

江淮气旋的能量变化*

杨信杰

(空军气象学院)

关于气旋中的能量变化,已经有了不少的论述^[1-5]。江淮气旋是产生我国南方地区暴雨的主要天气系统之一。弄清楚其中的能量变化,对于了解它的结构及其发生发展的机制,都是非常必要的。本文取一江淮气旋为例,主要讨论扰动有效位能和扰动动能的变化,也涉及到有效位能和动能的变化。1982年5月12日08时,在武汉东北约200 km处,有一个气旋生成。这个气旋,是冷锋进入倒槽,并有暖锋锋生而形成的。生成时,气旋中心上空300 hPa的风只约12 m/s,500 hPa在107°E有一弱槽,东南沿海为副高控制。

1. 资料和方法

本文讨论的区域包括我国40°N以南的大部分地区,相当于江淮气旋的背景区。资料来源于“中国高空气象记录月报”。先删除了明显的错误记录,然后用Barnes方法^[6]在格距为150 km的13×13的网格上作客观分析,其响应函数在波长为600 km和300 km时分别为0.88和0.38。垂直方向取八层:1000,850,700,500,400,300,200,100 hPa。

计算所用的公式主要如下:

扰动有效位能

$$AE = \frac{c_p}{g} \int_{P_u}^{P_0} [\overline{N'T'}] dp$$

式中 $[\]$ 表示纬向平均, $'$ 表示对纬向平均的偏差,一为经向平均, P_0 取1000 hPa, P_u 取100 hPa,

$$N' = \frac{[P_r^*] - P_r^*}{p^*}, \text{ 其中 } \kappa = \frac{R}{c_p}, p_r(\theta, t) = \frac{1}{\sigma} \int_{\sigma} P(x, y, \theta, t) d\sigma, \sigma \text{ 为讨论区域的面积。}$$

扰动有效位能的局地变化

$$\begin{aligned} \frac{\partial AE}{\partial t} = & \underbrace{\frac{1}{g} \int_{P_u}^{P_0} [\overline{N'Q'}] dp}_{GAE} + \underbrace{\frac{1}{g} \int_{P_u}^{P_0} [\overline{\omega'\alpha'}] dp}_{WAE} \\ & - \underbrace{\frac{c_p}{g} \int_{P_u}^{P_0} [\overline{\nabla \cdot N'T'V}] dp}_{HFAE} - \underbrace{\frac{c_p}{g} \int_{P_u}^{P_0} \frac{\partial}{\partial p} [\overline{N'T'\omega}] dp}_{VFAE} \\ & - \underbrace{\frac{c_p}{g} \int_{P_u}^{P_0} \left\{ [\overline{T'V'}] \cdot \nabla [\overline{N}] + [\overline{N'V'}] \cdot \nabla [\overline{T}] + \frac{[\overline{N}]}{c_p} [\overline{\omega'\alpha'}] \right.}_{CAE} \\ & \quad \left. - \frac{[\overline{\alpha}]}{c_p} [\overline{\omega'N'}] + [\overline{T'\omega'}] \frac{\partial [\overline{N}]}{\partial p} + [\overline{N'\omega'}] \frac{\partial [\overline{T}]}{\partial p} \right\} dp} \\ & + \underbrace{\frac{c_p}{g} \int_{P_u}^{P_0} \left[\overline{\frac{T'}{P^*} \left(\frac{dp^*}{dt} \right)'} \right] dp}_{DPDTE} \end{aligned} \quad (1)$$

* 本文于1986年12月10日收到,1987年6月2日收到最后修改稿。

式中 $[N] = \frac{P^* - [P_r]^*}{P^*}$ 。GAE 为扰动有效位能的产生项, WAE 为扰动有效位能的释放项, HFAE、VFAE 分别为扰动有效位能的水平通量散度和垂直通量散度项, CAE 为平均有效位能与扰动有效位能的转换项, DPDTE 为参考气压 P_r 的变化引起的扰动有效位能的变化。

扰动动能 KE 的局地变化

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{g\sigma} \int_{\sigma} \int_{P_u}^{P_0} \frac{\partial KE}{\partial t} dp d\sigma = - \frac{1}{g} \int_{P_u}^{P_0} \overline{[\mathbf{V}' \cdot \nabla \phi']} dp \\
 & \hspace{15em} \text{GKE} \\
 & - \frac{1}{g} \int_{P_u}^{P_0} \overline{[\nabla \cdot \mathbf{K} \mathbf{E} \mathbf{V}]} dp - \frac{1}{g} \int_{P_u}^{P_0} \overline{\left[\frac{\partial}{\partial P} \omega \mathbf{K} \mathbf{E} \right]} dp \\
 & \hspace{15em} \text{HFKE} \hspace{10em} \text{VFKE} \\
 & - \frac{1}{g} \int_{P_u}^{P_0} \left\{ \overline{[\mathbf{V}' \cdot (\mathbf{V}' \cdot \nabla) [\mathbf{V}]]} + \overline{\left[\mathbf{V}' \cdot \omega' \frac{\partial [\mathbf{V}]}{\partial p} \right]} \right\} dp \\
 & \hspace{15em} \text{CKE} \\
 & + \frac{1}{g} \int_{P_u}^{P_0} \overline{[\mathbf{V}' \cdot \mathbf{F}']} dp \\
 & \hspace{15em} \text{DE}
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中 ϕ 为位势, $\mathbf{F}$ 为摩擦力。GKE 为扰动动能产生项, HFKE 和 VFKE 分别为扰动动能的水平通量散度和垂直通量散度, CKE 为平均动能与扰动动能的转换项, DE 为摩擦消耗项。

式(1)和式(2)中均略去了因气柱质量变化引起的能量变化项, 因它们分别比其它项约小两个量级。式(1)中的 DPDTE 和式(2)中的 DE 项不能直接计算, 取为其它项的残差。这样, DE 不仅包括摩擦消耗, 而且包含了网格尺度与次网格尺度之间的动能传输。

2. 结 果 分 析

1) 非绝热效应

计算了长波辐射、稳定性和对流性潜热释放。方法如下:

长波辐射用 Danard 1969 年的方案计算^[7]。分 1000—800, 800—600, 600—400, 400—200 hPa 四个层次考虑了云的影响。各层是否有云, 由其中的相对湿度来定。如相对湿度超过下列临界值

气压	900	700	500	300
相对湿度	0.84	0.75	0.70	0.69

则认为该层有云, 其厚度为 200 hPa。

稳定性潜热释放:

$$Q_s = -L\omega \frac{\partial q_s}{\partial p}$$

计算时必须同时满足: a) $\omega < 0$, b) $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} > 0$, c) 相对湿度大于 75%。

对流性潜热是根据郭晓岚 1974 年的修正方案计算的^[8]。

这些非绝热变化的分布, 以 12 日 08 时为例来说明。长波辐射高低层不尽相同, 取 700 hPa (图 1 a) 和 300 hPa (图 1 b) 两层为代表。可见, 长波辐射的纬向差异主要在区域的北部。在冷锋后有较厚的云层。下层因受云层阻挡, 长波辐射小, 上层因云顶, 长波辐射大。稳定性潜热以中层为最大, 取 700 hPa (图 1 c) 为代表。它主要出现在冷锋锋后。对流性潜热以高层为最大, 取 300 hPa (图 1 d) 为代表。它主要出现在气旋暖区和冷锋附近。在区域的东南角, 受副高控制, 无潜热释放。

为说明对流性潜热计算的可靠程度, 把根据释放的对流性潜热算出的雨量 (图 2 b) 和实测的雨量

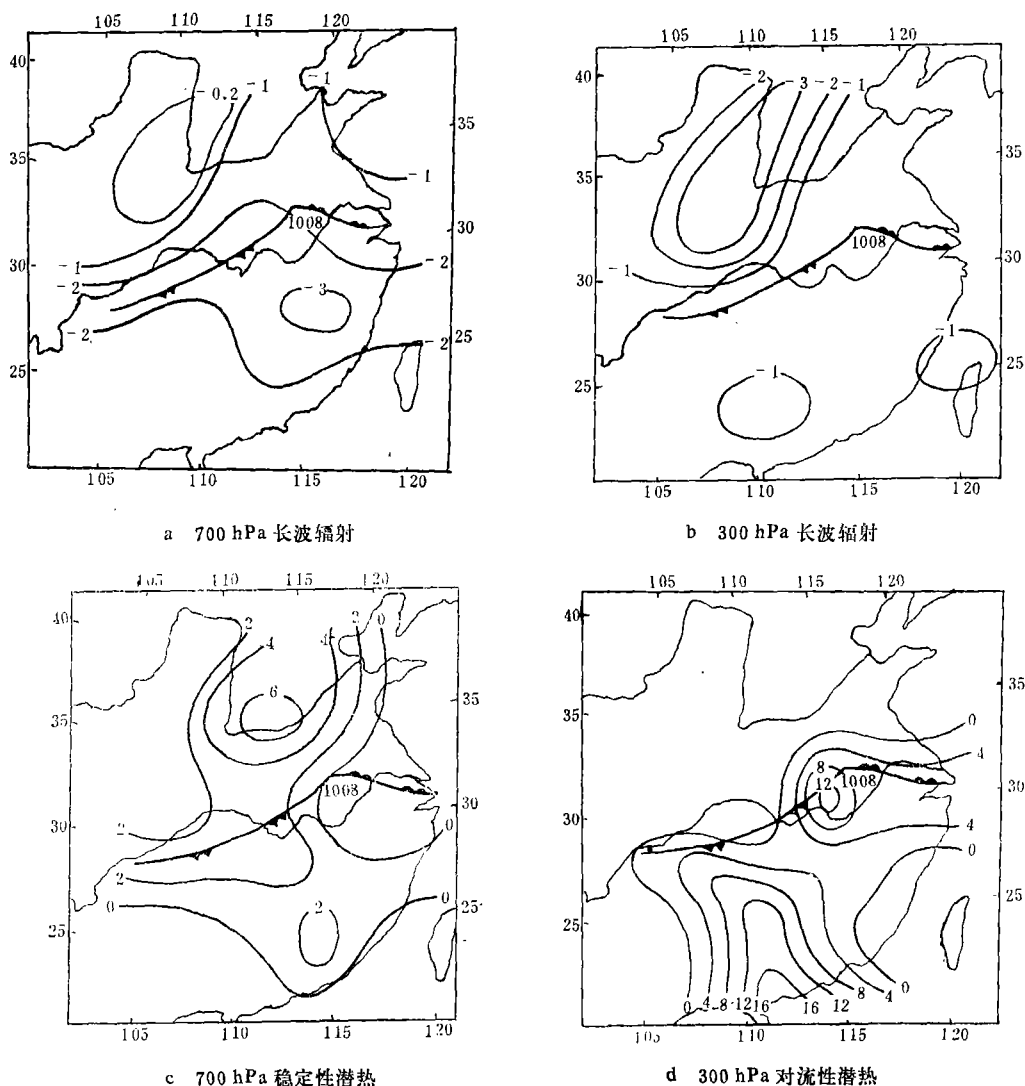


图 1 计算得出的 1982 年 5 月 12 日 08 时的非绝热变化(°C/d)

(图 2 a)作了对比。从图可见,无论是雨区的分布还是雨量的大小,计算的和实测的均相近。黄河附近的雨区,与计算的稳定性潜热区也大致对应。

2) 扰动有效位能的变化

各因子引起的区域平均、垂直积分的扰动有效位能变化的估算值如表 1。

表内 GAE 项括号里的值为对流性潜热引起的扰动有效位能的产生。从表 1 可见:

a) 扰动有效位能在气旋生成以前有所增加,生成以后有所减小。

b) 扰动有效位能的产生项是源,但值不大。如仅考虑对流性潜热引起的产生,则其值比之大一倍左右。

c) 平均有效位能与扰动有效位能的转换项是主要的源,表明有平均有效位能转换成扰动有效位能。这种转换,主要是由于 $[T'V'] \cdot \nabla[N]$ 与 $[N'V'] \cdot \nabla[T]$ 两项引起的。由于冷温度槽落后于高度槽, T' 与 V' 为正相关,平均有效位能向扰动有效位能转换。

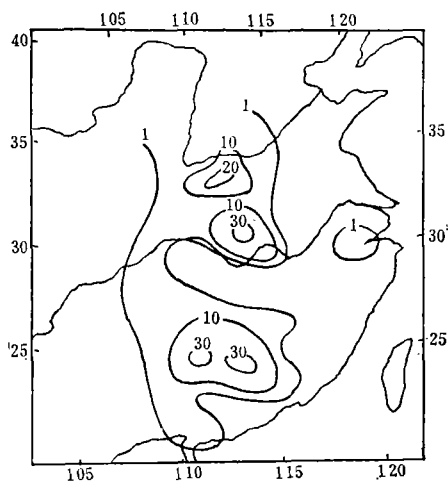


图 2a 1982 年 5 月 12 日 02—08 时的
6 小时雨量图(mm/6 h)

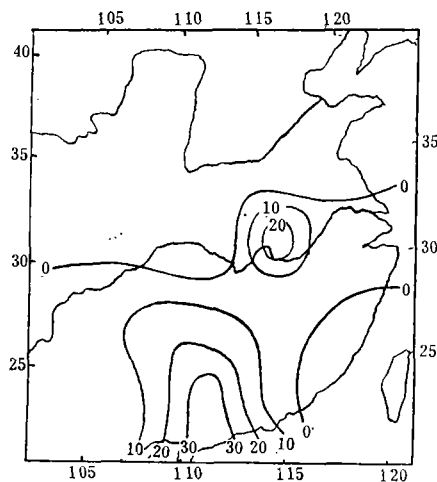


图 2b 根据 12 日 08 时释放的对流性潜
热算出的 6 小时雨量分布(mm/6 h)

表 1 各因子引起的区域平均、垂直积分的扰动有效位能变化的估算值
(AE, 10^3J/m^2 , 其它, W/m^2)

	11日20时—12日08时	12日08时—12日20时
AE	2.16	2.19
$\frac{\partial \text{AE}}{\partial t}$	1.30	-1.10
GAE	0.71(1.34)	0.60(1.17)
WAE	-1.72	-3.02
HFAE	-0.13	-0.37
VFAE	0	0
CAE	1.65	2.15
DPDTE	0.79	-0.46

d) 扰动有效位能的释放是主要的汇。该项主要出现在区域的南半部。例如 12 日 08 时, 在 105°E 以东、 $25^\circ\text{—}28^\circ\text{N}$ 之间的 22 个网格点上, $\omega'\alpha'$ 的垂直积分的平均值为 -12.51 W/m^2 , 而整个区域 (取 121 个点) 的平均值为 -4.33 W/m^2 。所以这 22 个点的 $\omega'\alpha'$ 垂直积分相加的总和, 占到整个区域的 $\omega'\alpha'$ 垂直积分相加总和的一半以上。

根据对流参数化方法算出的对流性潜热主要出现在区域的南半部。计算了它引起的垂直速度 ω_e , 并据此算出了上述 22 个点的 $\omega_e'\alpha'$ 值。结果表明, 在 400 hPa 上, 这 22 个点 $\omega_e'\alpha'$ 的总和为整个区域的 $\omega'\alpha'$ 总和的 43.5%; 而在 300 hPa 上达到 72.4%。就气层的垂直积分而言, 它的贡献为 54.4%。可见它对扰动有效位能的释放起了较大的作用。

对于有效位能和平均有效位能的变化也作了计算。结果表明, 两者主要的源都是水平通量散度项, 这是由于冷锋入侵造成的。主要的汇都是释放项。

3) 扰动动能的变化

表 2 为各因子引起的区域平均、垂直积分的扰动动能的变化。

表 2 各因子引起的区域平均、垂直积分的扰动动能变化

(KE: 10^5J/m^2 , 其它: W/m^2)

	11日20时—12日08时	12日08时—12日20时
KE	0.85	1.30
$\frac{\partial \text{KE}}{\partial t}$	0.56	1.53
GKE	1.69	5.41
HFKE	0.87	0.78
VFKE	0	0
CKE	-0.24	0.30
DE	-1.76	-4.96

从表可见: a) 扰动动能随时间加大, 在气旋生成以后, 扰动动能增长得更快。b) 平均动能与扰动动能之间的转换以及扰动动能的水平通量散度均较小。扰动动能的主要来源是产生项。

3. 讨 论

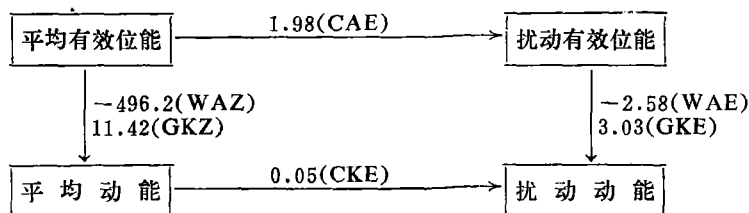
1) 在气旋发生发展过程中, 平均动能与扰动动能总的来说均随时间加大。平均说来, 就增长的绝对值而言, 是平均动能的大; 但就增长值相对于本身值的比例而言, 则是扰动动能的大。扰动动能与平均动能之比, 在 11 日 20 时约为 1:9, 而到了 12 日 20 时, 则变为 1:5.3。

2) 扰动动能主要来源于 GKE。GKE 与 WAE 的绝对值相近。

3) 扰动有效位能来源于两个方面: CAE 以及对流引起的产生。后者约为前者的三分之二。

4) 冷锋入侵引起的斜压性加大, 是平均有效位能的主要来源。转换成扰动有效位能的那部分平均有效位能, 主要是冷锋入侵造成的。

5) 就时间平均而言, 各种能量之间的转换 (W/m^2) 如下:



其中 WAZ 为平均有效位能的释放值, GKZ 为平均动能的产生值。

6) 从能量转换的机制看, 平均有效位能转换成扰动有效位能, 主要是由于 850 hPa 以及 700 hPa 上冷温度槽落后于高度槽的斜压性。应用对流参数化方法计算的垂直运动表明, 对流活动对扰动有效位能转换成扰动动能有较大的贡献。从转换成扰动动能的扰动有效位能的来源看, 冷锋入侵引起的斜压性加大以及对流活动引起的产生均不可忽视。这既不同于温带的主要来自大气的斜压性, 又不同于热带的主要来源于对流性潜热。因此, 从这个例子看, 从能量角度说, 江淮气旋具有半热带性。

参 考 文 献

- [1] Robertson, F. R., and P. J. Smith, The kinetic energy budgets of two severe storm producing extra-tropical cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, 108, 127—143, 1980.
- [2] Dare, P. M., and P. J. Smith, A comparison of observed and model energy balance for an extra-tropical cyclone system, *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1289—1308, 1984.
- [3] Vincent, D. G., G. B. Pant and H. J. Edmon, Jr., Generation of available potential energy of an

- extratropical cyclone system, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1252—1265, 1977.
- [4] Lin, S. C., and P. J. Smith, Diabatic heating and generation of available potential energy in a tornado producing extratropical cyclone, *Mon. Wea. Rev.*, **107**, 1169—1183, 1979.
- [5] Lin, S. C., and P. J. Smith, The available potential energy budget of a severe storm——producing extratropical cyclone, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 521—533, 1982.
- [6] Barnes, S. L., A technique for maximizing detail in numerical map analysis, *J. Appl. Meteor.*, **3**, 396—409, 1964.
- [7] Danard, M. B., A simple method of including longwave radiation in a tropospheric numerical prediction model, *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 77—85, 1969.
- [8] Kuo, H. L., Further studies of the parameterization of the influences of cumulus convection on large-scale flow, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1232—1240, 1974.

A DIAGNOSTIC CASE STUDY OF ENERGY BUDGET FOR A JIANG-HUAI CYCLOGENESIS

Yang Xinjie

(Institute of Meteorology, C. P. L. A. Air Force)

Abstract

The energy budget is analysed for a case of a Jiang-Huai cyclogenesis. The results show that during the development of the cyclone the eddy kinetic energy within the region under investigation is increased. The release of eddy available potential energy due to the convective activities is the primarily source of the eddy kinetic energy.