

暴雨中尺度环境场的总动能收支^{*}

蒙伟光 梁必骐

(中山大学大气科学系, 广州 510275)

摘 要 利用一套分辨率较高的中尺度实验观测资料, 对一次暴雨过程的中尺度环境场进行了总动能平衡的诊断研究, 讨论了对流活跃和非活跃两个时期动能平衡过程的差异. 结果表明, 暴雨的能量过程很活跃, 非地转运动的绝热耗损和动能的向外界辐散是暴雨过程的主要能汇, 而次网格尺度向网格尺度的运动动能转换, 是环境场动能的主要能源; 暴雨区对流层高层的能量过程比低层活跃, 高层急流对环境场动能平衡过程有很大作用. 比较对流活跃和非活跃 2 个时次的动能平衡过程发现, 暴雨过程的动能平衡与对流强度变化有联系, 2 个不同时段动能平衡过程有差异, 尤其在中层这种差异更明显.

关键词 动能, 暴雨, 中尺度环境场

分类号 P 434. 5

对天气系统能量平衡过程的研究可以增进对系统发展与维持物理机制的认识. 文献 [1~ 4] 对具有对流性质的温带气旋、热带气旋、季风低压和梅雨天气尺度扰动等环境场进行了能量收支的研究. 但对具有强对流性质的中尺度现象的环境场能量收支的分析目前还不多见.

对具有对流性质的天气尺度系统的动能收支分析表明^[5], 环境场能量存在着明显的相互转换和传输过程, 大范围的对流, 通过不可分辨的次网格尺度运动向可分辨的网格尺度运动的能量转换, 被认为是天气尺度系统动能的一种能源. 本文利用较高分辨率的中尺度实验资料, 计算了梅雨暴雨中尺度环境场总动能的收支, 并通过了对流活跃和非活跃 2 个时期动能平衡过程的对比, 试图了解暴雨中尺度环境场能量的平衡过程, 及对流在能量平衡过程中的作用.

1 资料及总动能收支方程

1.1 资 料

资料来自 19830624: 13~ 26: 02 的梅雨暴雨过程, 6 h 一次的探空资料, 观测站点共有 27 个 (图 1), 观测层次有 1 000, 850, 700, 600, 500, 400, 250, 200, 150, 100 h Pa 共 11 个层次. 在计算前, 利用逐步订正客观分析方案, 对各气象要素进行了格点化处理, 确定了计算范围. 该暴雨发生时, 中纬度西风带入海高压南侧的回流气流与热带季风气流

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

在江淮一带交绥, 形成较稳定的环流形势, 地面图上的准静止锋, 在暴雨期间位置变化很小, 南侧低空为西南低空急流, 北边为高空西风急流, 南、低空急流的配置为暴雨的发生提供了有利条件.

1.2 总动能收支方程

有限固定区域的动能诊断方程^[6]

$$\left[\frac{\partial k}{\partial t} \right] = - \left[\mathbf{v} \cdot \nabla H \right] - \left[\nabla \cdot \mathbf{v} k \right] - \left[\frac{\partial k}{\partial p} \right] + \left[D \right] \quad (1)$$

式中, H 为位势高度, $K = (u^2 + v^2) / 2$, $\mathbf{v}$ 为水平风速, k 为 P 坐标中的垂直运动, $[\]$ 表示对气柱的积分, 即 $[\] = \frac{1}{gA} \int \int dA dp$, A 为计算区域面积的大小.

方程中, 动能的局地变化 $\left[\frac{\partial k}{\partial t} \right]$ 与方程右边的 4 个能量过程有关. $-\left[\mathbf{v} \cdot \nabla H \right]$ 表示气流穿越等压线的动能制造, 当运动是非地转时, 气流将会穿越等压线运动, 有动能的产生和消耗; $-\left[\nabla \cdot \mathbf{v} k \right]$ 和 $-\left[\frac{\partial k}{\partial p} \right]$ 分别表示动能的水平 and 垂直通量散度, 表示动能重新分布的过程. $-\left[\mathbf{v} \cdot \nabla H \right]$ 是动能的内源项, $-\left[\nabla \cdot \mathbf{v} k \right]$ 和 $-\left[\frac{\partial k}{\partial p} \right]$ 为外源项. $\left[D \right]$ 表示摩擦消耗, 计算中这一项作为方程的余项算出.

2 总动能的平衡过程

表 1 为计算区域总动能区域-时间平均的诊断结果. 总动能从低层到高层增加. 高层的大值与高空急流的活动有关. $-\left[\mathbf{v} \cdot \nabla H \right]$ 除在 850~ 600 hPa 之间有正值外, 其它层次都是负值, 而且在高层负值比较大, 即非地转运动消耗动能. 水平通量散度项 $-\left[\nabla \cdot \mathbf{v} k \right]$ 在 200 hPa 附近为大的负值区, 也即在急流高度上有动能的向外输送, 而低层这一项为辐合, 说明强对流暴雨区有动能向外界大气输送. 垂直输送项 $-\left[\frac{\partial k}{\partial p} \right]$ 在中下层是辐散, 上层是辐合, 有动能向下输送. 从动能内外源项的结果看强对流暴雨区动能存在较强的非地转运动绝热损耗, 需要外界环境输入动能予以补偿, 但从 $-\left[\nabla \cdot \mathbf{v} k \right]$ 项的整层积分看, 外界环境不但没有输入, 反而在暴雨区有向外界的动能输出. 这说明暴雨区所需的动能需由另外的途径供给.

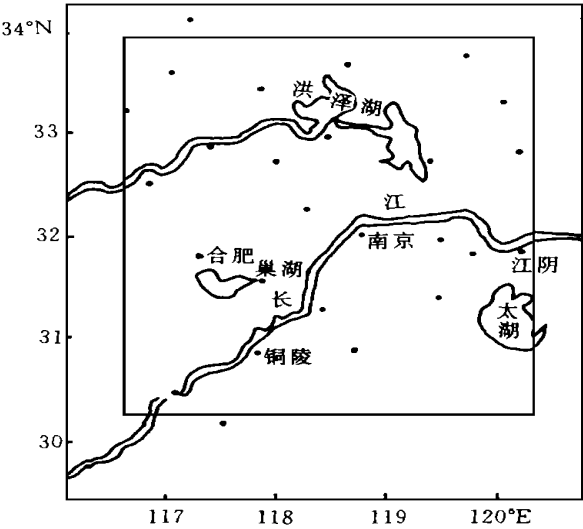


图 1 探空站点分布图
Fig. 1 Distribution of sounding stations
(黑圆点为探空站, 正方形区域为计算区域)

表 1 暴雨中尺度环境场区域 时间平均的总动能收支

Tab. 1 Areatime averaged kinetic energy budget for heavy rainfall meso-scale environment W° m⁻²

气压层 (hPa)	$\frac{[k]}{(10^5 \text{ J m}^{-2})}$	$-\left[\frac{\partial k}{\partial t}\right]$	$-\left[\mathbf{v} \cdot \nabla H\right]$	$-\left[\nabla \cdot \mathbf{v} k\right]$	$-\left[\frac{\partial k}{\partial p}\right]$	$[D]$
150~ 100	1. 09	0. 93	- 10. 18	- 1. 68	5. 26	7. 53
200~ 150	2. 50	1. 67	- 18. 87	- 6. 30	5. 51	21. 33
250~ 200	2. 80	1. 99	- 17. 36	- 8. 48	2. 87	24. 96
300~ 250	1. 97	2. 19	- 9. 82	- 5. 57	- 1. 36	18. 94
400~ 300	2. 20	2. 00	- 12. 93	- 4. 43	- 4. 68	24. 04
500~ 400	1. 15	- 0. 34	- 7. 16	- 0. 94	- 2. 81	10. 57
600~ 500	0. 77	- 0. 50	- 0. 51	0. 07	- 1. 56	1. 50
700~ 600	0. 53	- 0. 80	1. 37	0. 83	- 0. 75	- 2. 25
850~ 700	0. 87	- 0. 81	2. 45	4. 02	- 1. 08	- 5. 20
1 000~ 850	0. 97	0. 12	- 3. 99	4. 23	- 1. 40	1. 28
1 000~ 100	14. 85	6. 45	- 76. 91	- 18. 25	0. 00	101. 71

由表 1 可看到,整层积分的正 $[D]$ 值维持了总动能的平衡. $[D]$ 是作为方程的余项算出的,也可称为次网格摩擦.针对这一项的物理意义,陈受均等^[2]认为,在对一些大尺度系统进行动能平衡分析时,由于用了大网格距的资料,或者对资料进行了平滑处理,可能使中间尺度系统被过滤掉,有可能不正当地过分强调斜压不稳定产生的动能,也即过分强调了积云对流的作用.但在我们的计算中,使用的是具有中尺度分辨率的资料,并且文献^[7]认为积云对流活动在本次梅雨暴雨过程中占有很大的比重,可以认为次网格尺度运动的效应主要是积云对流的作用,是积云的活动维持了暴雨环境场动能的平衡,成为暴雨区主要的能源.

另外,所有的收支项在对流层高层的数值比对流层中低层的数值大,整层的动能平衡特征基本上由高层的特征所决定.这说明在强对流暴雨区中对流层上层的能量过程较低层活跃,说明高空急流在环境场总动能平衡过程中起重要的作用.

针对梅雨暴雨环境场总动能的收支计算,本文的结果与谢安等^[1]的大尺度观测资料的计算结果比较,各主要收支项符号一致,只是本文的数值大得多. Fuelberg 等^[8]在比较 2 种不同分辨率资料的诊断结果时也指出了这种差别,他们认为细网格资料算出的动能制造项与消耗项均比由粗网格资料的结果大,而且粗网格资料算出的结果不能正确反映风暴区强的动能向外界输送过程.可见细网格资料更能描述出运动的非地转性及对流天气区对流活动的强度,更能揭示对流天气区的能量转换过程.

3 对流活跃和非活跃期的动能平衡过程

按照文献^[7]对本次暴雨过程的划分,研究了暴雨对流活跃期和非活跃期动能的平衡过程.选取对流强、弱 2 个时次,就其动能平衡过程进行了对比.结果表明 2 个时次的能量过程有差异,中层的差异更明显.图 2 给出了各主要项 2 个时次的垂直分布.由图 2(a)可见,由于穿越等压线运动而损耗的动能,对流强时比弱时要大,这种差别在中层非常明显,对流弱时中层有弱小的动能产生;图 2(b)为动能水平通量散度项 2 个时次的垂直分布,差别不是

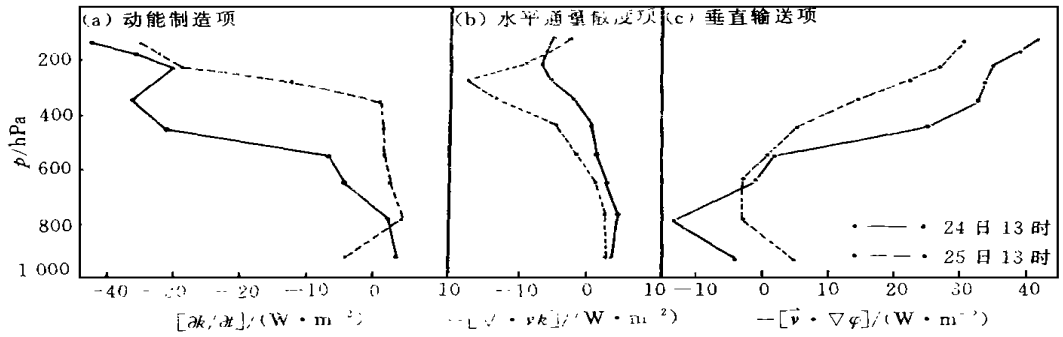


图 2 对流活跃和非活跃时动能平衡方程各主要项垂直分布的比较

Fig. 2 Vertical profile comparison of the main terms in kinetic energy equation between convective and nonconvective periods

很明显,但可看出对流弱时暴雨区有更多的能量向外界输送;余项 $[D]$ (图 2c)的垂直分布与动能制造项的分布比较对称,说明动能的绝热损耗主要由次网格摩擦效应来平衡;低层的次网格摩擦消耗动能,这种效应在对流强时比对流弱时要大.在 600 hPa 以上,次网格摩擦有向网格尺度运动提供能源的效应,这种效应同样在对流强时比对流弱时要大,这种差别说明对流活跃时积云对流在环境场动能平衡中的作用比非活跃时要大.

4 结 论

(1) 暴雨中尺度环境的能量过程很活跃.高层有较强的能量向外界输送,非地转运动的绝热损耗和动能的向外界辐散是暴雨区的主要能汇,而次网格尺度运动在动能平衡过程中贡献最大,是暴雨过程的主要能源.

(2) 暴雨区对流层上层的能量过程比低层活跃,高层急流在环境场总动能平衡过程中起很大作用.

(3) 暴雨过程的动能平衡与对流强度变化有联系.在对流活跃和非活跃 2 个不同时期动能平衡过程有较大差异,尤其在中层差异明显,对流活跃时有更大的动能绝热消耗,而非活跃期中层有弱的动能产生.积云对流对环境场的动能平衡过程在对流活跃期有更大的作用.

(4) 中尺度与大尺度资料的计算结果揭示的动能平衡过程的特征是相似的,但细网格资料更能描写运动的非地转性和对流天气区中对流活动对环境流场的反馈作用,更能揭示对流天气区中能量的转换过程.

需要指出的是,在不同天气形势下,动能收支计算的结果可以很不相同,而且对于有限区域的能量收支,各能量收支项的数值还依赖于区域的选取.本文只是针对具有较强对流活动的梅雨暴雨中尺度环境场动能平衡过程的个例计算,不能说其结果有广泛的代表性.但计算结果至少说明中尺度环境场受到中尺度运动以及其它尺度运动相互作用的影响.目前我们对这种尺度间的相互作用的认识还是很有限的,需要更多地从理论、诊断分析、数值模拟等方面进行研究.

参 考 文 献

- 1 谢安,肖文俊,陈受均.梅雨期间次天气尺度扰动的动能平衡.气象学报,1979,38(4): 351~ 359
- 2 陈受均,谢安.次天气尺度与天气尺度系统间动能交换的诊断分析.气象学报,1981,39(4): 408~ 415
- 3 刘四臣,梁必骐.南海季风低压的扰动动能收支.热带海洋,1993,12(1): 1~ 8
- 4 梁必骐,卢健强.8014号热带气旋发生发展过程的能量学诊断研究.热带气象学报,1995,11(3): 240~ 246
- 5 丁一汇.高等天气学.北京:气象出版社,1991. 208~ 223
- 6 Tsui T L, Kung E C. Subsynchronous-scale energy transformations in various severe storm situations. J Atmos Sci, 1979(34): 98~ 109
- 7 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
- 8 Fuelberg H E, Printy M F. A kinetic energy analysis of the mesoscale severe storm environment. J Atmos Sci, 1984, 41(22): 3212~ 3224

Budget of Total Kinetic Energy of Heavy Rainfall Mesoscale

*Meng Weiguang Liang Biqi**

Abstract The total kinetic energy balance of heavy rainfall mesoscale environment is studied with a set of high resolvable data of mesoscale experiment. Area-time averaged results indicate that energetic process in the heavy rainfall mesoscale environment is active, characterized by cross-contour dissipation, horizontal flux divergence, and transfers of energy from subgrid to grid scale motion. Subgrid effects are considered to be the cumulus convection in the case. Energetic process is more active in upper layer than in lower layer. The upper layer jet stream has great effect on the balance of kinetic energy. Difference of kinetic energy balance between strong convective and weak convective situations is also studied. It is found that the energetic processes in the two situations are different. Great cross-contour dissipation and energy transfer from subgrid to grid scale motion are found in the mid-layer troposphere in the strong convective situation.

Keywords kinetic energy, heavy rainfall, mesoscale environment

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