

一次 MCS 的尺度分离动能分析¹⁾

方慈安

(湖南省气象台,长沙 410007)

吴宝俊 常国刚²⁾ 许晨海

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

利用尺度分离动能方法对 1994 年 6 月 11 日 09UTC—12 日 10UTC 影响湖南省的一次 MCS 进行了研究,结果表明:1. 大尺度运动中非地转风以及两种尺度间风场与气压场的相互作用产生的动能,是这次 MCS 的主要能源;2. 中尺度动能以及两种尺度风场相互作用的动能,随 MCS 发展(减弱)而增加(减小);3. 在 MCS 的整个发展阶段,高层的总体动能锐减。

关键词: 中尺度对流系统 尺度分离动能 尺度间相互作用

引 言

湖南汛期,常有发展良好的中尺度对流系统(MCS)生成发展,并带来暴雨甚至大暴雨。以 1994 年 6 月 11—17 日为例,由于受到此消彼生、鱼贯东移的 5 个 MCS 组成的 MCS 串的影响,湘中、湘南连降暴雨,造成了严重的洪涝灾害^[1]。

然而,我们对影响湖南省的 MCS 研究太少,对其生成机制以及与大尺度环境流场之间的相互作用仍然不十分了解。

近年的许多研究表明^[2-6],尺度分离的动能诊断分析方法,对 MCS 的研究有一定帮助。本文旨在利用该方法对 1994 年 6 月 11 日 09UTC—12 日 10UTC 影响湖南的一次 MCS 进行研究。

1 资料来源及尺度分离方法

1.1 资料来源

原始资料取自气象台站日常业务中的实时资料。

1.2 网格设计及客观分析方案

采用 Lambert 平面投影直角坐标系,以怀化附近(116°E, 28°N)为基准点,水平格距 100km,格点数为 21×21(图 1)。

垂直方向格距为 50hPa,底层为 1000hPa,顶层为 100hPa,非标准层采用 Lagrange 插值法得到。

客观分析方案有很多种,我们采用的是逐步订正法。

1.3 尺度分离方法

如果将总体场(原始场)分离为大尺度(实为天气尺度)和中尺度两部分,则有:

$$F_T = F_L + F_M \quad (1)$$

其中 F 是一个虚设气象变量,可代表任意气象要素,下标 T, L, M 分别表示总体场、大尺度场与中尺度场。本文的尺度分离,是采用改进的 Shuman-Shapiro 方法实现的^[7]。

据改进的 Shuman-Shapiro 滤波方法,某一维气象要素 F ,可表达成:

$$F_i = (1 - S) \times F_i + 0.5 \times S \times (F_{i+1} + F_{i-1})$$

其中, F_i 为 F 在 i 点上的值, F_i 为滤波后的值; S 为滤波系数,由所滤波长计算而得。

分别令 S 等于 S_1 及 S_2 两次使用上式,得:

$$F_i = [(1 - S_1) \times (1 - S_2) + 0.5 \times S_1 \times S_2] \times F_i + 0.5 \times [S_1 \times (1 - S_2) + S_2 \times (1 - S_1)] \times (F_{i+1} + F_{i-1}) + 0.25 \times S_1 \times S_2 \times (F_{i+2} + F_{i-2}) \quad (2)$$

对于二维情况,取 x 方向的两个滤波系数为 S_1, S_2 , y 方向的两个滤波系数亦为 S_1, S_2 , 分别使用式(2),就得本文使用的尺度分离公式(略)。

本文使用的客观分析网格距为 100km,为了分离出 800km 以下的中尺度系统,取 $S_1 = 0.5, S_2 = 0.667$ 和 $S_1 = 1, S_2 = 1.447$ 两次应用尺度分离公式,得到天气系统的大尺度部分,再用原始场减去大尺

1) “八五”攻关项目 “85-906-08”资助。

2) 现址:湖南省气象局,长沙 410007。

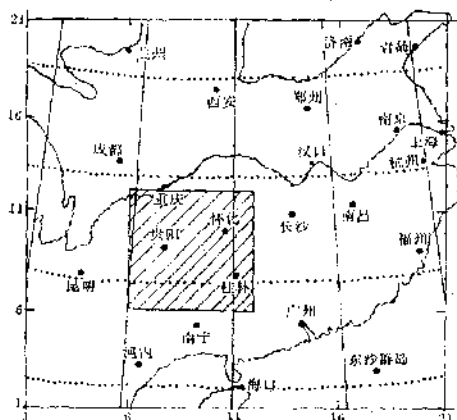


图1 客观分析所用网格及动能诊断分析所用区域(斜线区)

度场,就得到天气系统的中尺度部分,响应函数为:

$$R = \prod_{n=1}^N [1 - 2S_n \sin^2(K\Delta x/2)] \quad (3)$$

式中, Δx 为计算网格距, K 为波数。

据此,可求得如图2所示的 $(1-R)$ 对 $L/\Delta x$ 的函数曲线(可称为中尺度部分的响应函数曲线)。

经验表明,导致湖南暴雨的 MCS 之水平尺度,多在 800km 以下,在客观分析的网格距为 100km 时,可考虑保留 2—5 倍格距波。而实际上,由图2可

见,本文所用尺度分离方案,不仅保留了 2—5 倍格距波的全部,而且保留了 6—8 倍格距波的大部,故符合分析 MCS 的要求。

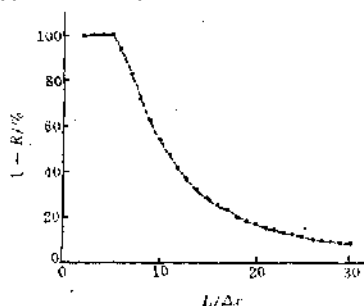


图2 尺度分离方案的响应函数曲线

1.4 MCS 发展、减弱阶段的划分

虽然本次 MCS 发生于 11 日 09 时(UTC,下同),消亡于 12 日 10 时,11 日 21 时达到成熟,但考虑到探空资料的获取时间后,在作计算时将 MCS 发生前、开始发展、开始减弱、消亡后的时次分别定为 11 日 00 时、11 日 12 时、12 日 00 时、12 日 12 时。相应地,将发展阶段、减弱阶段分别定为 11 日 12 时—12 日 00 时、12 日 00 时—12 日 12 时。

2 KT, KL, KM, VLVM 时-空分布特征

2.1 KT, KL, KM, VLVM 及其变率表达式

按照式(1),水平运动动能及其变率为:

$$KT = \int (\vec{V}_T \cdot \vec{V}_T)/2 = \int (\vec{V}_L \cdot \vec{V}_L)/2 + \int (\vec{V}_M \cdot \vec{V}_M)/2 + \int (\vec{V}_L \cdot \vec{V}_M) \quad (4)$$

$$\frac{\partial KT}{\partial t} = \frac{\partial KL}{\partial t} + \frac{\partial KM}{\partial t} + \frac{\partial (VLVM)}{\partial t} \quad (5)$$

式(4)及以下各式内

$$\int (\quad) = \int_{p_1}^{p_2} \int_{x_1}^{x_2} (\quad) dx dy dp/g\sigma$$

其中 σ 表示计算时所取有限区域(图1)。 p_1 与 p_2 分别表示气层顶部与底部气压。当气层厚度为 100hPa 时, $p_2 = p_1 + 100\text{hPa}$; 当厚度为整个大气层时, $p_1 = 100\text{hPa}$, p_2 代表地面气压或 1000hPa。

式(4)右端第 3 项表示大尺度与中尺度运动间非线性相互作用对动能的贡献^{[6], [6]}。由该项表达式 $(\vec{V}_L \cdot \vec{V}_M)$ 可以看出,这是一个可正可负的量,其正、

负号由 $\vec{V}_L$ 与 $\vec{V}_M$ 之间的夹角 α 决定。如果 $-\pi/2 < \alpha \leq \pi/2$, 则 VLVM 为正; 如果 $\pi/2 < \alpha < 3\pi/2$, 则 VLVM 为负^[6]。

2.2 KT, KL, KM, VLVM 及其变率特征

由表1可看出:

(1) 中尺度动能 KM 在 MCS 发展阶段增加, MCS 减弱阶段减小。本个例在 11 日 21 时最强盛, 而从 11 日 12 时至 12 日 00 时 KM 明显增加; 尔后, 随着 MCS 的减弱, KM 明显减小。这个事实是容易理解的。

表1 1994年6月11—12日影响湖南的MCS的KT, KL, KM, VLVM (单位: $10^5 \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$) 及其变率(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

时间/日·时	KT	DKT	KL	DKL	KM	DKM	VLVM	DVLM
11.00	5.77		5.12		0.29		0.36	
11.12	5.90	0.30	4.98	-0.31	0.29	0.01	0.62	0.60
12.00	5.94	0.10	4.85	-0.31	0.44	0.33	0.66	0.08
12.12	3.54	-5.57	2.97	-4.34	0.29	-0.33	0.27	-0.90

(2)总动能 KT 的量级近似为 $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。而已有的研究表明^[2],绝大多数大面积暴雨,是在单位气柱湿有效能量 $(MAE)_1 \geq 10^8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 的地区发生的。这就是说,总水平动能比湿有效能量小2个数量级。

(3)两种尺度流场相互作用对动能的贡献 $VLVM$,在这次个例中平均为正值。这说明在计算区域内平均而言, $\vec{v}_L$ 与 $\vec{v}_M$ 之间的夹角小于 90° 。

象中尺度动能 KM 一样,本例的 $VLVM$ 也是在系统发展阶段增加,减弱阶段减小。

2.3 KT, KL 垂直分布特征

由图3可见:

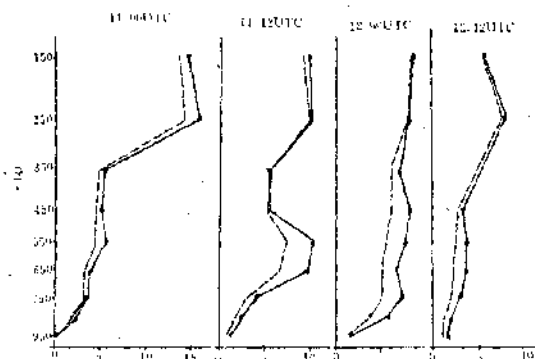


图3 1994年6月11—12日 KT, KL
单位: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, 实线为 KT

(1)在MCS生成之前(11日00时),总体的动能 KT 随高度增加,在250hPa处达最大,为 $1.58 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。一般而言,风速随高度增加,在对流层顶附近达最大。考虑到风速与 KT 的关系,不难理解这种分布。

在MCS生成前大尺度动能, KL 也有类似分布。这与已有的大多数研究结果(如[9]、[10])一致。

(2)在开始发展时(11日12时),总体动能 KT 在500—700hPa出现极值。由后面的分析将会看到,该特征主要是两种尺度流场间相互作用对动能贡献项 $VLVM$ 决定的。

(3)在整个发展阶段(11日12时—12日00时),高层(例如250hPa)总体动能锐减,不再是峰值。

早在70年代初,有人利用飞机观测资料研究了MCS与环境气流的相互作用^[11],结果发现,发展成熟的MCS对环境气流起着与障碍物类似的作用。由该观测事实,似乎可以解释高层 KT 锐减的原因。

(4)当MCS消亡后(12日12时), KT 又在高层出现明显的极值,似乎又恢复到了MCS生成前的状态。

文献[9]曾用探空资料研究过一次MCS与环境气流的相互作用。结果发现,当MCS减弱后,大气似乎又恢复到原来的状态。该结果与图3给出的事实一致。

2.4 $KM, VLVM$ 垂直分布特征

由图4可见:

(1)在MCS生成之前,在250hPa层 $VLVM$ 出现一峰值。该峰值是否具有预兆意义?尚待进一步探讨。

由于MCS尚未发生,故 KM 与 $VLVM$ 数值都很小。

(2)当MCS开始发展时,在700—500hPa高度处 $VLVM$ 出现一正的峰值。这可能是由于,与MCS发展相伴,两种尺度流场间的交互作用也加强。

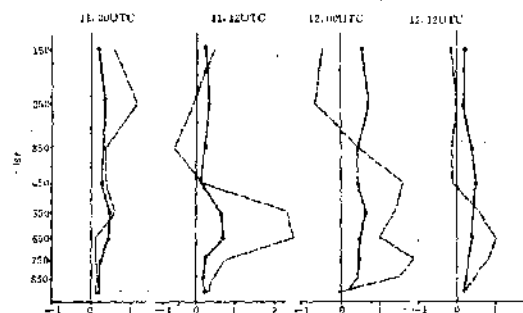


图4 1994年6月11—12日 $KM, VLVM$
单位: $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, 实线为 KM

如前所述,由于该峰值的出现,总动能 KT 在相同层次上也出现了峰值。

(3)当MCS开始减弱时, $VLVM \geq 1 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 的层次虽然变厚,但上一时次出现的 $VLVM = 2.4 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 的峰值消失。这可能预示着两种尺度流场间的交互作用减弱。

(4)当MCS消亡后,650hPa层 $VLVM$ 出现一峰值。该峰值的意义,也有待进一步探讨。

由于MCS已消亡,故 KM 与 $VLVM$ 数值都很小。似乎也恢复到了MCS发生前的状态。

3 $GT, GL, GM, GKLM$ 时-空分布特征

3.1 $GT, GL, GM, GKLM$ 表达式

按照式(1),总动能产生项 GT 可写作:

$$\begin{aligned}
 GT &= \int -\vec{v}_L \cdot \nabla \varphi_T \\
 &= \int -\vec{v}_L \cdot \nabla \varphi_L + \int -\vec{v}_M \cdot \nabla \varphi_M + \int -\vec{v}_L \cdot \nabla \varphi_M + \int -\vec{v}_M \cdot \nabla \varphi_L \\
 &= \underbrace{\int -\vec{v}_L \cdot \nabla \varphi_L}_{GL} + \underbrace{\int -\vec{v}_M \cdot \nabla \varphi_M}_{GM} + \underbrace{\int -\vec{v}_L \cdot \nabla \varphi_M}_{GLM} + \underbrace{\int -\vec{v}_M \cdot \nabla \varphi_L}_{GML} \\
 &= \underbrace{GL + GM + GLM + GML}_{GKLM}
 \end{aligned} \tag{6}$$

其中 GL 与 GM 分别表示大尺度与中尺度运动中气流穿越等高线产生的动能, $GKLM$ 表示大、中尺度间风场和高度场相互作用产生的动能, GLM 表示大尺度运动穿越中尺度等高线产生的动能, GML 表示中尺度运动穿越大尺度等高线产生的动能。

3.2 GT 与 GL 垂直分布及其演变

由图 5 看出:

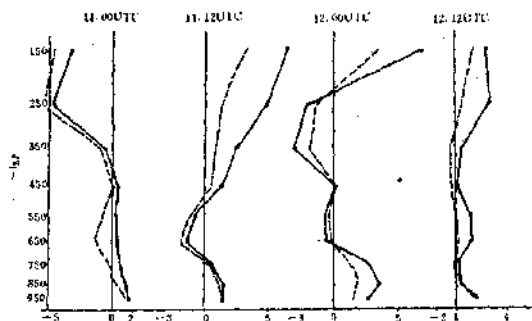


图 5 1994 年 6 月 11—12 日 GT 、 GL

单位: $W \cdot m^{-2}$, 实线为 GT

(1) 在 MCS 发生前, GT 与 GL 的值, 350hPa 以下数值很小, 350hPa 以上, 特别是 250hPa 数值很大, 但为负值。

(2) 当 MCS 开始发展时, 高层的 GT 与 GL 出现正值, 且 GT 数值较大。

该事实表明, 在系统开始发展时, 总体的与大尺度运动中, 气流穿越等高线, 自高压一侧流向低压一侧, 由位能转换成动能而产生的动能是 MCS 发展的能源, 尤以高层最明显。

若考虑到 MCS 发展时, 对流层高(低)层常是高(低)值系统及辐散(合)气流, 则上述事实是可以理解的。

(3) 系统开始减弱时, 虽然下层 GT 与 GL 都有所增大, 但 650—250hPa 层 GT 与 GL 已变成负值, 故不利于系统再发展, 有利于系统减弱。

这个事实启示我们, 这次 MCS 的减弱, 在 650—250hPa 层次的 GT 与 GL 变为负值起了一定的作用。

(4) 当系统消亡后, GT 又有所增加, 1200UTC 250—650hPa 层的负值已变为正值。

这个事实表明, 促使系统消亡的因素正在消失, 促使新的 MCS 发展的因素正在加强。从卫星云图资料(略)看出, 也确实如此。

3.3 GM 、 $GKLM$ 垂直分布及其演变

由图 6 看出: 除 11:00UTC 外, 其它时次的 $GKLM$ 廓线与 GT 廓线非常相似。这个事实说明, 在这次 MCS 发生发展过程中, $GKLM$ 起着非常重要

的作用。

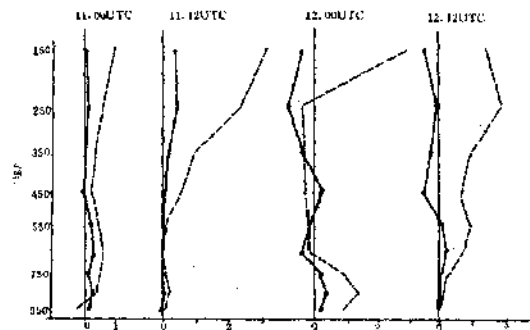


图 6 1994 年 6 月 11—12 日 GM 、 $GKLM$

单位: $W \cdot m^{-2}$, 实线为 GM

4 动能输送的时-空分布特征

4.1 水平输送

按照式(1)、(4), 动能水平输送为:

$$\int -\vec{V}_T \cdot \nabla K_T = \int -\vec{V}_L \cdot \nabla K_L - \dots \quad (7)$$

$\vdots$
 $HADT$ $HADL$

其中 $HADT$ 表示总体运动场中动能水平输送, $HADL$ 表示大尺度运动场中动能水平输送。

计算结果(略)表明, 式(7)中的其余项都比 $HADT$ 与 $HADL$ 小 1—2 个数量级, 故对其它项暂不讨论。

由表 2 可见, 在这次 MCS 过程中, 动能水平输送都是外流, 只是当 MCS 开始发展时, $HADT$ 、 $HADL$ 外流数值变得较小。

表 2 1994 年 6 月 11—12 日影响湖南省的 MCS 的 $HADT$ 与 $HADL$ 之演变(单位: $W \cdot m^{-2}$)

时间/月·时	11.00	11.12	12.00	12.12
$HADT$	-5.59	-2.68	-5.46	-6.06
$HADL$	-5.52	-2.28	-6.60	-4.98

4.2 总体场动能的垂直输送

总体场动能垂直输送的表达式为 $-\omega_T \partial K_T / \partial p$, 计算结果见图 7。由图看出:

(1) 在系统生成前(11:00UTC), 该项呈“上正下负”型分布, 但数值很小。

(2) 在系统开始发展时(11:12UTC), 动能垂直输送明显加强, 整层 $VADT$ 达 $-1.62 W \cdot m^{-2}$, 在 750hPa—650hPa 间有 $-0.90 W \cdot m^{-2}$ 的峰值。

将图 7 与图 3 对比后发现, 总体动能正在中低层集中。

6 小结

6.1 大尺度运动中气流穿越等高线自高压一侧流

向低压一侧产生的动能 GL , 以及两种尺度间风场与高度场的相互作用产生的动能 $GKLM$, 是这次 MCS 的主要能源。

6.2 中尺度动能 KM , 以及两种尺度间风场相互作用对动能的贡献 $VLVM$, 随 MCS 发展而增加, 随 MCS 减弱而减小。

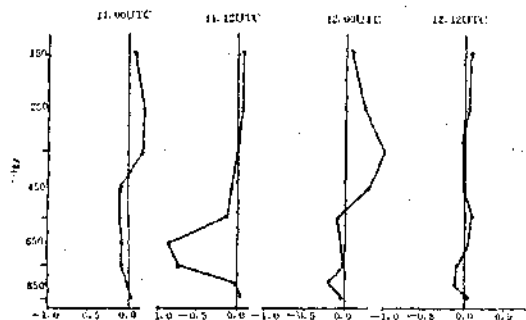


图7 1994年6月11—12日总体垂直输送项
单位: $W \cdot m^{-2}$

6.3 总体动能 KT , 在 MCS 生成之前, 高层 250hPa 处为一峰值; 在整个发展阶段, 该峰值消失, KT 锐减; 当 MCS 消亡后, 又恢复到了 MCS 生成前的状态。

6.4 在这次 MCS 过程中, 动能水平输送项都是外流; 当 MCS 开始发展时, 外流减小。

6.5 在 MCS 开始发展时, 垂直输送使动能在中低层集中; 在 MCS 开始减弱时, 垂直输送使动能向高层集中。

总之, 尺度分离的动能诊断分析方法, 对研究 MCS 有一定的帮助。

参考文献

- 1 徐良炎, 华南江南洪涝严重, 华北东北夏旱面积大, 气象, 1994, 20(9), 62—63.
- 2 Carney, T. Q., D. C. Vincent, Meso-synoptic scale interaction during AVE/SESAME I, 10—11 April 1979. Part I: theoretical development of interaction equations, Mon. Wea. Rev. 114(1986), 345—352.
- 3 Carney, T. Q., D. C. Vincent, Meso-synoptic scale interaction during AVE/SESAME I, 10—11 April 1979. Part II: influence of convective on larger scale flow, Mon. Wea. Rev. 114(1986), 353—370.
- 4 林松锦, 蔡钦明, 梅雨期间中尺度对流系统之动能收支分析, 大气科学(台湾), 1989(17), 187—208.
- 5 张向东, 余志豪, 陆汉城, 梅雨锋中尺度系统及其与大尺度运动相互作用的能量学研究, 热带气象, 1991(7), 72—81.
- 6 chen Shoujun, Bai Lesheng, E. C. Kung, An approach to kinetic diagnosis of meso-synoptic scale interaction, Mon. Wea. Rev. 1990(118), 2774—2780.
- 7 郑良杰等, 中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟, 北京: 气象出版社, 1989, 20—30.
- 8 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.
- 9 Fuelberg, H. E., M. F. Priddy, Meso-scale thunderstorm/environment interaction during AVE/SESAME V (20—21 May 1979), Bull. Amer. Met. Soc., 1983(64), 1144—1156.
- 10 Fuelberg and G. J. Jedlovac, A subsynoptic scale kinetic energy analysis of the Red River Valley tornado outbreak (AVE/SESAME D), Mon. Wea. Rev., 1982(110), 2005—2155.
- 11 Fankhauser, J. C., Thunderstorm environment interactions determined from aircraft and radar observations, Mon. Wea. Rev., 1971(99), 171—192.

An Analysis of the Scale-Separated Kinetic Energy of A Mesoscale Convective System

Fang Cien

(Hunan Meteorological Station, Changsha 410007)

Wu Baojun Chang Guogang Xu Chenhai

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

A mesoscale convective system (MCS) influenced Hunan Province during 11,0900—12,1000 UTC June 1994 has been studied by the use of the scale separated kinetic energy. Results showed that (1) the kinetic energy generated by the ageostrophic flow in large scale motion field and by the interaction between the flow and pressure fields of the large- and meso-scale motions is the dominant source of energy; (2) the kinetic energy of the mesoscale motion and of the interaction between large- and meso-scale flow fields increases (decreases) with the MCS's development (fading); (3) the total kinetic energy of upper troposphere drastically reduced during the MCS's development phase.

Key Words: mesoscale convective system (MCS) scale-separated kinetic energy