

华南前汛期一次暴雨过程中的中尺度对流系统^{*}

蒙伟光¹, 王安宇¹, 李江南¹, 冯瑞权^{1,2}, 梁嘉静²

(1. 中山大学大气科学系, 广东 广州 510275;

2. 澳门地球物理暨气象台, 澳门)

摘 要: 通过对卫星云图观测到的 MCS 云团生消过程和实测降水资料的分析, 发现 1998 年 5 月 23—24 日发生在华南的一次前汛期暴雨过程主要是由多个相继生消的 MCS 造成的。利用 MM5 模式成功地模拟出了其中两个主要 MCS 的发生发展。对模拟结果进行分析发现这两个 MCS 的发生发展是冷暖空气交汇的结果, MCS 生成于暖空气而消亡于冷空气中。两个 MCS 的上升运动都非常强, 最大辐散位于 400 hPa 左右, 垂直方向上表现为气旋性的涡柱, 右侧低层有中尺度的低空急流, 高空有强的西南风区。

关键词: 卫星云图; 中尺度对流系统 (MCS); 中尺度低空急流 (mLLJ); 数值模拟

中图分类号: P458.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) 03-0073-05

华南前汛期暴雨具有明显的对流性质。根据对实际观测资料包括卫星云图的分析, 这一时期的暴雨不少是由中尺度对流系统 (MCS) 造成的^[1,2]。1998 年 5 月 23—24 日在华南前汛期出现的一次暴雨就是与 MCS 活动有关的典型个例, 已有工作对此次暴雨过程进行了研究^[2,3]。对卫星云图和实测降水资料分析可以看出, 暴雨不只是由一个而是由多个 MCS 相继生消造成的。应用中尺度数值模式 MM5 我们成功地模拟了其中两个主要 MCS 的发生发展过程, 通过对模式输出进行分析, 得到了一些很有意思的结果。

1 卫星云图上观测到的 MCS 云团的生消过程

1998 年 5 月 23—24 日的暴雨过程是由于较强冷空气南下影响造成的, 广东省西江流域, 珠江三角洲地区及阳江市 14 个站出现了暴雨以上降水, 其中珠江口以西地区出现了大暴雨, 四会市的日雨量达 233.7 mm^[4]; 澳门站仅从 23 日 17 时 (UTC, 下同) 到 24 日 10 时记录到的降雨量也达到了 140.8 mm。与卫星云图进行比较不难发现, 这次暴雨过程主要与 3 个 MCS 云团的相继生消过程密切相关。

图 1 是 5 月 23 日 09 时至 5 月 24 日 06 时每隔 3 h 的 GMS 红外增强显示云图。第 1 个云团称它为 MCS-CA, 它在 22 日 22 时以后在广东西部沿海生

成, 生成后位置少变, 23 日 05—06 时发展至最强 (图略), 此后很快减弱, 大致于 23 日 09 时后逐渐消亡 (图 1(a))。第 2 个云团 (MCS-CB) 生成的位置较为偏北, 23 日 03 时左右在广西中部生成, 生成后逐渐加强东移, 23 日 09—10 时移到广西东部时强度最强 (图 1(a)), 之后东移减弱, 并在 23 日 18 时后逐渐消亡于广东的中西部 (图 1(d))。第 3 个云团 (MCS-CC) 是这次暴雨过程中最强大的云团。它在 23 日 15 时形成于珠江口西面 (图 1(c)), 之后迅速加强并向南扩展, 至 5 月 24 日 00 时以后强度发展达最强, 范围也非常大 (图 1(f)), MCS-CC 在 24 日 09 时后逐渐消亡, 值得指出的是, MCS-CC 在消亡过程中范围也还在继续扩大。

从 3 个 MCS 云团的生消过程可以看出, 它们的维持时间和移动方式有差异, MCS-CA 的生命史最短, MCS-CC 维持时间最长, 维持时间的长短可能与 MCS 的强度有一定的关系。在移动方式上, MCS-CA 位置稳定少动, MCS-CB 在它的生消过程中, 东移了一段距离, 而 MCS-CC 则主要是向南向东扩展, 这是一个很有意思的现象。

这 3 个 MCS 云团是造成暴雨过程主要的中尺度对流系统。图 2 是实测的 5 月 23 日 06 时至 24 日 12 时每 6 h 的降水量图, 资料取自南海季风试验。降水量图与卫星云图可以进行一定程度的比较, 所以说是一定程度的比较, 是因为云区并不能代表降水区, 积云发展最盛的时候也不代表降水最强的

^{*} 收稿日期: 2002-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49975001); 中国科学院知识创新工程资助项目 (ZK CX2-SW-210)

作者简介: 蒙伟光 (1962 年生), 男, 博士生; 通讯联系人: 王安宇; E-mail: waylc@l365.com

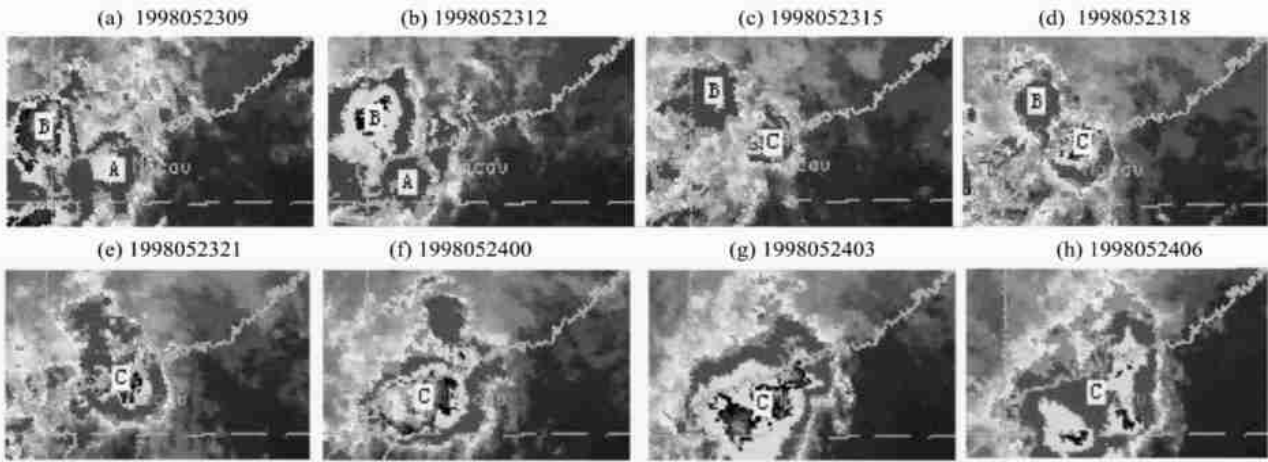


图 1 1998 年 5 月 23 日 09 时 (UTC) — 5 月 24 日 06 时 (UTC) 每 3 h 间隔的GMS 红外增强显示云图
Fig. 1 The GMS satellite infrared images at every 3 h between 0009 UTC 23 May and 0006 UTC 24 May 1998

时候,但是,从下面的分析可以看出降水区和云区的相关程度还是比较高的。

从图 2 (a) 可以看到,在广西东部有与 MCS—CB 相对应的雨区,广东西部沿海也有与 MCS—CA 对应的降水区。MCS—CB 的降水区也和云区一样有东移的过程,值得指出的是 MCS—CB 的云区在 23 日 09—10 时为最强,可是降水区却是在临近消亡时最强(图 2(b))。对比图 2(c) 和图 2(d) 不难发现 MCS—CC 的降水区有南移加强和扩大的趋势。虽然海上没有实测资料,可是从香港雷达资料来看, MCS—CC 在临近消亡时海上的降水也较大(图略)。

2 数值模拟试验方案设计

为了对上述 MCS 云团进行分析和研究,我们用 MM5 模式对它们进行了数值模拟。MM5 是由美国宾州大学和美国大气科学研究中心联合开发的非静力中尺度原始方程数值模式,由于模式包含有比较完整的物理过程,很多工作已证明该模式对中小尺度系统具有较好的模拟能力^[5,6]。本次模拟试验区由两个相互嵌套的大小区域组成(大区域 75×85 个格点,格距 54 km,小区域 97×100 个格点,格距 18 km)。模式垂直方向取为 23 层。边界层物理过程采用 MRF 方案,显式水汽方案取简单冰相方案,积云降水参数化取 KF 方案。模式积分初始时间为 23 日 00 时,积分 42 h。文章主要对 18 km 区域的模拟结果进行讨论。

3 数值模拟结果

3.1 MCS 的连续生消

按照美国国家风暴计划(National Storm Program)

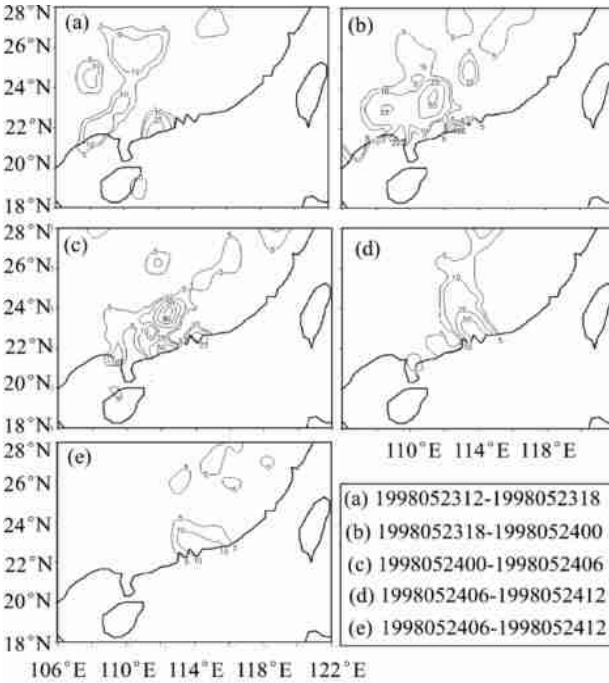


图 2 1998 年 5 月 23 日 06 时(UTC)—24 日 12 时(UTC) 每 6 h 降水量(mm) 分布

Fig. 2 The distribution of every 6 h precipitation(mm) between 0006 23 May 1998 and 0012 24 May 1998

中的定义^[7],在模拟结果中把水平尺度在 10~500 km、生命期在 10 h 左右的有强上升运动的对流降水系统定义为中尺度对流系统(MCS)。

这次暴雨过程与 3 个 MCS 云团的生消有密切联系,但从数值模拟试验的结果看,模式只模拟出了与其中两个云团(MCS—CB 和 MCS—CC)相对应的中尺度对流系统,简称为 MCS—B 和 MCS—C。至于为什么没有能模拟出与 MCS—CA 相对应的中尺度对流系统(MCS—A),认为主要与初值有关。曾用 22 日 12 时作为积分初值进行类似的模拟试

验, 结果只模拟出了 MCS—A, 而没有模拟出 MCS—C 和 MCS—B 来, 模式的初值对模拟结果影响很大。

为了与实际观测到的每 6 h 降雨量进行比较, 图 3 给出了模式模拟的从 23 日 12 时至 24 日 12 时每 6 h 的降雨量分布图。从总体上看, 尽管模式没能模拟出 MCS—A 的活动情况, 但对 MCS—B 和 MCS—C 的降水区有较好的反映。由图 3 (a) 看到, 23 日 12 时—18 时, 模拟的与 MCS—B 对应降雨区的位置和强度与实际观测结果(图 2(b)) 基本一致, 但对位于华南西部沿海与 MCS—A 对应的雨区没有模拟出来。23 日 18 时—24 日 00 时, 模拟的 6 h 降雨量图(图 3(b)) 与实际观测结果(图 2(c)) 也很相似, 降水区有东移的趋势。特别地比较图 3(b) 与图 3(c) 可以看到, 随着 MCS—C 的发展, 降雨区向南扩展, 24 日 00 时—06 时, 模拟的 6 h 降雨区主要位于珠江口附近, 而且随着 MCS—C 的东移减弱, 模拟的降水区也逐渐东移, 与实际观测到的 MCS—CC 云团的降水特征很相似。综上所述, MM5 成功地模拟了与 MCS—CB 和 MCS—CC 云团相对应中尺

度对流系统的连续发生发展过程。

3.2 两个 MCS 发生发展的特点

一般来说, 用实测资料很难对 MCS 的发生发展进行分析, 因为相对于 MCS 来说, 实测资料的时空分辨率是太低了, 用数值模拟的结果进行分析是一种可取的方法。经过分析, 我们认为这两个 MCS 的发生发展主要有以下几个特点:

(1) 这两个 MCS 的发生发展是冷暖空气交汇的结果, 但 MCS 生成于暖空气消亡于冷空气中。从低层流场分布图上看, MCS 形成于冷锋式切变线上的涡旋中(参看图 5(a)), 生成时主要位于暖空气一侧。这是很合理的, 由于涡旋南侧有明显的南风流入, 近地层的空气比较暖湿, 有利于不稳定的发展。图 4 分别给出了两个 MCS 发展强盛时沿移动方向的垂直剖面图, 可以看到此时 MCS 的水平尺度都已在 100 km 左右, 与垂直向上的涡柱配合, 低层的涡度值最大。特别地图 4(b) 的剖面(图 3(c) $\overline{CC'}$ 线) 基本是南北向的, 可以明显地看出 MCS—C 与冷暖空气活动的关系。从时间演变上看, MCS—C 开始发展时, 南风强于北风, 减弱时北风强于南

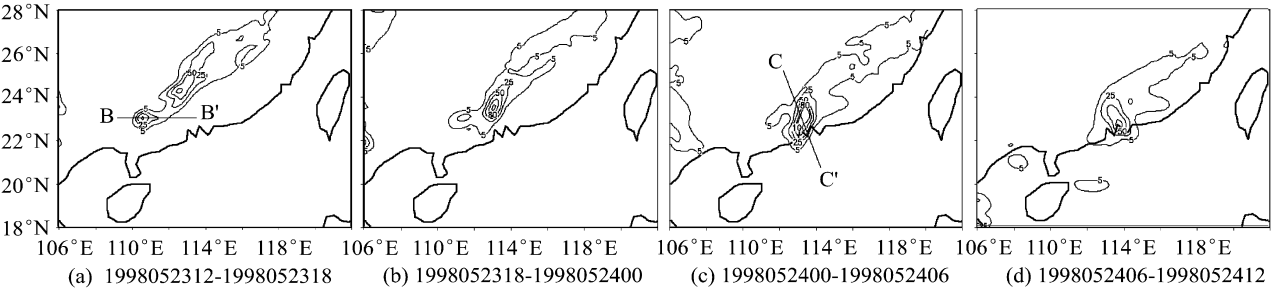


图 3 模拟的 1998 年 5 月 23 日 12 时—24 日 12 时 (UTC) 每 6 h 的降雨量分布图

Fig. 3 The simulated every 6 h precipitation between 0012 UTC 23 May—0012 UTC 24 May 1998

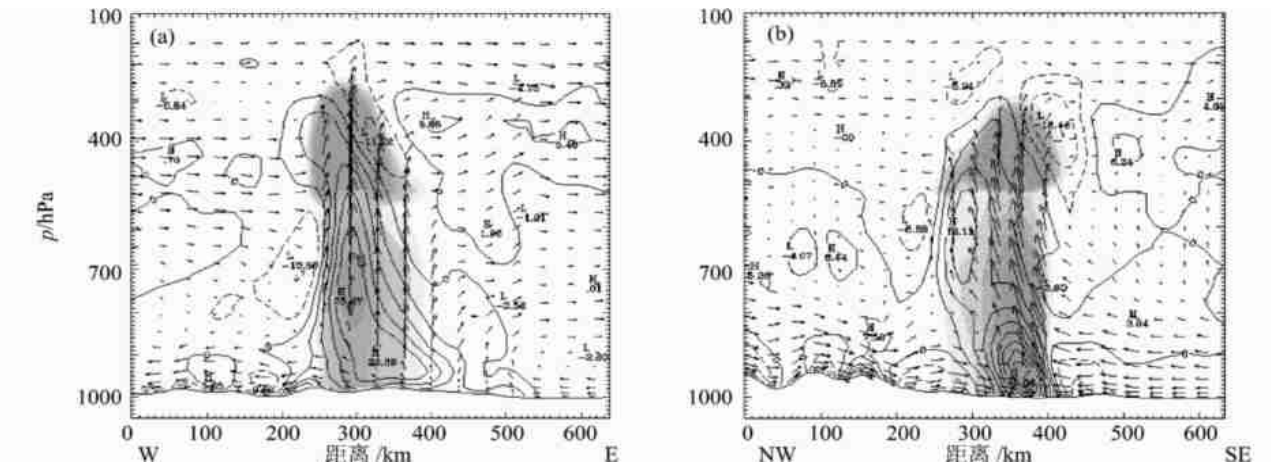


图 4 23 日 17 时沿图 3 (a) $\overline{BB'}$ 线 (a) 和 24 日 03 时沿图 3 (c) $\overline{CC'}$ 线 (b) 的垂直剖面图
(等相对涡度线间隔: $5 \times 10^{-5} s^{-1}$, 阴影区为 MCS 中雨水含量 $> 0.4 g/kg$ 的区域)

Fig. 4 Vertical cross sections along line $\overline{BB'}$ in Fig. 3 (a) for 0017 UTC 23 May (a) and along line $\overline{CC'}$ in Fig. 3 (c) for 0003 UTC 24 May 1998 (b)

风 (图略)。冷空气的南下, 使 MCS-C 底部逐渐变冷, 不言而喻, 这样一来 MCS-C 的气柱逐渐从不稳定向稳定发展, 最后随着冷空气进一步向南发展而消亡。MCS-B 的情况与此相似, 由于篇幅所限, 我们没有给出与 MCS-B 相应的南北向剖面图。实测资料分析表明模式对冷、暖空气这一活动特征的模拟是合理的, 观测资料反映的情况 (图略) 与我们的模拟结果相似。

(2) MCS 发生发展过程中上升运动都非常强, 最大的辐散高度位于 400 hPa 左右。图 4 清楚的表明, 两个 MCS 发生发展过程中, 上升运动都非常强, 有意思的是, MCS-B 的上升运动基本上是垂直向上的, 其前进方向的后方为弱的反环流, 有下沉运动区, 而 MCS-C 中的垂直运动呈倾斜上升, 后部没有明显的下沉气流, 这些现象值得进一步研究。MCS 发展强盛时最大的上升运动达 90 cm/s 以上, 但最大的辐散高度并不很高, 分析表明发展强盛期 400 hPa 上 MCS-B 和 MCS-C 的中心附近都有一个很强的辐散中心, 特别是 MCS-C, 气流从其中心向四方辐散 (图 5(b))。需强调的是 400 hPa 是辐散中心所在地, 到了 300 hPa 辐散的强度就减弱了很多。

(3) MCS 右侧低层有中尺度低空急流, 高空有强的西南风区。在发展初期, 两个 MCS 的右侧就都出现了中尺度的低空急流 (mLLJ), 最大风速可达到 10 m/s 以上。到 MCS 发展盛期, MCS 的范围最大、mLLJ 的风速也最强。这一特征 MCS-C 表现更为明显, 图 5 (a) 给出的是 24 日 05 时的流线和全风速图, 可以清楚地看到 MCS-C 右侧的 mLLJ, 偏南风的中尺度低空急流对暴雨和 MCS 的形成非常有利。边界层低空急流在华南暴雨过程中

的重要性早已被人们注意到^[8,9], 王洪庆等^[10] 在成功地模拟出华南梅雨锋上 MCS 的活动后, 也曾强调指出 mLLJ 作为 MCS 对流层低层的流入通道, 对暴雨区强烈水汽辐合起很大的作用。

由于 MCS 附近的热成风也是西南风, 所以其右侧上空的西南风大风区向上扩展, 在垂直方向上很难把 mLLJ 和它上空的西南大风区划分开来。这样的大风区一直可向上扩展到 400 hPa 以上 (图 5(b)), 但再向上减弱很快, 到 300 hPa 便不复存在了。

(4) MCS 发展期间, 在垂直方向上表现为一个气旋性涡柱。MCS 是在边界层内的涡旋中发展起来的, 所以边界层的涡度很大。由于上升运动很强, 涡度的上传也很明显。从图 4 可以看出, 垂直方向上两个 MCS 的正涡度区向上伸展, 呈柱状分布。

4 结 语

卫星云图和降水资料表明 1998 年 5 月 23—24 日华南前汛期的暴雨过程由多个相继生消的 MCS 造成的。MM5 成功地模拟出了其中两个主要的 MCS, 分析结果表明这两个 MCS 的发生发展主要有以下几个特点: ①这两个 MCS 的发生发展是冷暖空气交汇的结果, 但 MCS 生成于暖空气消亡于冷空气中; ②MCS 发生发展过程中上升运动都非常强, 最大的辐散高度位于 400 hPa 左右; ③MCS 右侧低层有中尺度低空急流 (mLLJ), 高空有强的西南风区; ④MCS 发展期间, 在垂直方向上表现为一个气旋性涡柱。

是否华南前汛期暴雨过程中的 MCS 都有类似的特点, 还需通过对更多个例进行分析和模拟试验来证明。

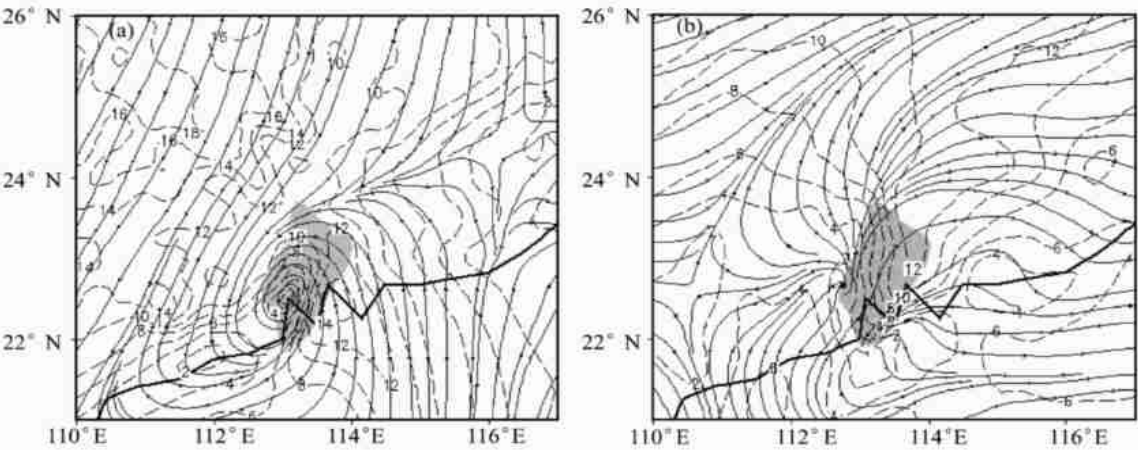


图 5 24 日 05 时 850 hPa (a) 和 400 hPa (b) 流线和全风速图
(全风速等值线间隔: 2 m/s 阴影区为每小时雨量 $> 10\text{ mm}$ 的区域)

Fig 5 Streamlines and wind speed (every 2 m/s) for 850 hPa (a) and 400 hPa (b) at 0005 UTC 24 May 1998

参考文献：

[1] 薛纪善. 1994 年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999.

[2] 王立琨, 郑永光, 王洪庆, 等. 华南暴雨试验过程的环境场和云团特征的初步分析[J]. 气象学报, 2001, 59 (1): 115—119.

[3] 王鹏云, 阮征, 康红文. 华南暴雨中云物理过程的数值模拟[J]. 应用气象学报, 2002, 13 (1): 78—87.

[4] 仪清菊, 刘品, 王明志. 1998 年华南暴雨试验期暴雨过程概述[J]. 气象科技, 1999 (3): 33—39.

[5] ZHANG D L, FRITSCH J M. Numerical simulation of meso-scale structure and evolution of 1977 Johnstown flood. (I) Model description and verification[J]. J Atmos Sci, 1987, 43: 1913—1943.

[6] CHEN S J, KUO Y H, WANG W, et al. A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei—Yu front[J]. Mon Wea Rev, 1998, 126: 2330—2351.

[7] 张玉玲. 中尺度大气动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 317.

[8] 李建辉. 华南初夏的超低空急流及其对暴雨的影响[J]. 气象学报, 1982, 40 (3): 319—325.

[9] 梁志和. 边界层对“94.6”广西特大暴雨的作用 // 1994 年华南特大暴雨洪涝学术研讨会论文集[C]. 1996: 81—86.

[10] 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟[J]. 科学通报 (简报), 2000, 45 (18): 1988—1992.

Multi-MCSs (Mesoscale Convective Systems) over the Heavy Rainfall Region
During 23—24 May 1998 in South China

MENG Wei-guang¹, WANG An-yu¹, LI Jiang-nan¹, FONG Soi-kun^{1,2}, LIANG Jia-jing²
(1. Department of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Geophysical and Meteorological Observatory Macao, Macao, China)

Abstract: Multi-MCSs (mesoscale convective systems) associated with a heavy rainfall during 23—24 May 1998 in South China have been examined by using satellite images and precipitation data. It is found that the development of these MCSs was associated with the initiation and evolution of several cloud clusters during this period. Using numerical modeling system MM5, the successive development of two MCSs was simulated.

Key words: satellite images; mesoscale convective system (MCS); mesoscale low level jet (mLLJ); numerical simulation