

梅雨锋上中尺度低涡的发展及其动能变化

田生春 孙淑清 杜长萱

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文研究了1980年7月31日至8月1日的暴雨中尺度低涡的发展过程及结构特征,发现低涡的斜压性清楚,风场和热力场均不对称,暖湿区内上升运动最强。对动能方程的研究表明:在其发展过程中散度风动能向旋转风动能转换,尤其在低层更为清楚,决定因子是 $f\nabla\chi\nabla\psi$ 项;在涡旋发展时,涡度场与散度场的配置使 $\nabla\chi\cdot\nabla\psi$ 达到最大。

我国梅雨锋上的暴雨过程往往表现为一种中- α 尺度或中- β 尺度的扰动,这时在流场上常有明显的涡旋形成,研究这种辐合型涡旋的生成和发展机理,有助于深入了解暴雨过程。近年来,随诊断技术的发展,涡旋发展过程中的能量学关系也日益为人们所重视。在对中尺度和热带天气研究过程中,人们发现风的辐合分量虽然比无辐散分量小得多,但对天气系统的发展却起着非常重要的作用。这不仅因为它代表了非地转运动,而且还因为它与非绝热过程及有效位能释放有紧密的联系。人们把动能分解为辐散风动能和无辐散风动能并计算它们的平衡和转换关系^{[1][2]},由此讨论热带季风及强发展气旋的动能收支,指出散度场在系统发展中起着决定性的作用。我们用此方法来研究尺度较小的中尺度涡旋的发生发展及能量转换机制,以便更深入地了解这类以非地转和非绝热过程为特征的中尺度系统的发展机理。

一、中尺度涡旋发展的物理特征

1980年7月29日—8月2日这次过程是典型的强烈暴雨过程。它发生在副热带高压、乌拉尔山以西阻塞高压和鄂霍茨克海高压相对稳定的大尺度环流下,由于副高脊线比较偏南(在 20°N 附近),使其西部偏南气流和北边滨海高压南侧东风气流间形成的切变线刚好在长江流域附近,稳定的环流使这条切变线从7月30日形成起几日内均在长江流域附近摆动,暴雨也在这条切变线上不断生消。其中31日—1日A区强暴雨过程是伴随切变线上中尺度低涡系统形成而发生的。

1. 中尺度低涡的形成

7月30日天气尺度切变线西端四川盆地出现低涡,其后沿切变线缓慢东移,且尺度逐渐变小(表1)。最小直径为300千米左右,相当于中- β 尺度系统。由图1可见切变线

在700百帕上分为两段，东段略偏北，西段有明显的涡旋环流，其东南有低空急流。高空有明显的西风小槽沿高压边缘南下，并有高压环流，它分别位于恩施和汉口以南(200、300、500百帕风矢量图略)。

表1 700百帕上低涡演变简况

月	日	时 (GMT)	低涡的中心位置		天气图上可分析的闭合等值线 (十位势米)	东西向尺度 (单位: 经距)
			经度 (°E)	纬度 (°N)		
7	30	00	105.5	30.0	308	3.1
7	30	12	107.0	28.0	308	7.8
7	31	00	107.5	28.5	308	6.5
7	31	12	107.5	28.5	308	3.5
8	1	00	108.5	29.0	308	2.5
8	1	12	108.5	30.5	310	4.0

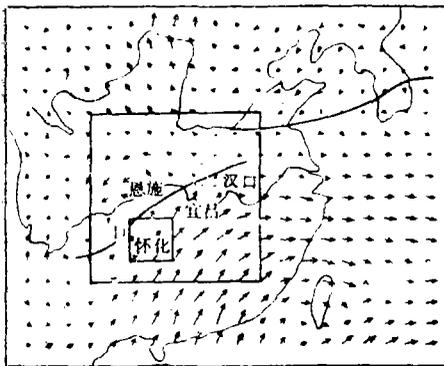


图1 1980年7月31日12GMT 700百帕风矢量图
(大方框区为天气尺度量表征区, 小方框区为暴雨量表征区)

低涡东南侧的低空急流到1日00GMT略有加强, 从原来的 $12 \text{米} \cdot \text{秒}^{-1}$ (31日12 GMT, 芷江)发展到 $16 \text{米} \cdot \text{秒}^{-1}$, 而且汉口也出现了 $17 \text{米} \cdot \text{秒}^{-1}$ 大风。1日00 GMT低涡略有东移, 直至缩小, 待到1日12 GMT则不大明显(图略)。

表2中数字是低涡东南象限(图1小方框)9个格点的平均值。由于发展过程中的系统并不对称, 强天气往往发生在这个部位, 所以从这样平均可突出中尺度系统特点。从表2看出涡旋区的涡度值相对稳定, 强度前后变化不大, 但在1日00GMT中尺度涡旋有新的发展, 正涡度扩展到300百帕, 垂直速度也在该时次最大, 其它各层上升运动也都比较大。由此可见这次中尺度低涡到1日00 GMT发展得最强、中尺度特征最清楚。

表2 逐次涡度、散度、垂直运动数值

月	日	时	物理量	单位	100百帕	200百帕	300百帕	500百帕	700百帕	850百帕	地面
7	31	00	ζ	10^{-5}秒^{-2}	-1.1	-3.9	-0.4	2.4	3.2	3.3	0.1
	31	12	ζ		-2.8	-3.3	-2.0	1.8	3.0	2.9	-0.1
8	1	00	ζ		-2.0	-1.7	0.5	2.6	3.9	3.0	0.1
	1	12	ζ		-1.7	-1.7	0.5	3.1	2.6	3.2	0.8

续表 2

月	日	时	物理量	单位	100百帕	200百帕	300百帕	500百帕	700百帕	850百帕	地面
7	31	00	D	$10^{-5}秒^{-1}$	-0.6	2.1	1.4	-0.7	-0.4	-0.7	-0.2
		12	D		-0.01	1.0	0.3	0.2	0.4	-1.1	0.1
8	1	00	D		0.1	1.8	2.0	0.6	-1.4	-2.7	-0.2
		12	D		0.02	1.0	0.4	0.2	0.7	-0.9	-0.7
7	31	00	ω	$10^{-3}百帕 \cdot 秒^{-1}$	0	-0.9	-2.6	-3.2	-2.0	-1.3	-0.7
		12	ω		0	-2.5	-2.2	-2.4	-2.4	-1.6	-0.7
8	1	00	ω		0	0.3	-2.2	-5.1	-4.7	-2.1	-0.7
		12	ω		0	-0.4	-1.1	-1.7	-2.6	-2.4	-0.9

随中尺度低涡的形成，恩施附近在短时间内发生了强暴雨过程，在1日00 GMT 日雨量图上大于50毫米的雨区水平尺度约为200余千米，位于地面静止锋以北700百帕切变线以南，强暴雨中心在酉阳(155毫米)，恩施稍小为86毫米。

2. 中尺度涡旋的物理特性

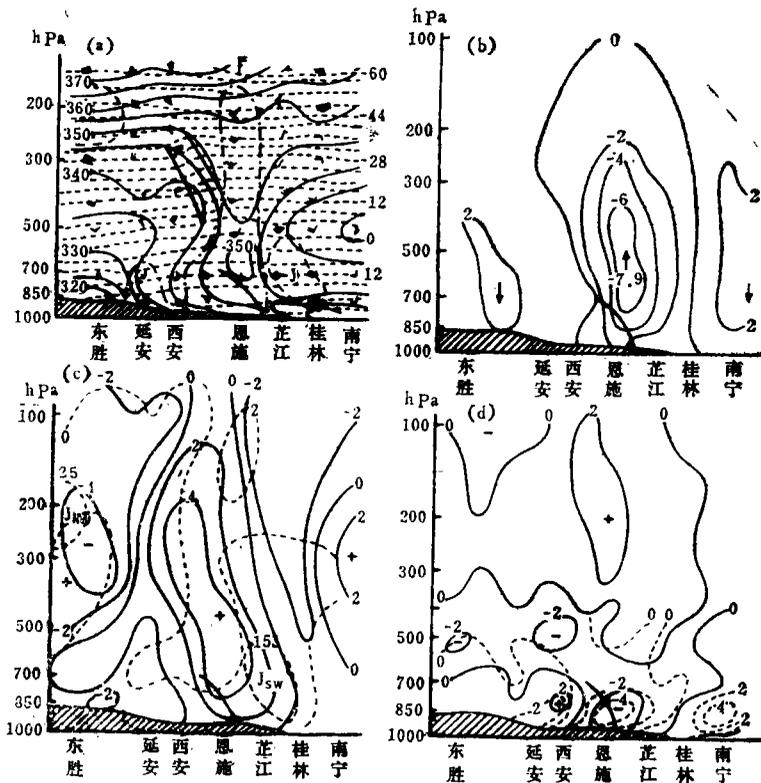


图 2 过恩施与切变线垂直的南北剖面图 A 实线： θ_{se} ；虚线：等温线；点划线： $T-T_d < 3^{\circ}C$ 区；粗线：切变线 B 垂直运动速度 (10^{-3} 百帕·秒 $^{-1}$) C 实线：涡度 (10^{-5} 秒 $^{-1}$) D 实线：散度 (10^{-5} 秒 $^{-1}$)；虚线：水汽辐合 (10^{-7} 克/厘米 2 ·百帕·秒)

从图2看出:系统南北两侧700百帕以下风场、风向和风速都有很大气旋式切变。锋区在500百帕以上,低涡区内异常潮湿的空气非常深厚, $T - T_d \leq 3^\circ\text{C}$ 区从地面向上伸展直到200百帕,其南侧有高 θ_s 舌沿切变线向上爬升,北侧为 θ_s 舌下滑。切变线上空为深厚的上升运动区,强上升中心在500百帕,31日12GMT的强度为 -7.9×10^{-3} 百帕·秒⁻¹,切变线以北则为下沉运动区,强度只约 2×10^{-3} 百帕·秒⁻¹。垂直环流圈与切变线一起向上向北倾斜,而且有正涡度区与之配合。涡旋区内高层为辐散,低层为辐合。

综上所述,这次中尺度低涡系统是在非地转运动场中,由冷暖空气交汇发展起来的,低涡的空间尺度和时间尺度均比较小,中尺度特征十分明显。

二、低涡发展过程中的能量转换

1. 辐散风、旋转风与势函数、流函数

为便于清晰地揭示天气系统发展过程的机理,须将水平风(\vec{V})分解为辐散风(\vec{V}_ψ)和旋转风(\vec{V}_χ):

$$\vec{V} = \vec{V}_\psi + \vec{V}_\chi \tag{1}$$

其中 $\vec{V}_\psi = \vec{k} \times \nabla\psi$ (2)

$$\vec{V}_\chi = -\nabla\chi \tag{3}$$

这两种风分别与势函数(χ)、流函数(ψ)有关,用超张弛法解泊松方程求流函数、势函数

$$\zeta = \nabla^2\psi \tag{4}$$

$$D = -\nabla^2\chi \tag{5}$$

解泊松方程时所用超张弛系数为0.444,接残差界限 5×10^4 米²·秒⁻¹。计算网格格距为150千米,计算方案参看文献[3]。下面给出一个时次的计算结果(图3)。根据(2)式,旋转风大小决定于流函数梯度,方向与等值线走向平行。所以,图3a的长江两侧风有气旋,南侧风大。恩施附近 20×10^5 米²·秒⁻¹的圆形流函数等值线是我们研究的中尺度低涡,其北侧西风小槽也比较明显,可见所算流函数能较好地描写旋转风。由图3b看出在长江中尺度低涡北侧有一势函数高值区,低涡所在地正是势函数梯度大的地区,据(3)式知该区有较强的流入。

2. 辐散风和旋转风动能和它们之间的转换

用辐散风动能 K_ψ 和旋转风动能 K_χ 表示的单位质量总动能 K 的动能方程为

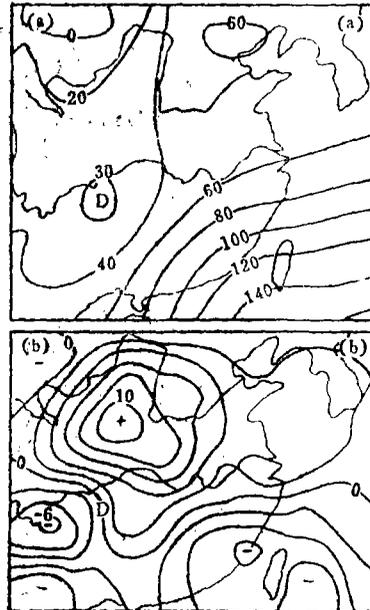


图3 1980年7月31日12GMT700h风场和流函数(a)和势函数(b)图(10⁵米²·秒⁻¹)

$$K = K_{\downarrow} + K_x - J(\psi, \chi) \quad (6)$$

其中 $K = \frac{1}{2} \vec{V} \cdot \vec{V}$, $K_{\downarrow} = \frac{1}{2} |\nabla \psi|^2$, $K_x = \frac{1}{2} |\nabla \chi|^2$

$$J(\psi, \chi) = \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \chi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \chi}{\partial y}$$

这两种风动能变化方程为

$$\frac{dK_x}{dt} = C(p, K_x) - C(K_x, K_{\downarrow}) - D(K_x) \quad (7)$$

$$\frac{dK_{\downarrow}}{dt} = C(K_x, K_{\downarrow}) - D(K_{\downarrow}) \quad (8)$$

其中 $C(p, K_x) = -\frac{1}{g} \int_0^p \int_0^p \chi \nabla^2 \phi ds dp$ 代表位能向势函数动能的转换。而

$$C(K_x, K_{\downarrow}) = -\frac{1}{g} \int_0^p \int_0^p (\nabla \chi \cdot \nabla \psi + \nabla^2 \psi \nabla \chi \cdot \nabla \psi + \omega J(\psi, \frac{\partial \chi}{\partial p}) + \frac{1}{2} \frac{|\nabla \psi|^2}{g} - \nabla^2 \chi) ds dp \quad (9)$$

(9)式代表辐散风动能和旋转风动能之间的能量转换。 $D(K_x)$ 、 $D(K_{\downarrow})$ 分别代表辐散风、旋转风的摩擦消耗项。

从公式(7)、(8)可以看出,除了动能制造和摩擦项外,两种能量的变化完全取决于两种风动能之间的转换,辐散风动能减少则旋转风动能增加,旋转风动能增加只来源于辐散风动能向旋转风动能的转换,而不能直接取自位能的转换。

3. 中尺度低涡形成发展中的动能转换

计算(9)式各项并用图1大方框中81个点的平均代表天气尺度切变线系统的特征值,用小方框里9点平均代表中尺度的特征值,所得 $C(K_x, K_{\downarrow})$ 值列于表3。由表知道,整个气柱的总和值不论是天气尺度区还是中尺度涡旋区 $C(K_x, K_{\downarrow})$ 皆为正值,不

表3 两种动能的转换值 (单位: 焦耳·秒⁻¹·米⁻²)

区域	层次	C						合计
		100—100百帕	200—300百帕	300—500百帕	500—700百帕	700—850百帕	850—地面百帕	
天气尺度区	31.09	0.74	0.84	0.70	0.06	0.33	0.45	3.11
	31.12	0.37	0.71	0.79	-0.08	0.33	0.44	2.56
	1.00	0.58	0.41	0.24	-0.28	0.12	0.55	1.90
	1.12	0.56	0.30	-0.0	-0.10	0.51	0.73	1.90
中尺度区	31.00	1.00	0.03	0.94	0.85	1.73	1.73	6.28
	31.12	0.71	-0.30	-0.30	-0.12	1.01	1.03	2.00
	1.00	0.73	-0.03	-1.05	0.04	2.66	1.93	4.11
	1.12	0.58	-0.02	-0.65	-0.31	1.69	1.70	3.00

管是涡旋发展的哪一个阶段,都是由散度风动能向旋转风动能转换。即总体上说,旋转风动能的发展是由散度风动能转换来的。从涡旋发展的不同阶段来看,31日00 GMT 的转换值最大,约超过其它时次1—2倍,尤其是在低涡区内,转换值竟达6.36 焦耳·秒⁻¹·米⁻²。这时正是处于中尺度涡旋发生的前期,大量散度风动能向旋转风动能的转换为31日12 GMT以后强烈涡旋运动的发展提供了极为有利的条件。从各层分布来看,该时次从地面到100百帕各层的转换值皆为正值,即不论哪层都是为涡旋发展提供先决条件的。31日12GMT开始,中尺度涡旋区正的能量转换值主要发生在低层700百帕以下,而500百帕以上则转为小的负值,说明在低涡的维持阶段涡旋动能的获得主要发生在低层,涡旋也主要表现在低层。和这种能量转换对应,流函数动能在850百帕—地面层有增强(31日12GMT为16.7千焦耳/米²,1日00GMT为22.2千焦耳/米²),在200—300百帕则减少(31日12GMT为20.3千焦耳/米²,1日00GMT为8.8千焦耳/米²),但整个气柱积分的流函数动能值在1日12GMT之前一直较高。

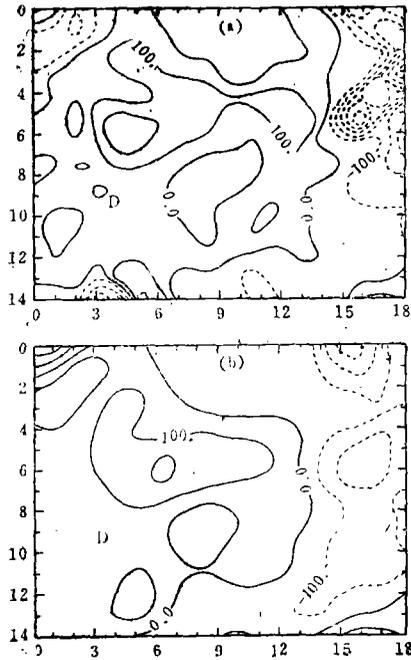


图4 7月31日12GMT两种动能转换量分布 (10⁹焦耳·秒⁻¹)

a C(K_x, K_ψ)

$$b -\frac{1}{g} \int_0^p f \nabla \times \nabla \psi \, dp$$

从图4看这种关系更为明显。由低涡发展较强时的图4a可以看出中尺度低涡正位于一片正的动能转换区中,强中心在低涡北侧,150×150千米²上整个气柱的动能转换量最大达300×10⁹焦耳·秒⁻¹,这个强中心1日00GMT变弱东移,同时低涡后又出现一个负中心(图略),所以此后低涡趋于减弱。

这种动能转换是怎么造成的呢?根据(9)式分别计算了构成C(K_x, K_ψ)的4个动能转换项,表3给出31日12GMT一个时次的各项值,以示一般。

表4 1980年7月31日12GMT 4项动能转换数值表 (单位:焦耳·秒⁻¹·米⁻²)

数值 项目	层次(百帕)					
	100—200	200—300	300—500	500—700	700—850	850—地面
$-\frac{1}{g} \int f \nabla \times \nabla \psi \, dp$	0.72	0.11	0.12	0.09	0.74	0.74
$-\frac{1}{g} \int \nabla^2 \psi \Delta x \cdot \nabla \psi \, dp$	-0.28	-0.07	0.17	0.22	0.27	0.22
$-\frac{1}{g} \int \omega J(\psi, \partial x / \partial p) \, dp$	-0.03	-0.06	-0.05	0.08	0.05	-0.01
$-\frac{1}{g} \int \frac{1}{2} \nabla \psi ^2 \nabla^2 x \, dp$	0.30	-0.29	-0.54	-0.51	-0.06	0.07
C(K _x , K _ψ)	0.71	-0.31	-0.30	-0.12	1.00	1.02

从表4和图4b可以看出造成上述动能转换主要取决于第一项 $-\frac{1}{g} \int f \nabla \chi \cdot \nabla \psi dp$, 其中 f 是地转参数, 这一项说明当 $\nabla \chi$ 不为零并且 $\nabla \chi \cdot \nabla \psi > 0$ 时, 可以使流函数动能增加, 在 χ, ψ 场的梯度矢量交角小于 90° 时, $\nabla \chi \cdot \nabla \psi$ 就大于零, 交角越小其值越大. 第二项表示相对涡度和 $\nabla \chi \cdot \nabla \psi$ 的乘积, 它和前一项量级相同, 大小仅次于前一项, 在对流层中下层它对流函数动能增加也是正的贡献. 上述两项中都有 $\nabla \chi$, 都和辐散风有关. 第三项是垂直运动和 $J(\psi, \partial \chi / \partial p)$ 之积, 它的量级比前两项小, 但在中尺度系统发展过程中, 它在对流层中下层造成势函数动能向流函数动能转换, 其大小也比天气尺度的大. 这两个因素都和散度有关. 第四项表示流函数动能和散度[参看(5)、(6)式]之积, 在散度为负 ($\nabla^2 \chi > 0$) 且流函数动能较大时, 它可对势函数动能向流函数动能转变起较大作用, 即在辐合区有利于势函数动能向流函数动能的转换, 表4数字表明850百帕以下它起正的作用, 但500百帕以上负的动能转换主要由它造成, 这可能是由于高层辐散场起主要作用. 通过以上分析可看出单纯的位能增高并不含有能量释放的机制, 必须经过风场中散度成份的变化, 较高的位能才得以向扰动动能转换. 在中尺度系统发展过程中, 能有前述较大的动能转换, 关键在于散度和它与其它各量的配置. 当流场辐合、流函数和势函数的配置使两个梯度矢量交角较小(小于 90° , $\nabla \chi \cdot \nabla \psi > 0$) 时, 会导致势函数动能向流函数动能大量转换, 而这种转变恰恰就是中尺度天气系统形成、发展的重要过程. 从这也可以看出 χ 场和 ψ 场特定配置、势函数动能向流函数动能转变与天气尺度切变线上的次天气尺度低涡发展成中尺度低涡的关系十分紧密.

三、结 语

1. 引起长江中游特大暴雨的梅雨锋切变线上的中尺度低涡是由上游较大尺度的西南涡旋发展而成的, 它发生在强水平切变的环境风场中, 天气尺度的能量锋明显, 涡旋结构十分清晰(尤其低层), 低层辐合、高层辐散, 随着涡旋的发展垂直速度加强.

2. 散度风动能是一个十分活跃而且重要的因素. 在低涡发展前期就有大量散度风动能向旋转风动能转换(其值达到最大), 在中尺度涡旋形成和发展旺盛期继续维持这个方向的转换. 流场加速引起的摩擦消耗要靠散度风动能来补给, 而这种变化和补给发生在中尺度涡旋发展之前, 一旦这种转换变小, 中尺度发展过程就停止. 两种动能的转换主要发生在低涡, 它与低层涡旋的发展相配合.

3. 散度风动能向旋转风动能的转换主要决定于散度场与涡度场的相对分布. 在中尺度涡旋区, 流函数梯度与势函数梯度矢量交角很小, 有的地方几乎重合, 使 $C(K_x, K_y)$ 的主要项 $f \nabla \chi \cdot \nabla \psi$ 达到最大, 这决定了中尺度涡旋获得较大的动能.

参 考 文 献

- [1] Chen, T.C. et al., *Tellus*, 28(6), 486—498, 1976.
- [2] Krishnamurti, T.N. et al., *J.A.S.*, 39(6), 1922.
- [3] 丁一汇, 天气动力学中的诊断分析方法, 204—215, 科学出版社, 1989.
- [4] 栗原宜夫著, 田生春译, 大气动力学入门, 30—42, 气象出版社, 1984.

THE DEVELOPMENT OF MESO- β SCALE VORTEX ON THE MEIYU FRONT AND ITS ENERGY CONVERSION

Tian Shengchun* Sun Shuqing* Du Changxuan*

ABSTRACT

A vortex with heavy rainfall typical of disturbance over the Meiyu front occurred in the period of July 31 to August 1, 1980. The development and structure characteristics of this meso- β scale low are studied. The low bears clear baroclinity with the front structure different from heat lows in the area. The wind velocity and thermodynamic fields of the low are asymmetric with the strongest ascending motion at its warm sector. Based on the formula $K = K_{\downarrow} + K_{\times} - J(\psi, \chi)$, we have calculated the kinetic energy of the divergent and rotational parts of the winds and their conversion. Investigation of the kinetic energy feature of the low suggests that the transfer from K_{\times} to K_{\downarrow} occurs in its whole life cycle, especially in lower levels. The terms of $f\nabla\psi \cdot \nabla\chi$ and $\nabla^2\psi \cdot \nabla\psi \cdot \nabla\chi$ play a major role in the conversion similar to the situation in explosive cyclogenesis.

*Affiliated with the Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica