

近海台风结构和能量平衡的对比研究

王作述 何煜光

(中国气象科学研究院)

提 要

本文以 8006 和 8309 两个台风为例,分析了近海台风的结构,指出其重要特点是运动场和热力场的显著不对称和只有弱的暖心。本文还着重对它们在近海及登陆后的总动能和涡动能收支及加热场情况,进行了对比诊断研究。指出近海台风的不对称结构中,隐含着消亡机制,这是由于不对称的暖区和上升区都偏离台风中心且不相一致,使台风区有效位能向动能转换的过程很弱甚至反向。另外,如台风登陆后继续维持热带系统特点,未能迅速将主要能源由潜热释放转变为斜压过程,也易迅速消亡。在加热场方面,登陆后迅速减弱的台风,最大加热强度较大,其所在层次也较高。

一、引 言

关于台风的结构及其能量学,已有很多研究,有关台风的专著,对此都有全面的归纳和总结^{[1][2][3]}。但这些研究分析的多半是远海的、成熟的台风,对于近海台风的结构及其能量学,则研究较少。

事实上,近海台风结构上有其特点。此外,它对人类的威胁较大,它的路径、强度、天气变化,往往成为预报的难点。特别是近海台风登陆后不同的寿命长短、属性变化以及路径演变,会造成极不相同的天气,这些都是很有意义的问题。

本文选择了热带风暴 8006Ida 及台风 8309Ellen(为行文简便,以后一律称台风)。首先分析了它们在近海时的一般结构特点,并针对这两个台风登陆后不同的演变及寿命,对它们登陆后的总动能及涡动能收支,加热场情况,进行了对比诊断研究。

二、近海台风的结构特征

图 1 给出了这两个台风的路径及其演变情况。

1. 不对称的运动场:以前研究指出,8006 台风在近海时有显著的不对称结构^[4],8309 台风也呈现不对称的特点。

本文 1990 年 2 月 21 日收到,1991 年 7 月 25 日收到再改稿。

* 本文由台风基金资助。

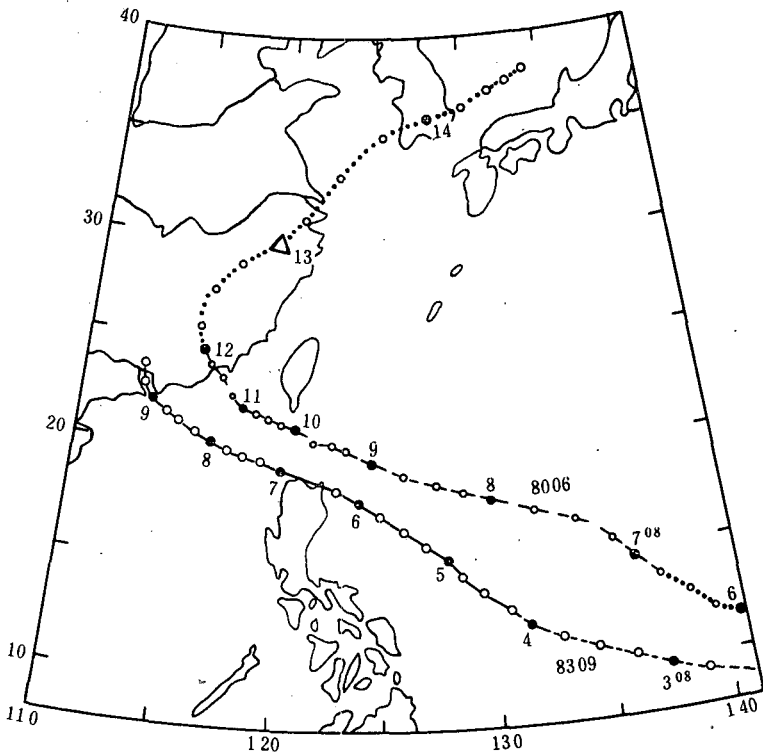


图1 强热带风暴8006(1da,1980年7月)和台风8309(Ellen,1983年9月)路径图
(点线、虚线、实线分别为热带低压、热带风暴、台风阶段的路径,△表示台风已变性为温带气旋)

分析8309台风在近海各时次各层的流场,发现其最大风速区也总是偏于中心的某一侧(图略)。与此对应的各项运动学量也表现出显著的不对称。图2(a,b,c)给出8309台风9月9日08时过台风中心的涡度、散度及铅直运动的南北剖面,这时台风即将登陆。这些量是用1.5经纬距的网格,在地面、850、700、500、400、300、200、100hPa共8个层次上进行计算的,铅直运动由散度算出并用O'Brien方案作了修正。

图2a上台风的正涡度中心,位于台风中心南侧500hPa上空。同8006台风一样,此台风登陆后减弱,原来深厚的正涡度区,也先在高空变为负涡度区,且逐渐向下扩展,而低空的正涡度中心,则强度渐减,位置下移。

强烈的低空辐合、高空辐散结构(图2b)以及相应的强而深厚的上升运动区(图2c)都只存在于台风中心南侧。在台风中心以北的中高层,就主要为下沉运动所控制。其它时刻也都有显著的不对称结构。

将8309台风在近海时运动场的情况,与前已分析过的8006台风^[4]联系起来考察,发现近海台风运动场的具体不对称情况似乎取决于两个因子:一是海陆下垫面摩擦力的差异,另一是台风与它以西、以北副热带高压间强气压梯度的分布。前者使台风的最大风速区偏向台风向海洋的一侧,后者则使它偏向台风中心以西及以北气压梯度大的地区。二者共同作用的结果,使台风的大风区,在近海呈现复杂的分布及变化。

2. 弱而不对称的暖中心:图2d是9月9日08时过台风中心温度距平的东西向剖面。

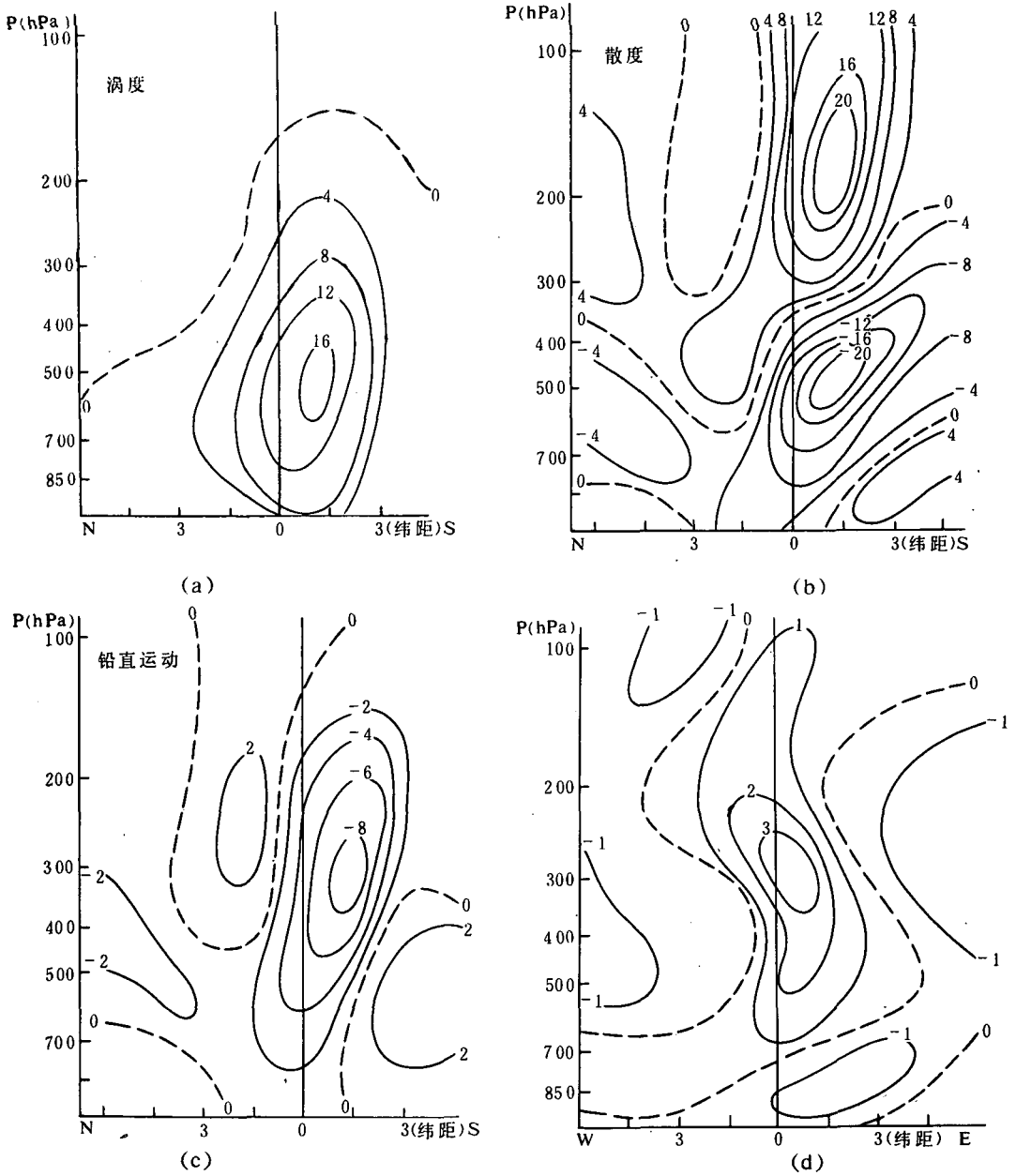


图2 1983年9月9日08时(北京时间)经过8309台风中心的
 (a)相对涡度、(b)散度、(c)铅直运动南北剖面图、(d)温度距平的东西剖面图

可以看到,暖区既不铅直,相对台风中心也不对称。暖中心位于300hPa,距平仅为3°C,虽比8006台风^[4]的暖中心略强,但较之成熟的远海台风暖中心距平可达16°C而言^{[5][6]}就弱得多了。

三、总动能、涡动动能及加热场的计算

对这两个台风,我们用移动坐标系,计算了它们在近海及登陆后间隔为12小时的两

个时次间的总动能收支、涡动动能收支及加热场的情况。

有限区域中准 Lagrangian 坐标系的总动能收支方程为:

$$\frac{\delta \overline{[K]}}{\delta t} = F_H(K) + F_V(K) + G(K) + D(K)$$

式中 $\overline{[K]}$ 是区域平均的单位质量动能, $[\]$ 为纬向平均符号, $-$ 为经向平均符号。 $F_H(K) = -[\nabla \cdot (V-C)K]$ 是移动坐标系中动能的水平通量散度, 即水平输送造成的动能变化, C 是系统的移动速度。 $F_V(K) = -\left[\frac{\partial \omega K}{\partial p}\right]$ 是动能铅直通量散度即铅直输送造成的动能变化。 $G(K) = -[V \cdot \nabla \Phi]$ 是动能制造项。 $D(K)$ 是耗散项, 包括摩擦影响和网格尺度次网格尺度间的能量交换, 作为余项算出。

有限区域中准 Lagrangian 坐标系的涡动动能收支方程为:

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

上式中

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

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

$$F_H(K_E) = -\overline{\left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial (u - C_\lambda) K_E}{\partial \lambda}\right]} - \overline{\left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (v - C_\varphi) K_E \cos \varphi\right]}$$

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

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

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

其中 $K_E = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)$ 是单位质量涡动动能。 $K_Z = \frac{1}{2}(\overline{[u]^2} + \overline{[v]^2})$ 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通过正压过程进行的能量转换。 $I(P_E, K_E)$ 是通过斜压过程进行的有效位能向涡动动能的转换。 $F_H(K_E)$ 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。 C_λ 和 C_φ 分别是低压移动速度 C 的纬向和经向分量。 $F_H(P_E)$ 和 $F_V(P_E)$ 则是涡动有效位能的水平和垂直通量散度。 而 $I(P_E, K_E) + F_H(P_E) + F_V(P_E) = G(K_E)$, $G(K_E)$ 是涡动动能制造项。 热力学能量方程为:

$$\left[\frac{\delta T}{\delta t}\right] + \overline{\left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial (u - C_\lambda) T}{\partial \lambda}\right]} + \overline{\left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial (v - C_\varphi) T \cos \varphi}{\partial \varphi}\right]} + \overline{[\sigma \omega]} = \overline{\left[\frac{H}{c_p}\right]}$$

式中, $\sigma = \frac{T_0}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial p}$, T_0 及 θ_0 是对计算区域平均的温度及位温, 因而只是 p 的函数, H 是单位质量的加热率。

计算仍如前述用 1.5 纬距的网格, 铅直方向分为 8 层。 由于台风登陆后变化较快, 不

宜用相隔 24 小时的中央差,因此,所有 $\frac{\partial}{\partial t}$ 项均由相隔 12 小时的两次观测值相减,而其余各项均用这两次观测值的平均来计算。因此以下计算结果都应看作是相隔 12 小时的两次探空观测间的情况。

四、两个台风登陆前后的动能收支对比分析

本文对 8006 台风 7 月 11 日 20 时至 12 日 08 时和 8309 台风 9 月 9 日 08 时至 20 时两个时期的动能收支情况(表 1)进行对比分析。这两个时期正巧都是它们登陆前 1—2 小时到登陆后约 10 小时的一段时间,但 8006 仅稍有减弱而 8309 却强烈削弱,几小时后就消亡。

1. 总动能收支对比分析

由表 1 可见,8006 台风登陆后低层动能略有增加,以上各层则减少,整层总动能的变化为 -0.66W/m^2 ,而 8309 台风登陆后各层动能都大为减少,整层总和为 -2.95W/m^2 ,约为前者的 4.5 倍。分析其原因:

(1)8006 台风的动能制造 $G(K)$ 很强 (99.63W/m^2),是 8309 该项 (9.84W/m^2) 的 10 倍多,尤其在低层更大。在动能制造项中,重要的物理过程是有效位能向动能的斜压转换项 $-\frac{R}{P}[\omega T]$,进一步分析 8309 的 ω 和 T 分布,发现由于非对称结构,它的上升区和暖区都偏离台风中心且二者分离,以致有效位能向动能的转换较小甚至为负。而 8006 台风虽也不对称,但暖区与上升区较一致,而且冷空气对它的影响较大^[4],由此动能的斜压转换项较大。

(2)8006 台风的动能水平净输出 $F_H(K)$ 极小 (-0.02W/m^2),近于一个封闭系统,而 8309 台风的输出项却达 -0.95W/m^2 。

上述结果是很有意义的,它表明,近海台风的非对称结构中,隐含着使台风迅速消亡的机制,如果冷空气影响弱,非对称结构又使斜压过程的动能转换不够,台风就可能迅速消亡。另一方面,动能输出也是使台风消亡的重要机制,维持难消的台风,更接近于一个动能的封闭系统。

另外还须指出,表中 8006 台风的耗散项 $D(K)$ 比 8309 强得多,其原因涉及各种次网格量的结构,目前还无法分析,只是由于其它项胜过了 $D(K)$ 项的不利影响,8006 台风才得以持续。

2. 涡动动能收支对比分析

这两个台风登陆前后涡动动能收支也有明显的不同。8309 台风涡动动能的减小率为 $-5.45(10^{-1}\text{W/m}^2)$,下同),比 8006 台风的减小率 (-2.02) 大,且各层都是减小的。由表 1 分析其原因可见:

(1)两台风共同的涡动动能汇是 $F_H(K_E)$ 和 $I(K_z, K_E)$,即除了通过净输出损失涡动动能外,还有涡动动能通过正压过程向纬向平均运动动能 K_z 的转换,而 8309 台风的这两种汇都强得多。

表 1 两个台风登陆前后总动能及涡动能收支

		8006 台风 (Ida, 7 月 11 日 20 时 - 12 日 08 时)												
层次 (hPa)	总动能收支 (W/m ²)						涡动能收支 (10 ⁻¹ W/m ²)							
	$\delta K/\delta t$	$F_H(K)$	$F_V(K)$	$G(K)$	$D(K)$	$\delta K_B/\delta t$	$F_H(K_B)$	$F_V(K_B)$	$G(K_B)$	$I(P_B, K_B)$	$F_H(P_B)$	$F_V(P_B)$	$I(K_2, K_B)$	$D(K_B)$
100-200	-0.18	-0.40	0.35	21.67	-21.80	-0.31	-0.78	1.29	-2.27	-0.62	0.66	-2.31	-0.76	2.21
200-300	-0.25	-0.06	0.19	-1.02	0.64	0.37	-0.47	0.92	-0.46	-0.46	0.72	-0.72	-0.78	1.16
300-400	-0.09	0.03	0.22	-15.20	14.86	0.20	-2.53	2.29	4.16	-0.26	7.18	-2.76	-2.14	-1.58
400-500	-0.03	0.07	0.29	-25.05	24.66	-0.86	-4.43	1.73	8.94	1.05	3.52	4.37	-1.83	-5.27
500-700	-0.14	0.17	0.24	42.21	-42.76	-1.02	-7.62	0.95	16.08	3.02	-4.33	17.39	-0.36	-10.07
700-850	0.01	0.12	-0.40	51.74	-51.45	-0.16	-2.62	-2.28	0.61	1.31	-3.14	2.44	1.72	2.41
850-1000	0.02	0.05	-0.88	25.28	-24.43	-0.24	-0.25	-4.90	1.19	20.26	-3.15	-15.92	0.61	3.11
总和	-0.66	-0.02	0.01	99.63	-100.28	-2.02	-18.70	0.00	28.25	24.30	1.46	2.49	-3.54	-8.03

		8309 台风 (Ellen, 9 月 9 日 08 时 - 20 时)												
层次 (hPa)	总动能收支 (W/m ²)						涡动能收支 (10 ⁻¹ W/m ²)							
	$\delta K/\delta t$	$F_H(K)$	$F_V(K)$	$G(K)$	$D(K)$	$\delta K_B/\delta t$	$F_H(K_B)$	$F_V(K_B)$	$G(K_B)$	$I(P_B, K_B)$	$F_H(P_B)$	$F_V(P_B)$	$I(K_2, K_B)$	$D(K_B)$
100-200	-0.38	-0.16	-0.08	-2.06	1.92	-0.46	-3.68	1.27	-5.99	0.89	-3.21	-3.67	-0.83	8.77
200-300	-0.46	-0.10	0.03	-0.57	0.18	-0.42	-1.08	1.59	-14.33	1.21	-8.60	-6.94	0.92	9.48
300-400	-0.61	0.07	-0.08	2.91	-3.51	-0.75	3.41	-0.62	2.22	1.26	-2.02	2.98	1.87	-7.63
400-500	-0.43	0.11	-0.20	6.88	-7.22	-0.48	1.84	-2.57	1.55	-3.05	-1.92	6.52	-0.45	-0.85
500-700	-0.46	-0.32	-0.20	2.75	-2.69	-0.99	-15.47	-1.18	1.14	-5.51	3.74	2.91	-3.94	18.46
700-850	-0.40	-0.48	0.32	2.80	-3.04	-0.54	-11.72	-0.22	-2.79	-3.44	2.20	-1.55	-2.57	16.76
850-1000	-0.21	-0.07	0.21	-3.17	2.82	-1.81	-1.71	1.73	-0.82	-1.04	0.64	-0.42	-0.52	-0.49
总和	-2.95	-0.95	0.00	9.54	-11.54	-5.45	-28.41	0.00	-19.02	-9.68	-9.17	-0.17	-5.52	44.50

(2) 两台风的涡动动能制造项 $G(K_E)$ 符号相反, 8006 的 $G(K_E)$ 及它的各分项, 其中特别值得提出的是涡动有效位能向涡动动能的转换项 $I(P_E, K_E)$ 都使涡动动能增加, 而 8309 的这些项都为负, 使涡动动能减小。

另外需指出的是 8006 涡动动能耗散项 $D(K_E)$ 为负, 表明涡动动能因各种耗散作用而减小, 但 8309 这一项却为正(但它未能胜过各种能汇的影响)。这一情况颇值得注意, 因为它可能是由于 8309 较强, 积云对流活动较旺盛, 因而大量次网格尺度动能向网格尺度动能转换的结果。

五、两个台风登陆前后的加热场

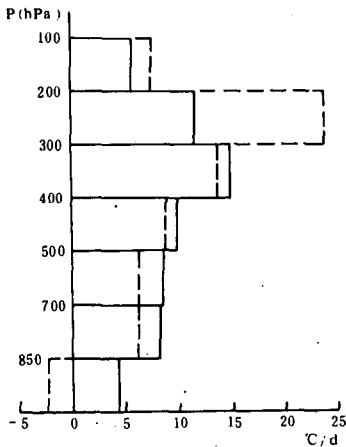


图3 8006台风(实线)和8309台风(虚线)登陆前后加热率铅直分布(单位: $^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

图3是两个台风登陆前后(1980年7月11日20时—12日08时和1983年9月9日08时—9日20时)加热场的铅直分布。可以看到:(1)8309号台风最大加热强度远大于8006号台风, 其所在层次也较高。这可能是由于它登陆后很快减弱, 辐合上升剧烈, 对流降水和潜热释放很强造成的。(2)8006号台风低空加热较强, 这与其低空冷平流较强, 斜压过程活跃有关。这与动能收支的结果也是一致的。而8309号台风不仅在低空加热弱, 在最低层甚至出现负值, 这与它登陆后仍维持热带系统的特点及暖平流较强有关。

六、结 语

1. 本文指出近海台风结构的主要特点是它的运动场与热力场内显著的不对称结构和弱的暖心。并特别强调了这种不对称结构中隐含着的台风消亡机制。

2. 登陆后迅速消亡的台风, 其主要机制有两方面, 一是其运动场与热力场的不对称性, 二是台风的主要能源未能迅速由潜热释放转变为冷空气下沉、暖空气上升的斜压过程。

3. 登陆后维持难消的台风, 其动能净输出甚小, 更似近于一个动能的封闭系统, 而登陆后迅速减弱的台风, 动能净输出较大。这一差别也是值得注意的。

4. 就涡动动能收支而言, 登陆后迅速减弱的台风, 其涡动动能的净输出和向纬向平均运动动能的转换都较强, 而涡动动能的制造则很弱甚至为负。

以上结果还说明了, 无论就总动能还是就涡动动能而言, 台风强度变化的源汇主要都在内部。外部的源、汇(与环境的相互作用)其作用一般都是次要的。

参 考 文 献

- [1] 陈联寿、丁一汇,西太平洋台风概论,第二章,第五章,科学出版社,1979年。
- [2] Anthes, R. A., The dynamics and energetics of mature tropical cyclones, *Rev. Geophys. and Space Phys.*, **12**, 495—522, 1974.
- [3] Elsberry, R. L., et al., A global view of tropical cyclones, International Workshop on Tropical Cyclones, Bangkok, Thailand, Nov. 25—Dec. 5, 1985.
- [4] 王作述、赵平,一个南海台风登陆后的结构变化和涡度平衡,台风会议文集(1985), 177—188, 气象出版社, 1987年。
- [5] Hawkins, H. F., and D. T. Rubsam, Hurricane Hilda, 1964: I, The structure and budgets of the hurricane on October 1, 1964, *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 617—636, 1968.
- [6] Hawkins, H. F., and S. M. Imbembo, The structure of a small, intense hurricane Inez, 1966, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 418—442, 1976.

THE STUDY ON STRUCTURE OF THE OFFSHORE TROPICAL STORMS AND THE COMPARATIVE DIAGNOSES OF ENERGY BUDGET

Wang Zuoshu He Yuguang

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, SMA*)

Abstract

In this paper, a study on the structure of the offshore tropical storms is made based on the data of the severe tropical storm Ida (8006) and the typhoon Ellen (8309). It is found that the remarkable features of the offshore tropical storms are the obvious asymmetry in the air—flow field and the weak warm center.

A comparative diagnostic research on kinetic energy budget and heating field of such a pair of tropical storms is carried out. It is emphatically pointed out that the decay mechanism of an offshore tropical storm is implicated in the asymmetric structure. This is because the warm area and the ascending motion area are biased from the center and not coincided with each other. The baroclinic transformation process from available potential energy to kinetic energy is very weak and even negative. The another decay mechanism is that the tropical storm maintains the characteristics of a tropical system for a long time after landing and then has not rapidly changed the main energy source from latent heat release into the baroclinic process. For the tropical storms which decay soon after landing, the maximum heating is stronger and its altitude is higher.