

台风中动能收支的研究

——II. 辐散风动能和无辐散风动能的转换

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

本文是研究台风中动能收支的第二部分。重点讨论辐散风与无辐散风动能之间的转换及其与加热场之间的关系, 结果发现:

(1) 随着台风的发展, 中低层辐散风与无辐散风动能之间的转换函数 $C(K_x, K_\phi)$ 明显增加, 而上层减小, 但对整个层次则为显著增加。这可解释台风发展中风场的变化。对 $C(K_x, K_\phi)$ 贡献最大的项是 $C_1 = f\nabla\chi \cdot \nabla\phi$, 其次是 $C_2 = \nabla^2\phi\nabla\chi \cdot \nabla\phi$, 因而决定于 χ 场和 ϕ 场梯度的相对取向, 最终取决于台风加热场的特征。

(2) 台风中加热场 (Q_{P+I}) 和有效位能与辐散风动能之间转换项 ($C(P, K_x)$) 的演变和分布与 $C(K_x, K_\phi)$ 十分一致。这表明台风中的加热场是通过上两个转换函数影响台风的加强和发展, 因而本文揭示了台风中的加热场影响台风风场的物理过程。

一、引 言

风向量可以分解为辐散部分和无辐散部分。一般在大尺度运动条件下, 风的辐散分量的量值虽然比无辐散分量小得多, 但它在环流演变和天气系统的发展中起着非常重要的作用。Chen 等^[1]计算了北美的一个强发展气旋中辐散风和无辐散风在动能收支中的相对重要性。他们发现, 辐散风动能虽然只占总动能的 1—2%, 但它对动能的水平通量辐合和动能产生非常重要。在整个风暴生命期间, 总动能通量辐合的 25% 左右是由辐散风完成的。由斜压过程产生的动能 (即 $-\mathbf{V}_\chi \cdot \nabla\phi$) 平均为 8.1W/m^2 , 由正压过程产生的动能 (即 $-\mathbf{V}_\phi \cdot \nabla\phi$) 为 -6.4W/m^2 。后来 Dimego 和 Bosart^[2] 对一个大西洋变性的热带风暴, 谢安等^[3]对梅雨期的辐散风动能产生都作了计算, 得到了类似结果。在本文的第一部分^[4]也指出, 辐散风动能产生是主要的动能源。这些结果都表明辐散风是天气系统中动能产生的主要因子。根据 Chen 和 Wiin-Nielsen^[5] 的计算, 总位能首先被转化为辐散气流的动能, 而辐散气流的动能又转化为无辐散气流的动能, 最后表现为总动能或风场的加强。因而实际上位能并不能直接转换成无辐散风动能, 而是先通过转换成辐散风动能再转换成无辐散风动能。前面的一种转换即有效位

能的释放,由转换函数 $C(P, K_\chi)$ 表示,后面的一种转换由转换函数 $C(K_\chi, K_\psi)$ 表示.

在台风中过去还没有人研究上述能量转换过程及其与台风发展的关系. 本文主要目的是计算台风中不同发展阶段的 $C(P, K_\chi)$ 和 $C(K_\chi, K_\psi)$, 试图以此了解加热场的作用以及 ϕ - χ 转换函数与台风发展的关系.

二、资料和计算方法

本文所计算的个例和资料同文献[4].

单位质量的总动能

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} \mathbf{V} \cdot \mathbf{V} = \frac{1}{2} (\mathbf{V}_\psi + \mathbf{V}_\chi) \cdot (\mathbf{V}_\psi + \mathbf{V}_\chi) \\ &= \frac{1}{2} |\nabla\psi|^2 + \frac{1}{2} |\nabla\chi|^2 - J(\psi, \chi) = K_\psi + K_\chi - J(\psi, \chi), \end{aligned} \quad (1)$$

上式中 $\mathbf{V}_\psi$ 和 $\mathbf{V}_\chi$ 分别为无辐散风和辐散风分量, $\mathbf{V}_\psi = \mathbf{K} \times \nabla\psi$, $\mathbf{V}_\chi = -\nabla\chi$, ψ 和 χ 分别是流函数和速度势. K_χ 是辐散风动能, K_ψ 是无辐散风动能.

根据涡度方程、散度方程和热力学方程可推得开系情况下的无辐散风动能、辐散风动能和总位能变率的方程如下^[6]:

$$\frac{\partial K_\psi}{\partial t} = B_\psi + C(K_\chi, K_\psi) + F_\psi, \quad (2)$$

$$\frac{\partial K_\chi}{\partial t} = B_\chi + C(P, K_\chi) - C(K_\chi, K_\psi) + F_\chi, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(P+I)}{\partial t} = B_{P+I} - C(P, K_\chi) + Q_{P+I} + F_T. \quad (4)$$

上式中 $C(K_\chi, K_\psi)$ 是 K_χ 和 K_ψ 的转换函数.

$$C(K_\chi, K_\psi) = f \nabla\psi \cdot \nabla\chi + \nabla^2\psi \nabla\chi \cdot \nabla\psi + \frac{|\nabla\psi|^2}{2} \nabla^2\chi + \omega J \left(\psi, \frac{\partial\chi}{\partial P} \right), \quad (5)$$

$C(P, K_\chi)$ 是总位能与 K_χ 之转换函数,

$$C(P, K_\chi) = -\chi \nabla^2\phi = -\nabla \cdot (\chi \nabla\phi) + \nabla \cdot (\phi \nabla\chi) - \frac{\partial\phi\omega}{\partial P} - \frac{R}{P} \omega T. \quad (6)$$

B_ψ 和 B_χ 分别是无辐散风和辐散风动能之通量项,前者包括 7 项,后者包括 15 项(略). F_ψ , F_χ 和 F_T 为摩擦消耗. 由方程(2)和(3)可见,对一个闭合系统 ($B_{P+I} = B_\psi = B_\chi = 0$),无辐散风动能只能通过 ϕ - χ 相互作用项 ($C(K_\chi, K_\psi)$) 从辐散运动中得到动能. $C(K_\chi, K_\psi)$ 包括四项. 第一项 $f \nabla\psi \cdot \nabla\chi$ (以下简称 C_1) 的量值取决于 $\nabla\psi$ 和 $\nabla\chi$ 向量的相对取向. 如果它们近于平行,则转换率最大,近于垂直转换最小. 在北半球 ($f > 0$),如 $\nabla\psi$ 和 $\nabla\chi$ 向量之间夹角小于 90° ,则动能转换是从辐散动能转为无辐散动能. 如两者夹角大于 90° ,即 $\nabla\psi \cdot \nabla\chi < 0$,则情况相反. 第二项 $\nabla^2\psi \nabla\chi \cdot \nabla\psi$ (下称 C_2) 与 C_1 意义相近. 在北半球气旋性涡度区 ($\nabla^2\psi > 0$),转换方式与前述相同. 第三项 $\frac{\nabla\psi \cdot \nabla\phi}{2} \nabla^2\chi$ (下称 C_3) 表示水平辐散与无辐散动能之间的相关. 如果有水平辐合,无辐散动能迅速增长. 第四项 $\omega J \left(\psi, \frac{\partial\chi}{\partial P} \right)$

(下称 C_s) 中, 大的 $\frac{\partial \chi}{\partial p}$ 区一般也与辐合的垂直变化大值区相关 (即 $\frac{\partial \chi}{\partial p} \approx -\lambda^2 \frac{\partial}{\partial p} \nabla^2 \chi$), 如果有上升运动, 沿着 $\frac{\partial \chi}{\partial p}$ 大值区向下游, 能量由辐散动能转化为无辐散动能。沿此区向上游, 情况相反。

$C(P, K_\chi)$ 代表有效位能向辐散风动能的斜压转换, 如果考虑的是闭合系统, $C(P, K_\chi) = -\frac{R}{p} \omega T$ 。方程 (2)–(6) 即为辐散风和无辐散风形式的能量方程组。对于定常状态的闭合系统, 由非绝热加热产生的总位能, 除一部分被摩擦消耗外, 其余的通过 $C(P, K_\chi)$ 转换为 K_χ , 其中一部分被摩擦消耗掉, 剩余的则通过 $C(K_\chi, K_\phi)$ 转换为 K_ϕ 以抵消摩擦消耗, 维持系统的强度。因而在这个转换中, 非绝热加热场是最终的内部能量源。

台风中非绝热加热场 $Q_{P+I} = Q_L + Q_S + Q_R$, Q_L 代表凝结加热, 它又包括大尺度凝结加热 (Q_{SL}) 和积云对流加热 (Q_{CL})。它们的计算公式分别为:

$$Q_{CL1} = a C_p (T_s - T) \quad (7)$$

$$Q_{SL} = \begin{cases} -L\omega \frac{\partial q_s}{\partial p}, & \text{当 } \omega < 0 \text{ 和 } q/q_s > 0.8, \\ 0, & \text{当 } \omega > 0 \text{ 和 } q/q_s < 0.8. \end{cases} \quad (8)$$

根据郭晓岚 1965 年积云参数化方案^[7], $a = \frac{I_1}{Q}$, I_1 是流入整个气柱的水汽辐合, 其值为:

$$I_1 = \left[\frac{1}{g} \int_{p_B}^{p_T} \nabla \cdot (qV) dp - \frac{\omega_B q_B}{g} \right] \tau,$$

Q 的表达式为:

$$Q = \frac{C_p}{gL} \int_{p_T}^{p_B} (T_s - T) dp + \frac{1}{g} \int_{p_T}^{p_B} (q_s - q) dp,$$

T_s 是云中温度, T 是环境温度, ω_B , q_B 分别是云底高度处的垂直速度和比湿, τ 是积云生命周期, p_B 和 p_T 分别为云底和云顶气压。

我们也用郭晓岚 1974 年积云参数化方案^[8]计算了积云加热, 其公式为:

$$Q_{CL2} = \frac{g(1-b)L \cdot J_2 [T_s(p) - T(p)] \pi}{(p_B - p_T) \langle T_s - T \rangle}, \quad (9)$$

上式中 b 是湿润因子, 这里取 $b = 0$, $\pi = \frac{\theta}{T} = \left(\frac{1000}{P} \right)^{R/C_p}$,

$$\langle T_s - T \rangle = \frac{1}{p_B - p_T} \int_{p_T}^{p_B} (T_s - T) dp,$$

$$I_2 = \left[-\frac{1}{g} \int_{p_T}^{p_B} \nabla \cdot (qV) dp + \rho_s C_D |V_s| (q_s - q_s) \right] \tau.$$

p_s 是地面气压, ρ_s , V_s 和 q_s 分别是地面空气密度、风向量和比湿, q_s 是海面温度下的饱和比湿, C_D 是阻力系数, 这里取 0.003。

感热通量 Q_s 只在最低层考虑。地表面感热通量:

$$F_s = C_D \rho_s C_p (T_s - T_s) |V_s|.$$

设 850mb 感热通量为零, 则在边界层的感热加热为:

$$Q_s = \frac{gF_s}{p_s - 850} \quad (10)$$

我们这里没有直接计算 Q_R , 而是取文献[9]中的值. 平均来说, 在 300mb 以下晴空区的冷却率为 $-2-3^\circ\text{C}/\text{天}$, 而云区为 $-1-1^\circ\text{C}/\text{天}$. Q_L , Q_s 和 Q_R 相比, Q_L 比 Q_s 和 Q_R 大得多.

三、辐散风动能和无辐散风动能之间的转换

图 1 给出 900—800mb 层中台风区平均的总动能 (K)、无辐散风动能 (K_ϕ) 和辐散风动能 (K_x) 随时间的变化. 总动能从发展阶段开始(8月19日08时, 北京时间, 下同)非常迅速地上升, 几乎增加一倍, 这反映了台风的发展和加强. 以后在成熟阶段大致维持在这个水平. K_ϕ 的变化几乎与 K 的变化一致, 因而总动能的加强主要由 K_ϕ 的增加造成. K_x 很小并且变化也不大. 在对流层中低层的其它层次, K , K_ϕ 和 K_x 具有类似的变化过程. 随着台风的发展, 对流层上部 (300—100mb) 的 K_x 有一定增加, 这反映了高空流出环流的增强. 因而对于台风区 K , K_ϕ 和 K_x 的整层积分值都随台风的发展而不断增加 (表 1). 其中 K 和 K_ϕ 增加最显著. K_x 只有很小的增加. K_ϕ 和 K_x 平均分别占总动能的 80% 和 8% (见表 1 中括号的数值), 因而 K_x 的量值很小.

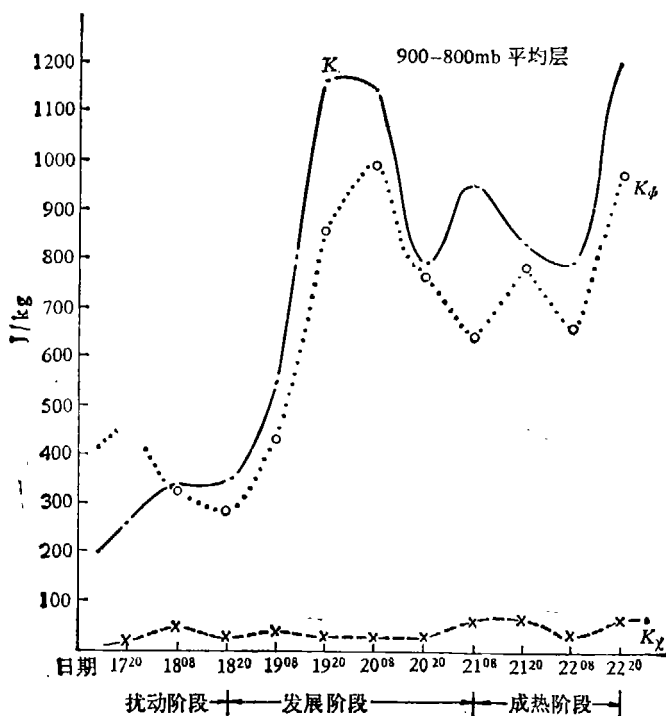


图 1 900—800 mb 台风区平均总动能(K), 无辐散风动能 (K_ϕ) 和辐散风动能 (K_x) 的时间变化(单位: J/kg)

由上面的分析可见, K 和 K_ϕ 的变化很大, 并且是一致的, 而 K_x 没有明显增加. 这表明由加热场制造的总位能 ($P + I$), 通过 $C(P, K_x)$ 转变成了 K_x , 其中绝大部分的 K_x 又通过

表 1 台风不同阶段从地面到 50 mb 层中的动能值 (单位: 10^3J/kg)

项 目 \ 阶 段	扰 动 阶 段	发 展 阶 段	成 熟 阶 段
K	5.5	5.8	6.1
K_x	2.8(0.80)	4.2(0.72)	5.2(0.85)
K_y	0.3(0.08)	0.4(0.07)	0.5(0.08)

$C(K_x, K_y)$ 转换成了 K_y 。因而分析上两个转换函数, 对于了解台风中风场的变化是非常重要的。

表 2 是台风扰动时期各层 $C(K_x, K_y)$ 及其四个分项 C_1, C_2, C_3 和 C_4 的计算值。对流层各层的 $C(K_x, K_y)$ 皆为正值, 平流层下部为负。这表明在对流层中 K_x 是向 K_y 转换的, 从而增加总动能 K 。正转换最大的层次在低层。另外, 在 300—100mb 也有明显的正转换。对 $C(K_x, K_y)$ 正转换贡献最大的项是 C_1 (占 90%)。其它项的作用较小。

表 2 台风扰动期台风区平均的各层 $C(K_x, K_y)$ 值 (单位: 10^{-3}W/m^2)

项 目 \ 层 次 (mb)	C_1	C_2	C_3	C_4	$C(K_x, K_y)$
50—70	176.8	-25.9	-135.5	-124.7	-109.3
70—100	355.8	-52.4	-270.2	-101.4	-68.2
100—150	498.0	-71.6	-153.2	171.9	445.1
150—200	405.9	-60.1	-189.6	152.5	308.7
200—250	119.8	-22.5	-82.6	313.1	327.6
250—300	-34.1	-1.4	-10.6	225.0	178.9
300—400	-21.9	1.5	11.5	69.2	60.3
400—500	30.0	13.6	6.3	11.2	61.1
500—600	114.6	23.0	54.7	-40.7	151.6
600—700	309.6	53.9	58.8	-68.6	353.6
700—800	315.3	45.9	121.2	-94.0	388.4
800—850	157.1	5.2	74.4	-91.2	145.5
850—900	232.2	14.3	127.2	42.0	415.5
900—地面	691.1	119.9	202.8	34.8	1048.5
50—地面	3350.1	43.4	-185.0	499.1	3707.6

在发展阶段 (表 3), $C(K_x, K_y)$ 值比扰动时期增大, 由 $3707.6 \times 10^{-3}\text{W/m}^2$ 增加到 $4150.9 \times 10^{-3}\text{W/m}^2$, 这表明有更多的 K_x 转换为 K_y , 因而使台风发展。 $C(K_x, K_y)$ 的增加, 主要由 500mb 以下正转换的显著增大造成, 这与图 1 中所示的 900—800mb 层中 K_y 和 K 迅速增大的事实一致。在对流层上层出现负转换, 即由 K_y 转换成 K_x , 从而可使 K_y 和 K 减小。这种负转换的出现与台风的高空反气旋流出环流的发展以及台风环流的向上伸展有关。对 $C(K_x, K_y)$ 贡献最大的项也是 C_1 (占 93%), 其次是 C_2, C_3 的作用较小。 C_4 总的贡献使 K_y 向 K_x 转换。

在成熟阶段 (表 4), 整层 $C(K_x, K_y)$ 值比发展时期有显著增加, 由 $4150.90 \times 10^{-3}\text{W/m}^2$ 增加到 $7315.2 \times 10^{-3}\text{W/m}^2$, 达到整个台风生命期的最大值。这与成熟期台风有最强的风速 (34m/s) 的事实是一致的。正转换层出现在 300mb 以下, 尤其是 850mb 以下很强。同时在对

表 3 台风发展时期台风区平均的各层 $C(K_x, K_\phi)$ 值 (单位: $10^{-3}W/m^2$)

项 目 层次 (mb)	C_1	C_2	C_3	C_4	$C(K_x, K_\phi)$
50—70	168.7	-25.7	-70.9	-132.0	-59.9
70—100	455.0	-90.6	-144.1	-154.0	66.1
100—150	437.0	-156.0	-99.0	108.8	290.8
150—200	10.3	-40.2	-78.4	67.2	-41.1
200—250	-168.8	-31.2	-42.4	83.7	-158.9
250—300	-96.7	-22.6	3.4	-4.5	-120.4
300—400	138.7	-7.4	33.8	-186.2	-21.1
400—500	473.4	228.0	80.6	-278.6	503.4
500—600	590.6	241.0	22.5	-134.6	719.5
600—700	429.8	228.8	12.5	-40.1	631.0
700—800	450.6	232.5	92.5	-37.6	738.0
800—850	168.7	43.2	85.3	-72.6	224.6
850—900	119.4	14.4	111.6	-26.6	218.8
900—地面	685.4	200.4	233.2	41.1	1160.1
50—地面	3862.1	814.6	240.2	-766.2	4150.9

表 4 台风成熟期台风区平均的各层 $C(K_x, K_\phi)$ 值 (单位: $10^{-3}W/m^2$)

项 目 层次 (mb)	C_1	C_2	C_3	C_4	$C(K_x, K_\phi)$
50—70	293.9	-39.6	20.2	-108.2	166.3
70—100	603.1	-99.7	60.9	-104.9	459.4
100—150	601.1	-190.0	38.2	40.7	490.0
150—200	231.7	-187.4	-71.2	-196.7	-223.6
200—250	-174.8	-138.2	-54.8	-227.7	-595.5
250—300	-21.8	-26.9	14.1	-78.2	-112.8
300—400	477.6	116.5	111.4	59.6	765.1
400—500	515.6	164.7	98.5	47.1	825.9
500—600	496.4	281.3	25.3	-110.7	692.3
600—700	347.1	264.2	-72.5	-195.6	342.2
700—800	160.3	250.2	319.6	-288.6	441.8
800—850	254.6	228.8	-190.5	-82.5	210.8
850—900	701.2	436.9	-23.9	-3.5	1110.7
900—地面	1742.7	752.5	175.9	72.6	2743.0
50—地面	6227.7	1813.0	450.8	-1176.3	7315.0

流层上层 (250—150mb) 负转换也增加,这与高空流出层的进一步加强有关。与发展阶段一样,对 $C(K_x, K_\phi)$ 贡献最大的项仍是 C_1 (约占 85%), 其次是 C_2 , C_4 是负贡献,使 K_ϕ 动能破坏。 C_3 的作用最小。

上面 $C(K_x, K_\phi)$ 的分析很好地说明了台风内中低层动能变化的观测事实。其中 C_1 项在各阶段的贡献都是最大。图 2 清楚地说明了 C_1 随台风发展的增加过程。最后当 $\nabla\phi$ 与 $\nabla\chi$ 逐渐趋于平行时, C_1 转换达最大值。对于原先两者不一致的分布,为了使 $\nabla\phi$ 与 $\nabla\chi$ 趋于一致,主要是改变 χ 场的梯度。根据 ω 方程和连续方程

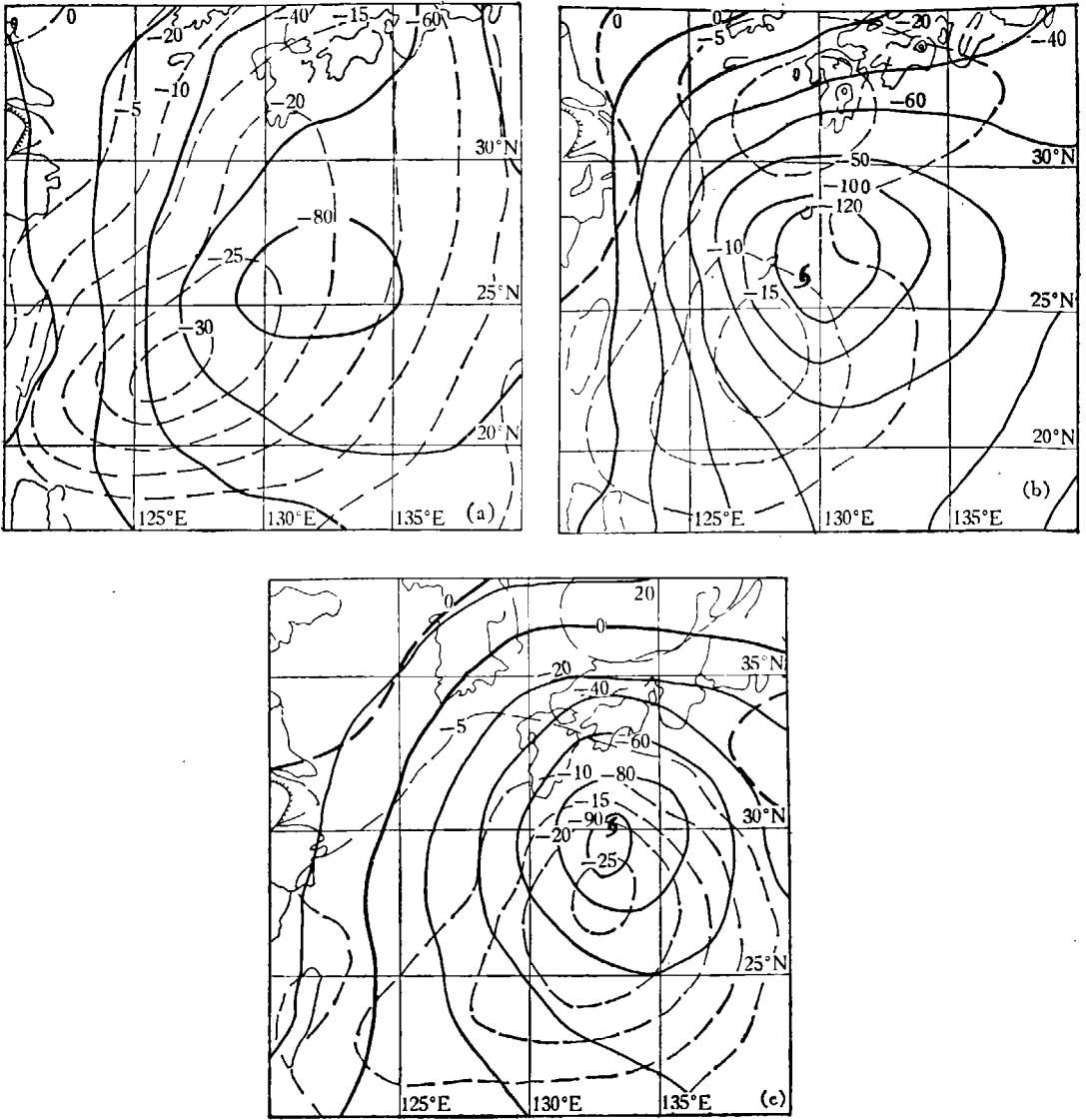


图 2 850 mb 的 ϕ 场和 χ 场分布
((a) 8 月 18 日 08 时; (b) 8 月 20 日 08 时; (c) 8 月 22 日 08 时。
实线: ϕ 场, 虚线: χ 场. 单位: $10^3 \text{ m}^2/\text{s}$)

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \omega + \frac{f^2}{\sigma} \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} &= F_1 + F_2, \\ \nabla^2 \chi_i &= \frac{\partial \omega_i}{\partial p}, \\ \chi &= \chi_1 + \chi_2. \end{aligned} \right\} i = 1, 2,$$

χ 场的变化主要取决于加热场的强迫项 F_2 (F_1 是除加热以外的所有强迫项, σ 是静力稳定度)。从方程(2)一(4)也可以看到, 加热场通过 $C(P, K_\chi)$ 首先改变 K_χ 场(即 χ 场), 以后通过 $C(K_\chi, K_\phi)$ 才能影响 K_ϕ 和 K 场。因而分析台风中非绝热加热场的分布和 $C(P, K_\chi)$ 的特征

是进一步了解 K_x 和 K_x 转换所必需的。

四、非绝热加热和转换函数 $C(P, K_x)$

由方程(3)和(4)可知, K_x 是通过 $C(P, K_x)$ 由位能转化而来的, 而位能又是由非绝热加热产生的。对于稳态 $\left(\frac{\partial(P+I)}{\partial t} = 0\right)$ 的闭合 ($B_{P+I} = 0$) 系统, 所制造的位能除部分被摩擦消耗外, 其余的都通过 $C(P, K_x)$ 转换为 K_x 。加热愈强, 转换为 K_x 的值应愈大。以后通过 $C(K_x, K_\phi)$ 转换成 K_ϕ 的动能也愈大。图 3 是台风三个不同发展阶段的总加热 (Q_{P+I})。其中

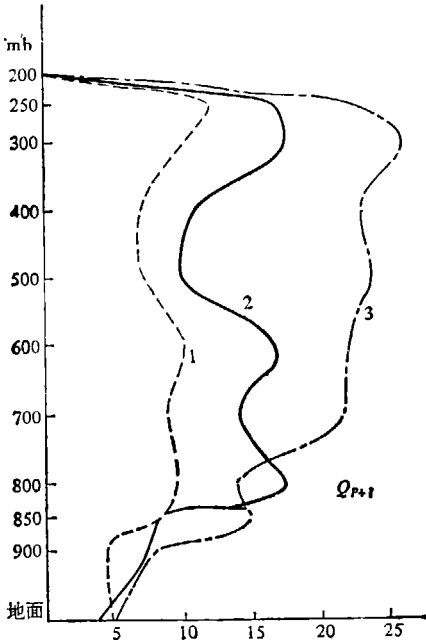


图 3 不同阶段台风区平均的非绝热加热 (Q_{P+I}) 垂直分布

(单位: 度/天, 计算方法见正文, 1, 2, 3 曲线分别代表扰动, 发展和成阶段(下同))

对流加热由(7)式计算出来的。由(9)式计算的积云加热值一般比(7)式大 3—5 倍。在 Q_{P+I} 中, 贡献最大的是凝结潜热加热, 其中对流加热又比大尺度加大大。对流加热的峰值主要位于 400—200mb 层, 而大尺度加热的峰值主要位于 850—500mb 层。感热则只在边界层中考虑, 一般比较小。辐射加热比潜热加热小一个量级。由图 3 可知, 在台风扰动期, 台风区平均加热率在 800—200mb 层为 $10^\circ\text{C}/\text{天}$ 左右, 峰值位于 250mb。另外, 在 800—600mb 层中也是加热的大值区。在发展阶段, 850mb 以上各层的加热都增加, 仍然出现两个大值, 分别在上层和中层。地面—100mb 总加热比扰动时期增加 49%。在成熟期, 加热有明显增加, 尤其是在对流层上部。这主要是由于积云加热明显增大的缘故。整层加热比扰动时期增加 117%。因而随着台风的发展和加强, 台风区的加热明显增加, 尤其在对流层中上层。有效位能的产生也增加, 这就可能有更多的位能转换成动

能。

图 4 是不同阶段台风区平均的 $C(P, K_x)$ 垂直廓线。实际上, 它主要代表有效位能与扰动动能之间的转换。对于一个闭合区域, 因为当 $p = p_b$, $\omega = 0$; $p = p_t$, $\omega = 0$, 以及

$\frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \nabla \cdot (\chi \nabla \phi) dp = 0$, $\frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \nabla \cdot (\phi \nabla \chi) dp = 0$, 由(6)式可得:

$$\frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} [C(P, K_x)] dp = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \left[-\frac{R}{P} \omega T \right] dp \approx \frac{-1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \frac{R}{P} [\overline{\omega' T'}] dp. \quad (10)$$

p_b 和 p_t 分别是地面气压和研究区顶部气压。[] 和 “—” 分别代表纬向平均和经向平均。“—” 代表对纬向平均的偏差。(10)式右边即为有效位能与扰动动能之间的转换(即斜压转换)。对于非闭合区, (6)式中 $C(P, K_x)$ 中的两个通量项比斜压转换项要小得多, $\frac{\partial \phi \omega}{\partial p}$ 对位能只在

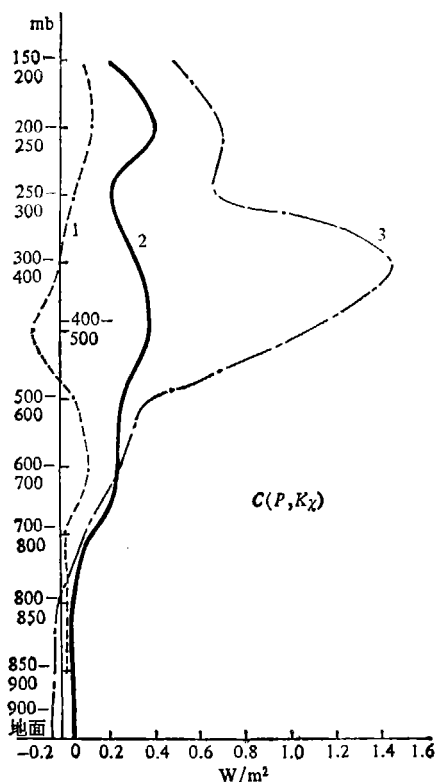


图 4 不同阶段台风区平均的 $C(P, K_x)$ 垂直分布 (单位: $10^{-3}W/m^2$)

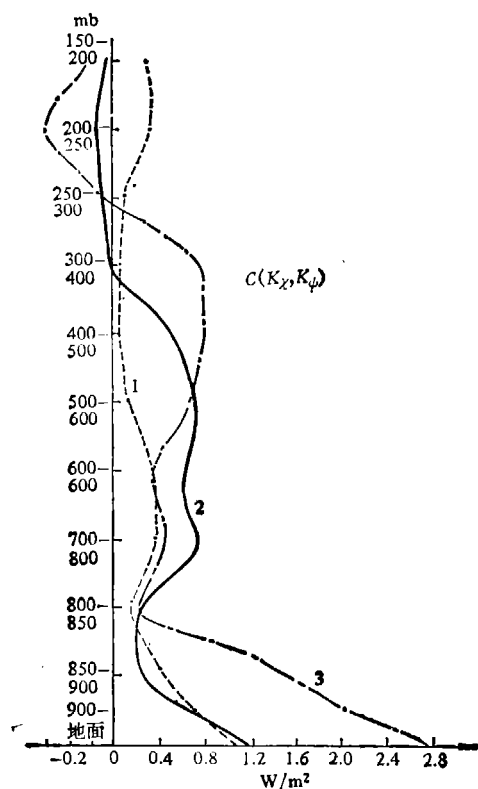


图 5 不同阶段台风区平均的 $C(K_x, K_\phi)$ 垂直分布 (单位: $10^{-3}W/m^2$)

垂直方向上起再分布的作用,也比斜压转换小得多。由图 4 可见,最明显的特征是随着台风的发展,斜压转换迅速增大,在 150mb 以下都出现很大的正转换。 $C(P, K_x)$ 的整层积分在扰动阶段约为 $300 \times 10^{-3}W/m^2$,但到发展阶段迅速增加到 $2256 \times 10^{-3}W/m^2$ 。在成熟阶段,大量有效位能转换为辐散风动能,这时台风内非绝热加热也是最强的。

为了比较起见,我们也给出不同阶段台风区平均的 $C(K_x, K_\phi)$ 的垂直分布 (图 5)。可以看到,从扰动阶段到发展阶段,对流层中上层 (700—300mb) 正的 $C(K_x, K_\phi)$ 转换有明显增加,这使整层的转换率也增加。在成熟阶段,整层的 $C(K_x, K_\phi)$ 增加很显著,这主要由 600—250mb 层和 800mb 以下层 $C(K_x, K_\phi)$ 的急剧增加造成。因而从上面 Q_{P+I} , $C(P, K_x)$ 和 $C(K_x, K_\phi)$ 三者的计算结果可清楚地看到加热场是如何通过两次转换过程,使台风无辐散动能和总动能迅速增加的。但是在扰动阶段, $C(P, K_x)$ 转换并不大,而 $C(K_x, K_\phi)$ 仍有相当的数量,由 (3) 式可推知, B_x 项应起重要作用。另一方面, $C(P, K_x)$ 与 $C(K_x, K_\phi)$ 相比,量值要小,在发展和成熟阶段分别为 $1644 \times 10^{-3}W/m^2$ 和 $4639 \times 10^{-3}W/m^2$ 。这也表明需要有外界的 K_x 动能输入。因而在各阶段都不能把 500km 半径的台风区看作一个闭合系统。通量项 B_{P+I} , B_x 和 B_ϕ 起着重要作用。这表明台风与环境的相互作用在一定程度上会影响台风的发展。但根据上面的分析,由于 Q_{P+I} , $C(P, K_x)$ 和 $C(K_x, K_\phi)$ 都表现出同样的演变趋势,则可以确定,台风的内部能源及能量转换对于台风的演变起着主要的作用。

五、结 论

本文重点研究了台风中辐散风和无辐散风动能之间的转换及其与加热场之间的关系, 结果发现:

(1) 随着台风的发展, 在 300mb 以下辐散风与无辐散风动能之间的转换函数 $C(K_x, K_\phi)$ 明显增加. 在成熟阶段达到最大值. 这时大量的辐散风动能被转换为无辐散风动能. 与此同时, 在对流层上部, 负的 $C(K_x, K_\phi)$ 转换明显增大, 这使无辐散风动能破坏. $C(K_x, K_\phi)$ 的这种演变很好地解释了台风中无辐散风动能和总动能变化的观测事实: 即随着台风的发展, 中低层的无辐散风动能和总动能急剧增加. 从而使整个台风系统表现出无辐散风动能和总动能的显著增加. 在台风的整个生命期, K_x 值很小, 并且变化不太大.

(2) 在 $C(K_x, K_\phi)$ 的四个分量中, 贡献最大的是 C_1 项, 其次是 C_2 项. 这表明 χ 场和 ϕ 场梯度的相对取向对 $C(K_x, K_\phi)$ 值的大小起着决定性作用. C_1 项约占 $C(K_x, K_\phi)$ 的 85—93%. 为了使 ϕ - χ 场相互作用达到最大, χ 和 ϕ 场梯度应逐渐趋于一致. 这主要通过非绝热加热场改变 χ 场来实现的. 这也解释了文献[4]中 $G_x(K)$ 是主要动能制造项的特征.

(3) 台风中非绝热加热场计算表明, 随着台风的发展, 加热场明显增大. 在成熟期最强. 最大加热层在台风中上层. 其中凝结潜热的贡献最大. 非绝热加热的增强使总位能增加和有效位能向辐散风动能的转换(通过 $C(P, K_x)$) 增加. 不同阶段 Q_{P+1} , $C(P, K_x)$ 和 $C(K_x, K_\phi)$ 的垂直分布相同的变化趋势清楚地显示出加热场, 通过两个转换函数对台风强度影响的过程.

(4) 本文只计算了台风中动能的内部转换, 而没有计算复杂的边界通量 (B_{P+1} , B_χ , B_ϕ), 也没有计算摩擦项, 因而无法得到完全的能量循环. 但由于 $C(K_x, K_\phi)$ 的值比 $C(P, K_x)$ 大, 可以推测, 有相当一部分 K_x 动能由外界输入台风区. 因而台风系统从能量角度不能看作是一个闭合系统, 而是与环境有明显的相互作用.

参 考 文 献

- [1] Chen, T. C., Alpert, J. C. and Schlatter, T. W., *Mon. Wea. Rev.*, **106** (1978), 458—468.
- [2] Dimego, G. J. and Bosart, L. F., *ibid.*, **110** (1982), 412—433.
- [3] 谢安、肖文俊、陈受钧, *气象学报*, **38**(1980), 4: 351—359.
- [4] 丁一汇、刘月贞, *中国科学B辑*, 1985, 10: 956—966.
- [5] Chen, T. C. and Wiin-Nielsen, A. C., *Tellus*, **28**(1976), 486—498.
- [6] Krishnamurti, T. N. and Ramanathan, Y., *Jour. of Atmos. Sci.*, **39**(1982), 1296—1306.
- [7] Kuo, H. L., *ibid.*, **22**(1965), 40—63.
- [8] ———— *ibid.*, **31**(1975), 1232—1240.
- [9] Albrecht, B. and Cox, S. K., *ibid.*, **32**(1975), 16—24.