

一个内陆台风的湿有效能量分析*

刘延英*

(中国气象科学研究院,北京 100081)

钱玉英 翟盘茂

(国家气象中心,北京 100081)

提 要

该文利用新给出的公式计算了1981年第8号台风各个时段的湿有效能量(MAE)及其三个分量. 结果发现:台风系统是一个高能体,温带气旋阶段系统的MAE比热带台风阶段的MAE大. MAE的变化主要是由于它的正压分量和斜压分量变化引起;在系统降水的不同阶段表现出不同的能量特征. 台风暴雨的形成主要靠消耗MAE的斜压分量和对流层下层的层结分量能量.

关键词:内陆台风;湿有效能量;暴雨.

1 引 言

有效位能概念是在本世纪初 Margules 在研究风暴时建立起来的,到60年代得到较广泛的应用^[1~4]. 70年代末, Lorenz 把大气中水汽潜热看成内能的一种形式,提出湿有效能量(MAE)概念^[5]. 其后,吴宝俊将湿有效能量作为一个参数应用到暴雨的分析和预报中^[6,7].

台风系统是相对独立性比较大的天气系统. 作为一种近似,它可以看成是一个大热机. 在这个热机中,有效能量向动能的转换补偿了由于表面摩擦和自由大气内部的混合所引起的动能损失,维持了台风强度. 系统内的有效能量是台风的动能源^[8]. 因此,研究台风系统的能量转换,首先必需计算分析台风系统的有效能量. 然而到目前为止,在我国,把台风作为一个整体计算出它的MAE的研究工作尚不多见.

2 8108号台风概况

1993年-04-28收到,1994-04-04收到再改稿.

* 中国气象科学研究院张若军、沈文海同志参加了部分工作.

1981年第8号(本文简称8108号)台风于7月21日08时(北京时,下同)生成,25日08时变为温带气旋,28日08时之后消失(图1)。台风整个生命期为7天,行程两千多公里,从生成区的热带到消失地的温带,横扫我国东部大陆。影响我国时间之长,地域之广都是历史所罕见。

8108号台风中心强度变化不大,最强和最弱时的中心气压仅仅相差6hPa,中心气压24小时变量大多在2hPa以下,中心附近最大风速一般维持在15m/s。台风系统每个时刻所占据的水平面积变化也很小,基本上是一个半径为500km的圆面(图略)。但是,台风系统的平均动能变化很大,且随时间而减小。因此,从总体上看8108号台风是一个随时间减弱的台风(见附表)。

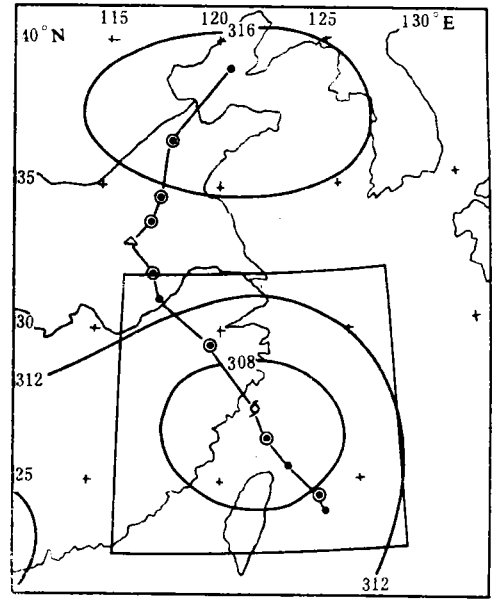


图1 8108号台风23日08时700hPa形势及路径(图中小框为计算区域)

附表 8108号台风20时主要参数

日期 (日)	中心位置 (°E, °N)		中心气压 (hPa)	最大风速 (m·s ⁻¹)	KE (10 ² J·hPa ⁻¹ ·m ⁻²)	MAE (10 ² J·hPa ⁻¹ ·m ⁻²)
21	123.6	24.6	1000	15	4.8	1.49
22	121.7	26.4	994	25	5.0	1.88
23	119.4	29.5	998	15	4.4	2.05
24	117.1	32.0	998	15	3.1	3.05
25	117.1	33.8	998	15	2.3	3.35
26	117.4	34.7	1000	15	1.6	4.05
27	117.9	36.7	998	15	2.0	3.58

3 MAE表达式及其计算方法

计算MAE有多种方法。最初Lorenz用图解法^[5],接着他又提出数值解法^[9]。80年代初吴宝俊给出了MAE的近似表达式^[10],其后他和章国材又给出了MAE的三个分量的近似表达式^[11]。我们在假相当位温(θ_e)守恒的条件下,用类似于文献[10,11]的推导方法得到有限区域MAE及其三个分量的表达式如下:

$$MAE_\sigma = \frac{c_p}{g} \iint \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left[1 - \left(\frac{p_r}{p} \right)^k \right] T_{\sigma} dp d\sigma \quad (1)$$

$$AS_\sigma = \frac{c_p}{g} \iint \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left[1 - \left(\frac{p_{r1}}{p} \right)^k \right] T_{\sigma} dp d\sigma \quad (2)$$

$$AB_\sigma = \frac{c_p}{g} \iint \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left[\left(\frac{p_{r1}}{P} \right)^k - \left(\frac{p_{r\sigma}}{p} \right)^k \right] T_{\sigma} dp d\sigma \quad (3)$$

$$AT_\sigma = \frac{c_p}{g} \iint \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left[\left(\frac{p_{r\sigma}}{p} \right)^k - \left(\frac{p_r}{p} \right)^k \right] T_{\sigma} dp d\sigma \quad (4)$$

上面诸式中的 MAE_{σ} 为有限区域(σ)的 MAE , AS_{σ} 、 AB_{σ} 、 AT_{σ} 分别是有限区域 MAE 的层结分量、斜压分量和正压分量, $MAE_{\sigma} = AS_{\sigma} + AB_{\sigma} + AT_{\sigma}$. p_{r1} 为第一次调整后的气压. p_{r0} 称有限区域参考气压. p_r 为湿总能量达最小值时的气压, 简称参考气压. T_{se} 为假相当温度. 其它为常用符号.

计算 MAE 有许多方法的主要原因是由于每个方法选出的参考场不同, 或者说计算参考气压的方法不同. 其结果使算得的 MAE 数值就有很大差别, 例如 Lorenz 用他给出的两种方法算同一气块的 MAE , 其数值相差 8%. 本文计算参考气压有两个主要优点:

① 计算 p_{r1} 时, 是在质量守恒和 θ_{se} 守恒的条件下作垂直调整. 因为 θ_{se} 在干、湿绝热过程中都是保守的. 在这个条件下进行调整的过程最接近实际大气可能发生的过程. ② p_r 的计算是在比系统所在区域大得多的球面 ($110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$) 上进行. 这样得到的 p_r 值符合有效能量的本来意义. 下节会看到, 我们计算的 MAE 与 Lorenz 所得数值量级相同. 因为 P_{r1} 、 P_{r0} 和 P_r 的计算繁琐, 其计算方法详细说明从略.

根据以上给出的公式和选取参考场方法, 应用欧洲中期天气预报中心每日的客观分析资料, 我们计算了 8108 号台风从生成到消失每天的 MAE . 考虑到该台风系统特点, 计算式(1)~(4)的积分区域 σ 以台风中心为中心, 面积约为 $7.8 \times 10^6 \text{km}^2$ (图 1 中小框所示). 上下界面 (p_1, p_2) 分别取为 100hPa 和 1000hPa.

4 台风系统的 MAE

8108 号台风系统的 MAE 及其分量的数值由图 2 给出. 从图可见, 台风在生成时就具有湿有效能量 ($1.49 \times 10^3 \text{J/hPa} \cdot \text{m}^2$), 而且温带气旋阶段的 MAE 一直比在台风阶段的大. 7 月 26 日 MAE 达到的最大值 ($4.05 \times 10^3 \text{J/hPa} \cdot \text{m}^2$), 接近 Lorenz 算得的数值 ($4.40 \times 10^3 \text{J/hPa} \cdot \text{m}^2$). 台风转变成温带气旋后, 系统的 MAE 是系统动能 (KE) 的 20 倍左右. 但在台风阶段 MAE 还不到 KE 的 10 倍, 一般只有 4~5 倍. 台风阶段的 KE 在 ($MAE+KE$) 中占的比例比温带气旋阶段的大, 说明在台风中 MAE 较容易转变成 KE .

在大气能量学中, 因为孤立系统中湿总能量与动能之和是常数, 即湿有效能量与动能之和是常数, 所以在考察一个系统的能量时也看它的湿有效能量与动能之和的数值. 从附表中不难看出, 8108 号台风系统在气旋阶段 ($MAE+KE$) 的数值也远大于台风阶段的数值. 显然台风系统不是一个孤立系统. 它与环境之间总在相互作用进行能量交换. 8108 号台风变成温带气旋前后, MAE (严格

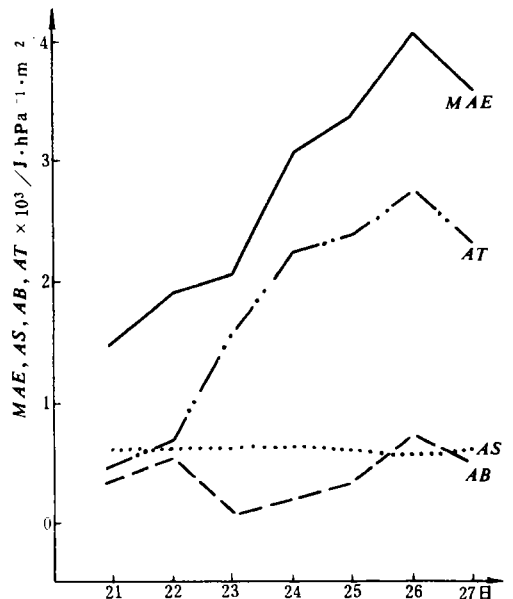


图 2 8108 号台风系统 MAE 及其分量变化曲线 (单位: $10^3 \text{J/hPa} \cdot \text{m}^2$, 下同)

说应是 $MAE+KE$ 数值迅猛增加,说明在这个阶段有大量的 MAE 从环境场输入到系统中. 这与谢安等人从 1976 年第 13 号台风分析出的结果^[12]相似.

从图 2 还可看到,台风系统的正压分量(AT)与 MAE 变化趋势相同,斜压分量(AB)的变化,除了 23 日的变化不同外,其变化趋势也与 MAE 一致. MAE 的各分量在台风不同阶段所占的比例也不相同:初期阶段,台风位于热带洋面,三分量各占 1/3;台风登陆后, AT 猛增至占 2/3 后维持到台风消失. AB 陡降到 1/20 后渐渐提高,但到台风消失时远未达到在初期时所占比例数. 总之,从图 2 不难看出,台风系统内的 MAE 的改变是由 AT 和 AB 引起的. 相比之下 AT 对 MAE 的改变起着更重要的作用. 说明在 8108 号台风转变成温带气旋前后, MAE 的迅猛增加主要是通过台风系统与环境相互作用增加 AT 来实现的.

湿有效能量在台风系统里的垂直分布情况是: MAE 、 AS 集中在对流层下层, AB 和 AT 的高值位于对流层中层(图 3). 从 24 小时变量图(图略)看, AB 、 AT 变化最大的是在对流层中层, MAE 和 AS 在对流层中下层变化最显著,而且中层的 MAE 和 AS 的变化比下层变化提前一到两天.

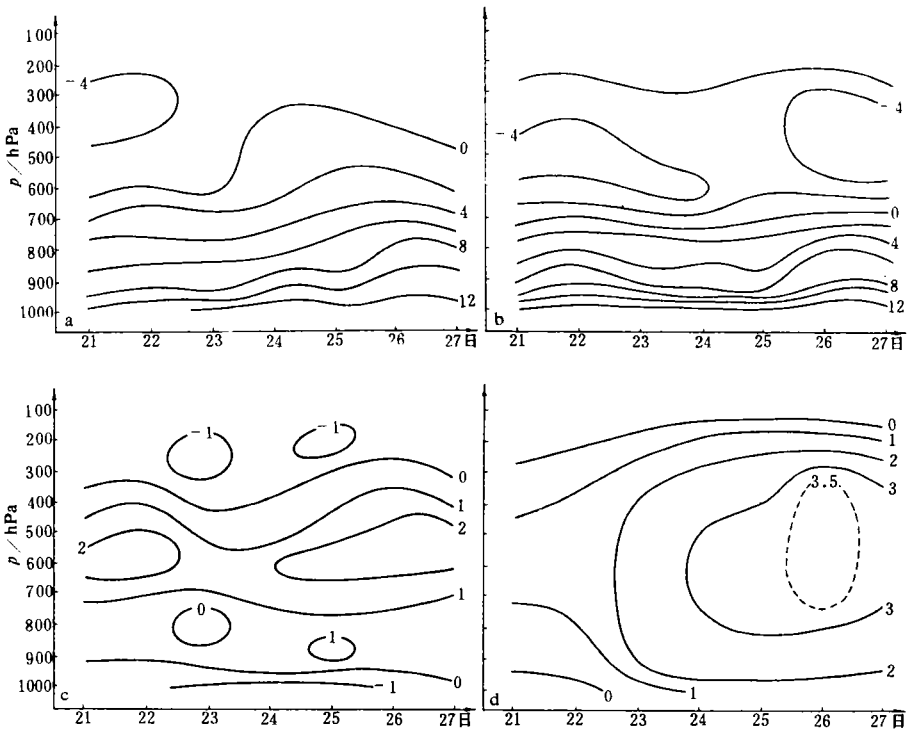


图 3 8108 号台风系统 MAE 的垂直分布 (a) MAE , (b) AS , (c) AB , (d) AT

5 MAE 变化与台风降水

图 4a 是 8108 号台风区域内日最大降水量,图 4b 是区域内日降水量最大的 10 个站

的平均值. 两图都表示出 8108 号台风的降水有两个峰值, 一个在 7 月 23 日, 另一个在 7 月 27 日. 最强的日降水量约为最小值的三倍. 将 8108 号台风降水这个特点与图 2 进行对比可以看到, 斜压分量的两个峰值分别出现在两个强降水的前一天. 若将对流层分成上下

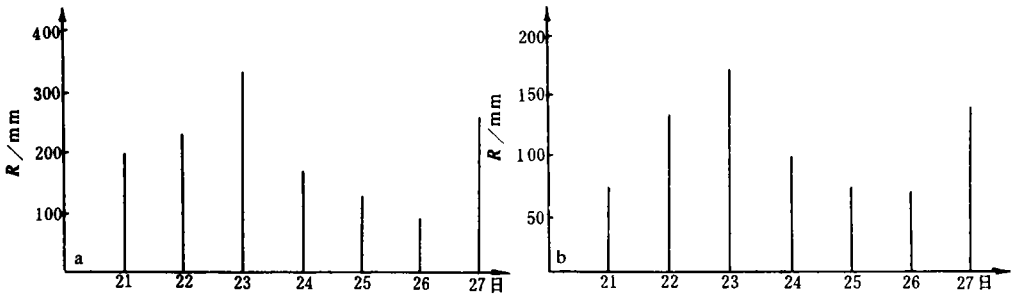


图 4 8108 号台风日降水量 R (单位 mm)的变化(说明见正文)

两部分(100~550hPa; 550~1000hPa)分别计算 AS , 它们的数值不再是准常量(见图 5). 对流层上层 AS 的两个极小值分别对应着对流层下层的两个极大值. 它们都出现在降水峰值的前一天. AB 与 AS 对台风降水峰值的这种反映与台风是否转变成温带气旋无关. 即台风雨降水峰值与台风系统中的 AB 和对流层下半部分 AS 的减少相对应.

8108 号台风降水的两个峰值处在台风的两个不同阶段, 具有不同的地理位置. 在低纬台风阶段, 降水最强时, 台风系统内对流层下半部 MAE 减少, 但上半部 MAE 增加的更多, 总效果 MAE 是增加. $AB(AT)$ 在上下部都减少(增加); 在中纬度气旋阶段, 降水最强时, MAE, AT 在对流层上下部都减少, AB 上部减少下部增加(见图 5). 此为 8108 号台风不同阶段降水在湿有效能量上的不同表现.

有关非台风暴雨研究表明^[13~14], 暴雨降水时, 天气系统通过湿有效能量收支方程中的转换项释放 MAE . 尽管有另外一些项为暴雨区供给 MAE , 但在降水的中后期暴雨区

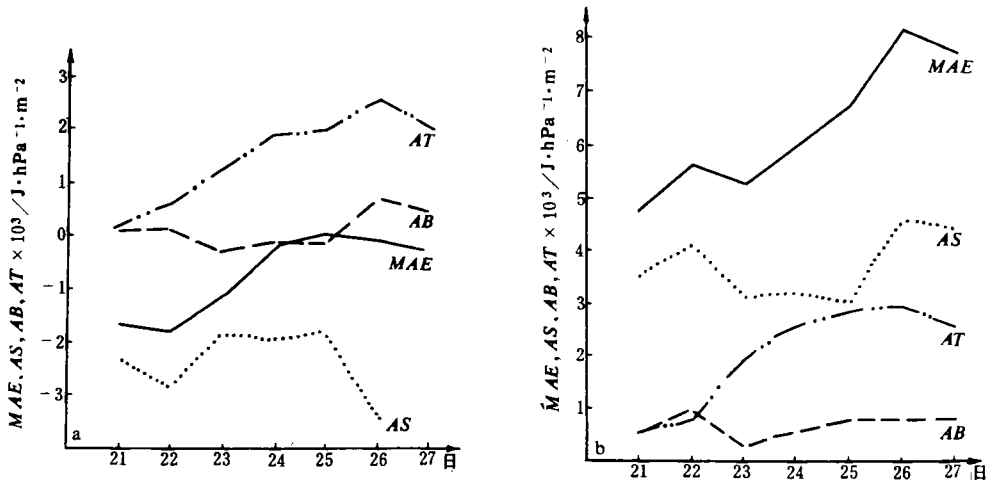


图 5 台风系统内对流层上(a)、下(b)部 MAE 及分量演变曲线(说明同图 2)

的 MAE 还是明显减少. 8108 号台风 25 日已转变成温带气旋, 27 日的降水造成 MAE 的减少现象与上述研究结果一致. 从图 2 可见暴雨区 MAE 的减少是通过 AB 和 AT 来完成的. 然而在台风阶段的强降水(23 日)并未使 MAE 减少, 减少的只是 AB 和对流层下层的 AS . 因此可以说, 台风暴雨主要消耗 MAE 的斜压分量和对流层下层的层结分量能量.

以往的研究指出, 暴雨来临之前暴雨区对流层中层湿有效能量为正值, 从而形成深厚的正值能量层^[4]. 本例研究的是系统的整体平均情况, 以往的研究未涉及到. 从图 3a 可见, 在低纬地区强降水之前对流层中层仍有负值能量. 然而当台风北上转变成温带气旋时, 降水峰值的前三天出现了“深厚正值能量层”, 比一般暴雨区类似情况的出现要早两天. 当对流层中层的 MAE 和 AS 由增加转成减少、对流层下层的 MAE 和 AS 增加时的第二天出现了 27 日的降水峰值. 27 日的降水具有明显的突然增幅性质. MAE 和 AS 的这一变化特点是这次暴雨突然增幅的重要先兆之一.

6 讨论与小结

(1) 本文给出的计算湿有效能量公式是在 θ_w 守恒的条件下得到的. 因为 θ_w 在干湿绝热过程中都保守, 计算湿有效能量的过程最接近实际大气可能发生的过程, 故新公式是湿有效能量表达式.

(2) 通过对 8108 号台风 MAE 的计算, 不但得到了整个系统的 MAE 数值, 而且还发现, 即使由台风北上减弱变成的温带气旋, 也可以比它在热带为台风时的 MAE 大; 台风系统 MAE 的三个分量所占比例不是一成不变的. 系统的 MAE 的变化主要是由它的正压分量和斜压分量变化引起的.

(3) 暴雨过程是湿有效能量积聚和释放过程, 台风暴雨过程积聚的主要是 MAE 的正压分量和斜压分量能量; 降水时释放的主要是斜压分量和对流层下层的层结分量能量; 当台风变成气旋后, 降水时还释放正压分量能量.

(4) 8108 号台风暴雨突然增幅在 MAE 及其三个分量方面有明显的先兆性, 为今后分析预报这类暴雨提供了新途径.

参 考 文 献

- 1 Lorenz E N. Available potential energy and maintenance of general circulation. *Tellus*, 1955, **7**:157~167.
- 2 Dutton J A and Johnson D R. The theory of available potential energy and a variational approach to atmospheric energetics. *Advance in Geophysics*, 1967, **12**:333~436.
- 3 Van Mieghem J. The energy available in atmosphere for conversion into kinetic energy. *Beitrphys. Fr. Atmos.*, 1956, **29**:129~142.
- 4 Smith P J. On the contribution of a limited region to the global energy budget. *Tellus*, 1969, **21**:202~207.
- 5 Lorenz E N. Available energy and the maintenance of a moist circulation. *Tellus*, 1978, **30**:15~31.
- 6 吴宝俊. 湿有效位能及其在暴雨分析和预报中的应用. *气象*, 1982, **8**(11):4~7.
- 7 吴宝俊. 湿有效能量概念和方法简介. 湿有效能量应用文集. 南宁: 广西人民出版社, 1985. 1~15.
- 8 Anthes R A. The dynamics and energetics of mature tropical cyclones, *Rev. Geophys. Space Phy.*, 1974, **12**:495~522.

- 9 Lorenz E N. Numerical evaluation of moist available energy. *Tellus*, 1979, **31**:230~235.
- 10 吴宝俊. 湿比有效位能的近似表达式. 自然杂志, 1983, 315.
- 11 章国材, 吴宝俊. 有限区域湿有效能量的层结、斜压、正压分量及其收支方程. 大气科学, 1985, **9**(5):406~412.
- 12 谢安, 肖文俊, 陈受钧. 登陆台风的能量学分析. 气象学报, 1982, **40**(3):289~299.
- 13 刘延英, 孙建. 一次暴雨过程的湿有效能量收支分析. 湿有效能量应用文集. 南宁:广西人民出版社, 1985. 16~23.
- 14 刘延英, 吴宝俊. 陕南暴雨湿有效位能分析. 1981年我国异常天气分析预报技术文集. 北京:国家气象中心, 1983. 72~77.

AN ANALYSIS OF MOIST AVAILABLE ENERGY ABOUT AN INLAND TYPHOON

Liu Yanying

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Qian Yuying Zhai Panmao

(*National Meteorological Centre, Beijing 100081*)

Abstract

Using new formulae of moist available energy (*MAE*), the typhoon T8108 was studied and its three components of *MAE* during the various periods were calculated. The results show that the system of typhoon has a high energy, its *MAE* in the stage of the extratropical cyclone is more than that in the stage of the tropical typhoon. The changes of *MAE* is mainly due to the variance of barotropic and baroclinic components. And different energy characteristics appear in different periods of typhoon rain. The expenditure of energy for the typhoon rain is mainly from the baroclinic component, and stratification component in the lower troposphere.

Key words: Inland typhoon; Moist available energy; Heavy rain.