

# 暴雨中尺度环境场的涡旋动能收支<sup>\*</sup>

蒙伟光 梁必骐

(中山大学大气科学系, 广州 510275)

**摘要** 计算了暴雨区涡旋动能的收支. 分析表明: 非地转运动产生和水平辐合输送以及平均动能转换的涡旋动能是扰动发展、维持的动能来源. 摩擦项是扰动的主要能汇. 在能源项中, 涡旋动能的制造项起主要作用, 其中斜压转换有很大贡献, 暴雨区中尺度扰动具有较强的斜压性质. 在垂直方向上, 高、低层涡旋动能与平均动能之间有较强的相互转换, 低层动能由扰动向平均气流转换, 为环境场提供能源, 而在高层, 扰动从平均气流获得动能. 此外还给出了暴雨区可能的一种尺度相互作用过程.

**关键词** 涡旋动能, 暴雨, 中尺度环境场

**分类号** P 434. 5

暴雨往往是在不同尺度天气系统相互作用下产生的. 梅雨暴雨的直接影响系统是次天气尺度(中间尺度)系统, 但梅雨雨带内的降水并不均匀, 在卫星云图上, 雨带常存在一个个白亮的中尺度暴雨团, 这些中尺度雨团对应的是在次天气尺度辐合系统中形成的中尺度扰动, 说明暴雨的形成与中尺度扰动有关. 孙淑清等<sup>[1]</sup>在探讨梅雨的维持与发展机制时, 曾对梅雨锋上的中尺度扰动的发展特征作过研究, 认为中尺度扰动的发展与局地条件和低空急流的加强有密切关系. 杨福全等<sup>[2]</sup>从动力学角度出发, 探讨了中尺度扰动与大尺度环境水热场具有强烈的反馈作用. 但由于资料所限, 对这些中尺度系统天气学和动力学还有待进一步研究, 本文在文献 [5] 的基础上, 讨论梅雨暴雨区涡旋动能的收支问题.

## 1 资料处理及涡旋动能收支方程

把气象要素分为区域的平均  $\bar{X}$  和相对于区域平均的扰动量  $X^*$

$$X = \bar{X} + X^* \quad (1)$$

式中,  $\bar{X} = \frac{1}{A} \iint dA$ ,  $A$  为计算区域的面积. 单位质量的涡旋动能可写为

$$K_e = \frac{1}{2} (u^{*2} + v^{*2}) \quad (2)$$

把各变量用区域平均值和扰动值代入运动方程求平均, 可得区域平均动能方程. 然后由文献 [5] 总动能方程减去所得的区域平均的动能方程, 得到区域的涡旋动能方程

$$\left[ \frac{\partial K_e}{\partial t} \right] = - [\nabla \cdot \mathbf{v} K_e] - \left[ \frac{\partial K_e}{\partial p} \right] - [\mathbf{v}^* \cdot \nabla H^*] + [C] + [D] \quad (3)$$

\* 收稿日期: 1997-10-14 蒙伟光, 男, 35岁, 讲师, 现在中国气象局湛江气象学校工作

其中,  $[C]=\left\{ [u^* k^*] \frac{\partial [u]}{\partial p} + [v^* k^*] \frac{\partial [v]}{\partial p} \right\}$ , 为区域平均动能与涡旋动能的相互转换项;  $\left[ \frac{\partial K_e}{\partial t} \right]$  为涡旋动能的局地变化项;  $-\left[ \nabla \cdot \mathbf{v} K \right]$  为涡旋动能的水平输送,  $-\left[ \frac{\partial k K_e}{\partial p} \right]$  为垂直输送, 该 2 项是动能外源项;  $-\left[ \mathbf{v}^* \cdot \nabla H \right]$  是非地转运动产生的动能制造项, 它与  $[C]$  项是动能的内源项. 根据 Kung 等<sup>[6]</sup>, 涡旋动能制造项可分解为 3 项

$$-\left[ \mathbf{v}^* \cdot \nabla^* H \right] = -\left[ \nabla \cdot \mathbf{v}^* H \right] - \left[ \frac{\partial k^* H}{\partial p} \right] - \left[ k^* T \right] \quad (4)$$

$-\left[ \mathbf{v}^* \cdot \nabla^* H \right]$  和  $-\left[ \frac{\partial k^* H}{\partial p} \right]$  分别表示位能的水平和垂直涡旋通量散度, 而  $-\left[ k^* T \right]$  则为涡旋有效位能与涡旋动能之间的斜压转换.

如果把中尺度实验资料看作为中尺度扰动的背景场, 那么扰动量  $x^*$  可以看作是中尺度扰动的一种表现, 方程 (3) 可以认为是描述这种中尺度扰动动能的平衡方程. 本文利用客观分析得到的格点资料, 计算了区域—时间的涡旋动能收支.

## 2 涡旋动能的平衡过程

对涡旋动能与总动能进行比较 (表 1) 可看到, 暴雨中尺度环境场中的涡旋动能  $K_e$  平均只占总动能  $K$  的 1% 左右; 由于流场总动能的增大, 比率逐渐减少. 但在低层这种比率较大, 最大在 850 hPa 附近, 达 3.8%, 这与暴雨区低空急流的维持是有联系的. 孙淑清等<sup>[1]</sup>认为扰动的发展与低空急流的加强发展有关, 低空急流的加强可使高低空流场发生藕合, 构成特殊的季风环流. 环流圈的建立促使其上升区有暴雨产生, 使低空中尺度扰动得以加强.

由 (3) 式计算得到的涡旋动能方程各项的垂直积分结果见表 2. 整层正的涡旋动能产生成为涡旋动能的主要来源. 这与环境场

总动能的平衡结果不同. 尽管总动能的制造是负的, 也即消耗动能, 但涡旋动能制造 (整层积分结果为  $4.22 \text{ W/m}^2$ ) 却为环境场提供了能源. 这种涡旋扰动与中尺度雨团对应的中尺度扰动有关, 可以说雨团中对流的发展为环境场提供了能源, 说明在总动能收支中, 余项  $[D]$  的贡献主要表现为积云对流的作用.

由 (4) 式计算所得结果 (表 3) 表明, 正的涡旋动能制造, 很大一部分是由于斜压转换项  $-\left[ k^* T \right]$  的贡献, 即由于暖空气上升, 冷空气下沉使大气质量中心降低, 造成涡旋有效位能向涡旋动能转换的结果, 也即是对流发展的结果.

这一点与 Kung 等<sup>[7]</sup>对美洲强风暴涡旋动能的诊断结果相似. 他们也指出, 具有对流性质的扰动之斜压转换项在涡旋动能产生项中占有很大一部分, 而在弱对流中, 斜压的转换并不十分重要. 但从数值上看, 本文的结果为  $4.29 \text{ W/m}^2$ , 比整个涡旋动能产生项  $4.22 \text{ W/m}^2$  还要大, 而他们对 2 个个例计算的结果表明, 斜压转换仅占涡旋动能产生项的 63%

表 1 涡旋动能与总动能的比较

Tab. 1 Comparison of eddy kinetic energy and total kinetic energy  $10^4 \text{ J/m}^2$

气压 / (hPa)	[K]	[K <sub>e</sub> ]	[K <sub>e</sub> /K] %
150~ 100	10.90	0.10	0.92
200~ 150	25.00	0.12	0.48
250~ 200	0.10	0.10	0.36
300~ 250	19.70	0.07	0.37
400~ 300	22.00	0.10	0.45
500~ 400	11.50	0.11	1.00
600~ 500	7.74	0.11	1.42
700~ 600	5.27	0.13	2.47
850~ 700	8.68	0.33	3.80
1 000~ 850	9.68	0.24	2.48
1 000~ 100	148.47	1.41	0.95

表 2 暴雨区区域-时间平均的涡旋动能收支

Tab. 2 Area-time averaged eddy kinetic energy budget over the heavy rainfall area

气压 hPa	$[K_e]$ ( $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$[\partial K_e / \partial t]$	$[C]$	$-\left[\mathbf{v}^* \cdot \nabla H\right]$	$-\left[\nabla \cdot \mathbf{v} K_e\right]$	$-\left[\partial K_e / \partial p\right]$	$[D^*]$
					( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )		
150~ 100	0.95	- 0.002	0.08	- 0.83	0.01	0.05	0.69
200~ 150	1.18	- 0.002	0.04	- 0.23	0.02	0.04	0.11
250~ 200	0.95	- 0.005	0.08	1.02	- 0.07	0.03	- 1.06
300~ 250	0.73	- 0.002	0.08	0.53	- 0.07	0.00	- 0.54
400~ 300	1.06	0.001	0.07	0.19	- 0.02	- 0.00	- 0.24
500~ 400	1.10	0.002	0.01	0.73	0.02	0.01	- 0.77
600~ 500	1.10	0.001	- 0.00	1.18	0.07	- 0.01	- 1.24
700~ 600	1.32	- 0.001	- 0.02	0.46	0.18	0.00	- 0.64
850~ 700	3.29	0.006	- 0.12	0.72	0.68	- 0.03	- 1.24
1 000~ 850	2.41	0.008	- 0.08	0.45	0.54	- 0.09	- 0.81
1 000~ 100	14.09	0.006	0.14	4.22	1.38	0.00	- 5.73

表 3 涡旋动能制造项的区域-时间平均结果

Tab. 3 Area-time averaged results for eddy kinetic energy generation term  $\text{W}/\text{m}^2$ 

气压 (hPa)	$-\left[\mathbf{v}^* \cdot \nabla H\right]$	$-\left[k^* T\right]$	$-\left[\nabla \cdot \mathbf{v}^* H\right]$	$-\left[\frac{\partial k^* H}{\partial p}\right]$
150~ 100	- 0.83	- 0.78	- 0.38	0.33
200~ 150	- 0.23	- 0.01	- 0.56	0.34
250~ 200	1.02	0.68	- 0.36	0.52
300~ 250	0.53	- 0.02	0.08	0.47
400~ 300	0.19	1.43	- 0.28	- 0.96
500~ 400	0.73	1.878	- 0.62	- 0.52
600~ 500	1.18	0.37	0.04	0.77
700~ 600	0.46	0.21	0.17	0.08
850~ 700	0.72	0.29	0.14	0.29
1 000~ 850	0.45	0.07	- 0.15	0.53
1 000~ 100	4.22	4.29	- 1.92	1.58

和 48%。丁一汇等<sup>[18]</sup>比较了暴雨和强对流天气发生的条件,认为这两种天气过程的发生有着很不相同的原因:强风暴的发展主要与对流层中上层干冷空气团的活动有关,中上层冷平流及其与低层暖湿空气的叠置对强风暴爆发有很重要的作用;而暴雨的形成主要与中低层暖湿气团活动有密切关系,由于暴雨的这种性质,有更多的凝结潜热释放,使环境空气受热而促使暖空气上升,冷空气下沉,因而有更多的能量通过斜压过程向涡旋动能转换。可见,梅雨暴雨区的中尺度扰动斜压性质是重要的。表 3 还说明,涡旋位能的垂直通量散度项  $-\left[\partial k^* H / \partial p\right]$  对涡旋动能的制造也有较大的贡献;而涡旋位能水平通量散度项  $-\left[\nabla \cdot \mathbf{v}^* H\right]$  整层积分为负值,说明暴雨区有涡旋有效位能向外界辐散,是扰动的能汇。

表 2 中  $[C]$  是区域平均动能与涡旋动能的相互转换项,表示尺度之间的一种相互作用。在高层和低层,由于急流高度附近存在较强的垂直切变,相应  $[C]$  项有相对较大值。低层低空急流附近涡旋动能向基本气流转换,扰动发展对低空急流维持有作用,但在高层,特别是高空急流高度附近涡旋扰动从基本气流得到动能,高层急流对扰动有维持作用。

-  $[\nabla \cdot vK]$  为水平输送项, 这一项中, 低层为辐合, 高层为辐散, 整层积分结果为  $1.38 \text{ W/m}^2$ . 在涡旋动能平衡中, 这一项是源项. 而垂直输送  $-[\partial K_e / \partial p]$  在低层为辐散, 高层为辐合, 有涡旋动能向下输送, 高层的气流对低层扰动的维持有重要作用.

图 1 表明, 主要的源区在 200 hPa 以下, 对应高低空急流附近相应应有 2 个峰值, 500 hPa 附近也有 1 个峰值. 扰动的维持大部分靠其自身的动能制造, 来自外界的输出只占小部分.  $-[\mathbf{v}^* \cdot \nabla H^*]$  和  $[D^*]$  垂直分布比较对称, 说明作为扰动主要动能来源的涡旋动能产生项平衡了大部分的动能损耗.

可以认为, 中尺度实验观测资料是暴雨区中尺度扰动系统的一种环境场, 即可代表中间尺度扰动; 而对区域平均值的脉动量  $X^*$ , 可认为是暴雨区中尺度扰动的表现, 涡旋动能方程描写的就是这种尺度扰动的能量平衡过程. 因此, 综合以上的分析, 梅雨暴雨区尺度之间的相互作用可能存在着这样一种过程: 在合适的中间尺度系统的影响下, 主要由于对流的发展, 虽然涡旋动能有很大一部分被摩擦消耗掉, 但在这过程中, 由尺度之间的非线性相互作用, 导致涡旋动能向平均流场动能转换, 促使低空急流等次天气尺度系统的维持和加强, 而次天气尺度系统对水汽汇集和维持条件性不稳定起重要作用, 对中尺度对流系统的发展起组织作用, 因而使暴雨得以维持加强.

## 4 结 论

(1) 在暴雨区, 扰动在高层和低层均有反映, 但低层的扰动更加明显.

(2) 涡旋动能的产生为扰动提供了能源, 其中斜压转换项有很大的贡献. 可以认为梅雨暴雨中的中尺度扰动具有强的斜压性质.

(3) 在高、低空急流附近涡旋动能与平均气流动能有较大相互转换. 低空急流附近涡旋动能向平均气流转换, 有利于低空急流的维持和加强. 而在高空急流附近, 扰动从平均气流那里得到动能. 高层平均气流还向低层输送动能. 高低空急流附近涡旋动能与平均气流动能相对大的转换反应了尺度之间能量转换的作用.

(4) 维持扰动发展的涡旋动能来自高空急流高度以下的层次, 在高、低空急流高度附近为两个较大的涡旋动能源区. 涡旋摩擦消耗动能, 摩擦损耗的动能主要由扰动本身的涡旋动能制造平衡, 来自外界的涡旋动能输入仅占维持扰动发展所需动能的小部分.

(5) 暴雨区可能存在这样的一种尺度之间的相互作用过程: 合适的中间尺度系统为水汽汇集和条件性不稳定的维持提供了有利的环境, 促使涡旋位能通过斜压机制向涡旋动能转换, 使对流发展、维持, 而由于尺度间的非线性相互作用, 在低层有涡旋动能向中间尺度系统转换, 使中间尺度系统得以维持, 这种维持使对流能继续发展, 因而有利于暴雨加强.

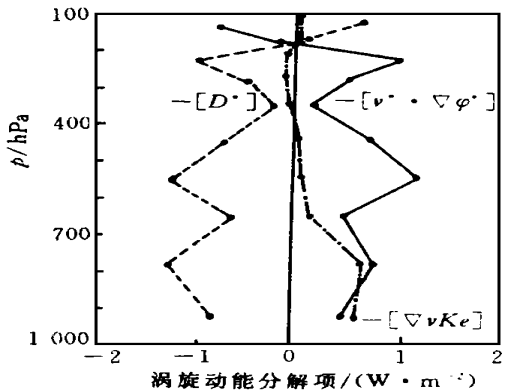


图 1 涡旋动能主要内外源项的垂直分布

Fig. 1 Vertical profiles of eddy kinetic energy internal and external source, generation and dissipation terms

## 参 考 文 献

- 1 孙淑清, 杜长萱. 梅雨锋的维持与其上扰动的发展特征. 应用气象学报, 1996, 7 (2): 153~ 159
- 2 杨福全, 杨大升. 1991年江淮流域暴雨中不同尺度系统的相互作用. 应用气象学报, 1996, 7 (1): 9~ 17
- 3 梁必骐, 李勇. 暴雨中尺度环境场特征及积云对流的反馈作用. 热带气象, 1991, 39 (4): 16~ 25
- 4 Li Y, Liang B Q. Feedback mechanism of cumulus convection in heavy rainfall. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1991, 15 (3): 269~ 277
- 5 蒙伟光, 梁必骐. 暴雨中尺度环境场的总动能收支. 中山大学学报 (自然科学版), 1988, 37 (3): 112~ 116
- 6 Kung E C, Merritt L P. Kinetic energy sources in large-scale tropical disturbances over the Marshall islands area. Mon Wea Rev, 1974, 102 489~ 502
- 7 Kung E C, Tusi T L. Subsynoptic-scale kinetic energy balance in the storm area. J Atmos Sci, 1975, 32 729~ 740
- 8 丁一汇, 章名立, 李鸿洲, 等. 暴雨和强对流天气发生条件的比较研究. 大气科学, 1981, 5 (4): 388~ 379

## Budget of Eddy Kinetic Energy Heavy Rainfall Mesoscale Environment

*Meng Weiguang Liang Biqi\**

**Abstract** The balance of kinetic energy is studied for the transient disturbances connected with the mesoscale system in a heavy rainfall area. Area-time analysis results indicate that the cross-isobaric generation, horizontal transport of eddy kinetic energy, and energy conversion from the area-mean kinetic energy to eddy kinetic energy are main energy sources, which have great contribution to the development of the mesoscale disturbances. The eddy dissipation obtained as the residual term of eddy kinetic energy equation shows negative values in the whole layer, being considered as a main energy sink. Among those source terms, eddy generation term appears to be the major one, in which the baroclinic conversion has a great contribution. The mesoscale disturbance in the heavy rain fall area is considered having strong baroclinic characteristic. More conversions of energy occurred between basic flow and eddy flow are found in the upper and lower layer troposphere. Eddy flow transfers energy to the basic flow in the lower layer, and gains energy from the basic flow in the upper layer. A possible interaction process among different scale motions in the heavy rain fall area is given.

**Keywords** eddy kinetic energy, heavy rainfall, mesoscale environment

\* Department of Atmospheric Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China