的分布也很不对称. 东北象限始终为大的正值,而西南象限始终为大的负值. 东北象限产生的动能不仅抵消了其它象限对动能的破坏,而且还有剩余使台风中的 $G_\psi(K)$ 不断增加. 如果取台风南北两半部平均,则南半部在各阶段都为动能汇,北半部各阶段都为动能源. $G_\psi(K)$ 的这种分布显然与气压场和流场的相互配置有关. 台风南半部靠近赤道辐合带,北半部靠近副热带高压. 在文献[8]中已指出,在前者形势下,有利于产生负动能,而在后者形势下有利于产生正动能,因而本文计算结果与以前计算结果是一致.

图 3 是台风东北象限 $G_\psi(K)$ 的时间剖面图. 在台风发展期和成熟期,850—400mb 中有很大的动能产生.

五、台风中扰动动能的收支

表 5—7 给出台风不同发展阶段各层区域平均的扰动动能收支. 在扰动阶段(表 5),正压转换 ($I(K_Z,K_E)$) 和斜压转换 ($I(P_E,K_E)$) 的整层积分值都为小的负值. 对于 $I(P_E,K_E)$,如果只考虑对流层 (100mb 以下),则为正的转换,即扰动有效位能释放转换成扰动动能. 对

表 5 台风扰动阶段各层区域平均的扰动动能收支 (单位: $10^{-3}\,W/m^2$)

项目 / 层次 (mb)	$I(K_Z,K_E)$	$I(P_E,K_E)$	$F_V(K_E)$	$F_V(P_E)$	$F_H(K_E)$	$F_H(P_E)$	$F_c(K_E)$	RHS*	$\frac{\delta K_E}{\delta t}$	$D(K_E)$
50—70	−0.03	17.60	7.40	307.27	38.10	−40.37	−1.13	328.44	−1.30	−330.14
70—100	5.97	−94.10	18.40	−286.40	56.13	−113.73	1.90	−411.83	1.70	413.53
100—150	20.5	−228.87	21.23	−370.27	27.60	−40.53	4.73	−565.61	9.3	574.91
150—200	17.07	92.37	6.37	−70.50	114.60	27.40	−5.67	181.64	−16.70	−198.34
200—250	10.47	13.36	7.33	−130.00	71.39	31.83	0.93	125.55	−36.00	−161.54
250—300	2.37	42.33	24.20	−68.10	14.23	−39.37	7.60	−16.74	−22.70	−5.96
300—400	16.57	−10.67	43.53	161.23	81.13	120.53	−27.47	384.85	−39.30	−424.15
400—500	24.30	−137.10	16.73	105.57	134.13	348.33	−30.27	461.69	23.00	−484.69
500—600	−71.60	42.73	25.03	−47.57	269.33	557.33	18.70	793.95	12.70	−781.25
600—700	−47.77	113.33	−8.10	−77.93	284.23	584.30	60.77	908.83	40.30	−868.53
700—800	−14.47	8.30	−3.62	47.17	223.20	575.50	121.33	924.83	92.70	−832.13
800—850	−25.53	10.47	−5.47	123.70	153.47	416.73	69.47	742.87	71.70	−671.17
850—900	−32.40	5.23	−16.63	124.30	172.53	491.57	59.07	803.67	68.70	−734.97
900—地面	8.20	−9.1	−58.47	181.63	199.93	476.50	60.77	859.46	78.00	−781.46
50—地面	−86.35	−13.88	45.37	0.10	1840.00	3396.02	340.73	5522.00	236.10	−5285.90

* RHS 代表(2)式右边前七项之和.

扰动动能的产生贡献最大的一项是 $F_H(P_E)$ 项,这一项代表外界通过边界作功而使台风扰动动能增加. $F_H(P_E)$ 与 $I(P_E,K_E)$ 之和即为扰动动能产生项 $-\boldsymbol{V}'\cdot\nabla\phi'$. 扰动动能的水平辐合是一个大项,整个层次都由外界输入扰动动能. 扰动动能和位能的垂直输送整层积分值很小,根据上下界 $\omega=0$ 的边界条件,这是应该预料的. 由上面的扰动动能收支分析可见: 在扰动阶段,无论是正压或斜压能量转换都很小,主要依靠对台风边界做功产生的动能和扰动动

能的输入来抵消摩擦消耗，并使台风发展 $\left(\frac{\delta K_E}{\delta t}>0\right)$. 这清楚地表明，在初期扰动的发展与环境的相互作用起着非常重要的作用.

在发展阶段(表 6)，最主要的变化是斜压能量转换 $I(P_E, K_E)$ 明显增大，是台风中主要的扰动动源之一. 如果只考虑对流层，斜压产生项还要大得多，最大产生层位于对流层中上层. 另一项动能产生项 $F_H(P_E)$ 仍很大，但比扰动阶段时的值明显减小. 扰动动能的水平输

表 6　台风发展阶段各层区域平均的扰动动能收支 (单位: 10^{-3}W/m²)

项目 / 层次 (mb)	$I(K_Z, K_E)$	$I(P_E, K_E)$	$F_V(K_E)$	$F_V(P_E)$	$F_H(K_E)$	$F_H(P_E)$	$F_c(K_E)$	RHS	$\frac{\delta K_E}{\delta t}$	$D(K_E)$
50—70	−3.13	42.43	9.2	306.48	−19.28	52.20	0.25	388.15	0.30	−387.85
70—100	−50.58	−203.18	52.95	175.25	−56.98	105.40	0.63	23.49	4.30	−19.19
100—150	−120.10	−451.78	82.58	−118.48	−225.50	110.55	7.25	−75.48	−12.00	703.48
150—200	−35.08	207.03	1.60	−295.25	−182.70	74.08	8.85	−221.47	9.75	231.22
200—250	−2.33	416.25	0.98	−283.98	34.88	109.83	6.15	281.78	23.00	−258.78
250—300	−31.15	217.00	30.15	−250.23	24.58	−260.83	10.08	−260.4	8.30	268.70
300—400	−52.13	332.18	70.58	−671.18	124.80	−530.00	47.78	−677.97	20.00	697.97
400—500	89.83	388.05	62.25	−420.85	262.25	368.80	62.23	812.56	54.00	−758.56
500—600	90.48	263.75	−11.28	−8.30	254.00	549.95	53.85	1192.45	61.00	−1131.45
600—700	−117.73	235.73	−45.23	343.25	132.20	654.08	39.48	1241.78	53.00	−1188.78
700—800	−238.55	115.78	25.70	447.20	144.25	650.88	43.43	1188.69	43.00	−1145.69
800—850	−20.25	26.80	0.75	152.80	125.40	265.70	36.10	587.30	18.00	−569.30
850—900	−21.08	29.65	−61.03	187.20	134.15	293.18	25.85	587.92	31.00	−556.92
900—地面	−62.55	23.90	−166.78	485.45	170.00	435.75	71.78	957.55	91.00	−866.55
50—地面	−574.35	1643.59	52.42	49.36	922.05	2879.57	413.71	5386.35	404.65	−4981.70

表 7　台风成熟阶段各层区域平均的扰动动能收支 (单位: 10^{-3}W/m²)

项目 / 层次 (mb)	$I(K_Z, K_E)$	$I(P_E, K_E)$	$F_V(K_E)$	$F_V(P_E)$	$F_H(K_E)$	$F_H(P_E)$	$F_c(K_E)$	RHS	$\frac{\delta K_E}{\delta t}$	$D(K_E)$
50—70	7.41	−106.80	−5.01	−150.60	31.27	44.53	0.97	−178.23	3.00	181.23
70—100	39.02	−241.30	−12.11	−326.70	43.47	113.30	3.53	−380.79	6.00	386.79
100—150	103.90	0.73	−2.85	−735.47	157.67	43.50	11.94	−420.58	21.00	441.58
150—200	132.50	481.33	2.84	−620.40	170.50	−39.27	4.63	132.13	34.00	−98.13
200—250	150.32	703.97	76.87	−824.87	26.47	−92.53	−11.17	29.06	14.70	−14.36
250—300	94.82	666.18	−1.56	−641.10	−149.47	−34.00	−40.73	−105.86	26.00	131.86
300—400	−238.33	1457.77	−268.70	−1054.37	−215.47	1241.53	−93.67	828.76	141.70	−687.06
400—500	−539.17	1060.93	−97.70	−686.00	−118.23	1731.80	−30.53	1321.00	270.70	−1050.30
500—600	−621.23	374.37	134.97	335.70	−291.97	1379.77	33.37	1344.98	460.70	−884.28
600—700	−876.63	249.53	185.97	907.70	−410.83	1122.47	37.33	1215.44	491.30	−724.14
700—800	−858.43	90.20	190.77	1151.50	−252.13	541.27	3.60	866.78	433.00	−433.78
800—850	−280.17	−16.40	83.07	629.70	19.23	34.27	19.47	489.17	223.00	−266.17
850—900	−174.30	−32.87	−8.33	650.93	−31.87	210.07	10.00	623.63	267.70	−355.93
900—地面	−56.00	−48.90	−199.00	1364.00	−38.93	401.70	−27.20	1395.67	315.00	−1083.67
50—地面	−3116.29	4638.74	79.23	0.02	−1060.39	6698.41	−78.56	7161.16	2707.80	−4453.36

入显著减小. 因而由上可见: 随着台风的发展,台风内斜压能量的产生显著增大,成为主要的扰动动能源之一. 但它与 $F_H(P_E)$ 一起还不足以完全抵消摩擦消耗,仍需要从外界输入一部分动能,但输入量值比扰动期大大减小. 这说明发展的台风从能量上变为更加独立的系统.

在成熟阶段 (表 7), $I(P_E, K_E)$ 显著增大,最大产生层在对流层中上层 (500—200mb). $F_H(P_E)$ 也增大很多,这两项之和为 11.337W/m ,比发展期增加一倍半左右,所产生的动能除抵消由 $I(K_Z, K_E)$ 形成的扰动动能消耗 ($-3.116W/m^2$) 以及摩擦消耗 ($-4.453W/m^2$) 外,还有相当一部分扰动动能 ($-1.060W/m^2$) 从台风区输出. 因而成熟期的台风相对于环境转变为扰动动能的源区. 这个结果与文献 [8] 所得到的完全一致. 台风由初期动能汇经过发展阶段最后转变为动能源,这与台风凝结加热以及斜压能量转换的迅速增加密切有关. 在本文的第二部分,将讨论这个问题.

六、结 论

本文对 1975 年 7 号台风总动能和扰动动能的收支情况进行了计算,得到如下一些主要结果:

1. 在总动能收支中,在扰动阶段辐散风作功是主要的动能产生项,而无辐散风作功是破坏动能的. 台风增长所需的能量一是依靠动能的输入(主要由辐散风); 一是通过积云尺度与台风尺度之间的能量转换. 在发展阶段,无辐散风和辐散风都产生动能. 在成熟阶段,以无辐散风动能为主,它比辐散风动能大二倍半. 无辐散风的动能输送也变为主要输入项. 因而随着台风的发展,无辐散风的动能产生和输送愈来愈重要. 从整个台风生命期平均而言,辐散风动能产生为 $4W/m^2$, 而无辐散风动能产生很小,只有 $0.5W/m^2$.

2. 台风中扰动动能的收支表明: 在台风初期,扰动动能较小,因而需要从外界输入相当数量的扰动动能. 随着台风的发展,扰动动能明显增大,这时只需输入很少的动能就可抵消摩擦消耗和增加台风的扰动动能. 到成熟阶段,台风中有大量扰动动能产生,除克服摩擦消耗外,有相当数量扰动动能输出,使台风由初期的扰动动能汇转变为动能源.

3. 由斜压转换项产生的扰动动能主要出现在对流层中上层,而由气压梯度力在边界作功产生的扰动动能则以对流层中下层最显著. 两者之和则在对流层上下层各呈现一个最大产生动能层. 许多热带大气和天气系统能量的研究都表明了这一点[9]. 正压能量转换总是破坏扰动动能的.

参 考 文 献

[1] Anthes, R. A., *Rev. Geophy. Space Phy.*, **12**(1974), 495—522.
[2] Vincent, D. G., Gommel, W. R. and Chang, L. N., *Mon. Wea. Rev.*, **102**(1974), 35—47.
[3] Vincent, D. G., Chang, L. H., *Tellus*, **27**(1975), 215—233.
[4] Kornegay, F. C. and Vincent, D. G., *Mon. Wea. Rev.*, **104** (1976), 849—859.
[5] Dimego, G. J. and Bosart, L. F., *ibid.*, **110** (1982), 412—433.
[6] 丁一汇、张键、刘月贞, 近海台风论文集, 交通出版社, 1985.
[7] Chen, T. C., Alpert, J. C. and Schlater, T. W., *Mon. Wea. Rev.*, **106**(1978), 458—468.
[8] Ding, Yihui and Reiter, E. R., *Arch. Met. Geoph. Biocl.*, Ser. A, 32, 201—229.
[9] Kung, E. C., *Quart. J. R. Met. Soc.*, **101** (1975), 293—312.