

华南暴雨中云物理过程的数值研究*

王鹏云 阮征 康红文

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

利用“海峡两岸及临近地区暴雨试验”(HUAMEX)取得的观测资料,使用高分辨非静力平衡中尺度数值模式 MM5 湿物理显式方案,模拟研究了 1998 年 5 月 23~24 日自粤北移向南海海岸的冷锋及锋前对流云团造成的华南暴雨中的云物理过程。结果表明,由于对流形成的具有冰相参加的冷云过程是华南暴雨形成发展的主要云物理过程,当对流较弱因而只有水相而无冰相的暖云过程只造成范围虽大但强度较弱的降水。

关键词:华南暴雨 MM5 冷云过程

引 言

在一定动力热力条件下形成的中尺度强暴雨通过其内部成云致雨的云物理过程得以实现。云物理过程对环境的动力热力过程又有不可忽视的反馈作用,如水成物相态变化释放(吸收)的潜热对热力过程的影响;液态和固态水下落的拖曳对动力过程的影响等。因此,对暴雨系统中云物理过程及其与动力热力过程的相互作用的研究是研究中尺度暴雨发生发展机理、建立暴雨系统中尺度物理模型的重要组成部分。

从 20 世纪 70 年代起,在北美和欧洲一些先进国家通过一系列大型外场观测试验,如美国的“CYCLES”、“SESAME”、“STORM FEST”,英国的“FRONTIERS”等,收集的加密地面和探空观测、飞机观测、雷达等遥感观测资料分析,并与高分辨数值模式研究相结合,对发生在北美和欧洲中高纬度地区的中尺度暴雨系统中的云物理过程及其与动力热力过程的相互作用进行了研究,建立了一些物理模型(如 Browning, Hobbs,)^[1,2],这些结果中有些还突破了传统天气模型的概念(如 Hobbs et al.)^[3]。我国以往对中尺度暴雨机理的研究主要着眼于对动力热力条件的资料分析和数值研究(如黄土松,余志豪等,赵思雄,丁一汇,崔波等)^[4~8],对云物理过程的观测和数值研究主要限于积云尺度的对流风暴,而对于造成区域范围的中尺度暴雨系统中的云物理过程及其与动力热力过程的相互作用的研究还很少。

1998 年 5~6 月在广东、福建完成的“海峡两岸及临近地区暴雨试验”(HUAMEX)的加密观测,为深入研究华南暴雨形成和发展机理提供了丰富的资料,而含有对湿物理过程显式方案的高分辨非静力平衡中尺度数值模式 MM5 则为模拟研究华南暴雨中尺度云物

* 资助项目:中国暴雨试验研究 G1998040907 攀登专项 95-专-03 国家自然科学基金项目 49735180。

2000-04-18 收到,2000-06-13 收到修改稿。

理过程提供了手段。本文即是用 MM5 模拟研究 HUAMEX 一个加密观测(IOP)个例中云物理过程得到的主要结果。

1 模式和试验方案

1998 年 5 月 23 ~ 24 日华南暴雨过程是 HUAMEX 加密观测主要个例之一。这次暴雨过程由强冷空气南下而产生,地面冷锋 23 日 14:00(北京时,下同)进入广东,24 日 08:00 到达武夷山至北部湾沿岸一线。在冷锋南下过程中,在珠江口以西和沿海形成对流云团。在 23 日 08:00 卫星红外云图上可见该冷锋带云系和在珠江口以西正在发展的对流云团,23 日 14:00 至 24 日 02:00 该对流云团占据着珠江口以西地区,到 24 日 08:00 以后南移入海。伴随冷锋南下和对流云团的发展,23 日下午到夜间,珠江口以西沿海地区出现了大暴雨,四会、南海、新会、中山、珠海站的日雨量分别达 236.3、119.9、161.6、286.7、202.3 mm(图 1a)。因此,这次暴雨属于冷锋前的暖区暴雨,是有别于江淮流域梅雨锋暴雨的华南前汛期暴雨的一类重要暴雨过程。

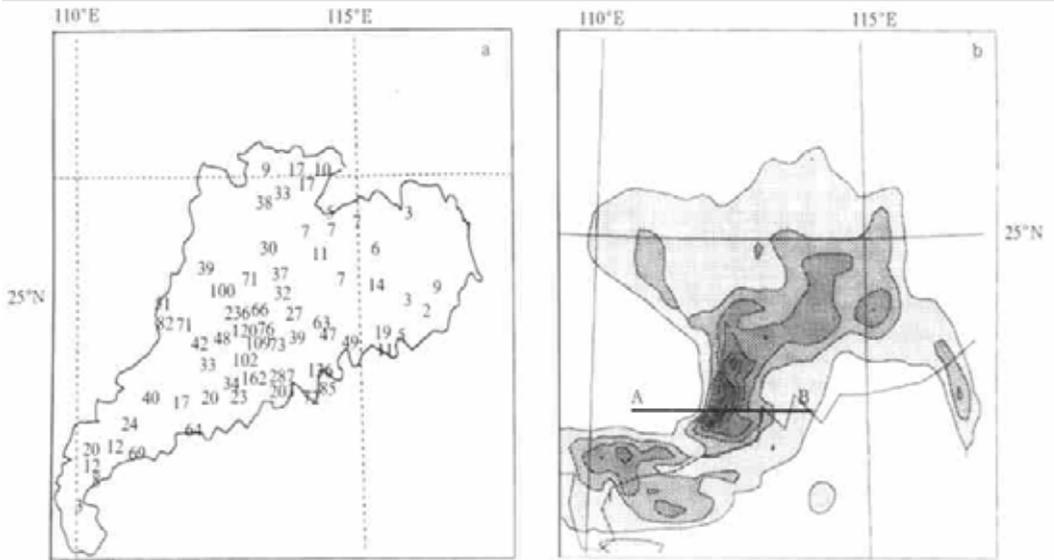


图 1 (a)1998 年 5 月 23 日 20:00 ~ 24 日 20:00 广东省降水量(单位 mm)

(b) 模式预报的中网格区域 24 h 降水量(等值线间隔 20 mm)

本文使用美国 PSU/NCAR 非静力平衡中尺度数值模式 MM5(V2)^[9]。初始场用国家气象中心全球模式 T106 分析场格点资料,用 16 点复合相关双抛物拟合法插值到模式的正方形网格点上,构成初估场,再引入实际地面及高空观测资料对初估场进行订正,其中高空资料包括探空(规定等压面和特性层)及测风资料。侧边界用时变出入流方案。用张弛逼近法将模式预报场向由间隔 12 h 客观分析的大尺度场逼近。在 HUAMEX 试验的加强观测期间,广东的连平、清远、汕头、阳江 4 站一天有 4 次探空,但如何将这加密的资料同化到模式尚在研究之中,本个例模拟中还未加入,仍用一天 2 次的探空资料,这可能影响到初值和侧边界值中尺度信息的引入。

模式网格用3层嵌套网格,最外层格距45 km,水平格点数 61×61 ;第二层格距15 km,水平格点数 61×61 ;最内层格距5 km,水平格点数 73×73 。网格中心点最外层取在 $114^\circ\text{E } 25^\circ\text{N}$;第二层 $113.1^\circ\text{E } 24.2^\circ\text{N}$,最内层 $111.9^\circ\text{E } 22.5^\circ\text{N}$ (图2a)。网格点范围覆盖了主要降水区。地形资料,按3层网格格距大小,分别用精度为经纬度 $30'$ 、 $10'$ 和 $5'$ 的实际地形资料。

地表植被资料用HUAMEX试验期间取得的NOAA卫星资料反演得到我国及邻近地区($74^\circ \sim 135.44^\circ\text{E}$, $12^\circ \sim 56.88^\circ\text{N}$)精度为 0.08° 的地表植被分布,及各类型地表植被的物理参数:反照率、土壤湿度、比辐射率、粗糙度和热惯量。与美国NCAR植被资料比较,它们更能代表我国陆域内的复杂植被类型^[10]。图2b给出我们所用的植被分布中含有农耕区(2);亚热带灌木(5),阔叶林(9),针叶林(10);针阔混合林(13)等多种植被,与我国近3年的百万分之一土地利用图比较校验,植被分布在秦岭、淮河以北完全一致,南方基本一致(南方植被复杂,存在混合系统);而用NCAR植被资料在此网格范围的陆上植被只有松柏树、热带亚热带林和少量的热带亚热带草原。

对所有3层网格尺度的显式云物理参数化方案均选用了含有水、冰相的Reisner霏方案^[11]。次网格尺度积云对流参数化方案的实用范围与格距有一定关系,所以我们采用了几种参数化方案:格距45 km的粗网格用Anthes-Kuo方案;格距15 km的中网格用Kain-Fritsch方案;格距5 km的细网格仅用显式方案,不再加入对流参数化方案。

模拟结果每小时输出一次,用5-D可视化系统观察和分析云中各相态水成物分布与

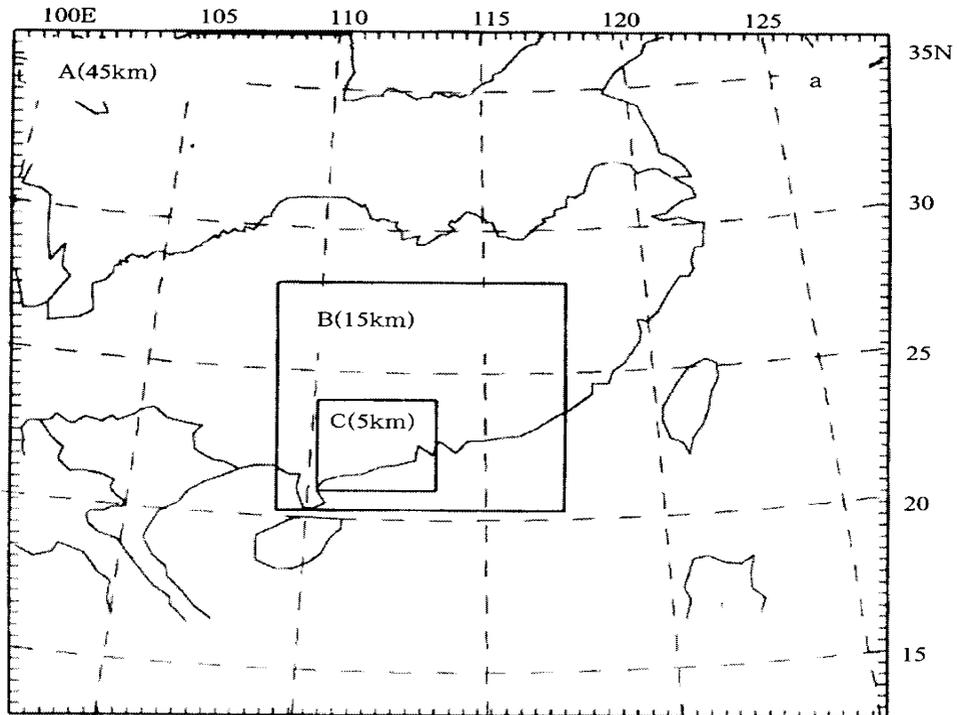
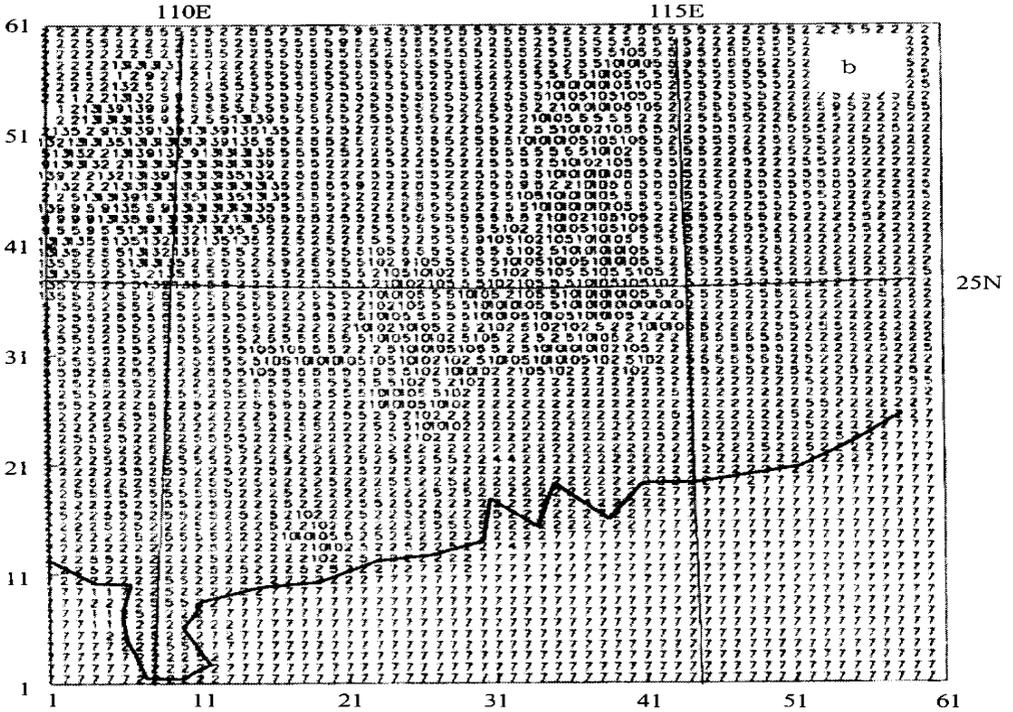


图2 (a)模拟网域设置 (b)中网格地表植被分布

(数字代表:(2)农耕区,(5)亚热带灌木,(7)水,(9)阔叶林,(10)针叶林,(13)针阔混合林)



续图 2

演变及其与流场、热力场的相互配置。

2 预报降水与实况比较

(1) 24 h 降水量预报 图 1b 为模式预报的中网格区域 24 h 降水量分布。与实况比较,模拟雨带走向与实况(图 1a)接近,但位置略偏西,3 个网域预报的最大降水中心分别

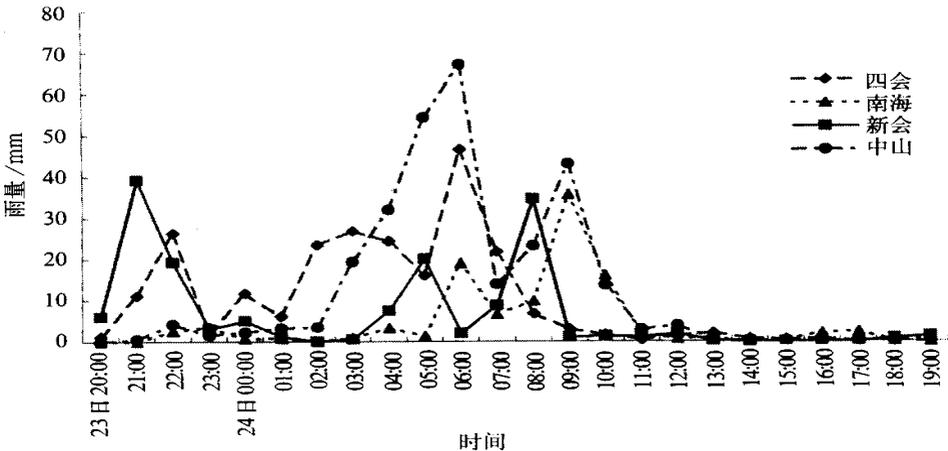


图 3 四会、南海、新会、中山站逐时雨量分布

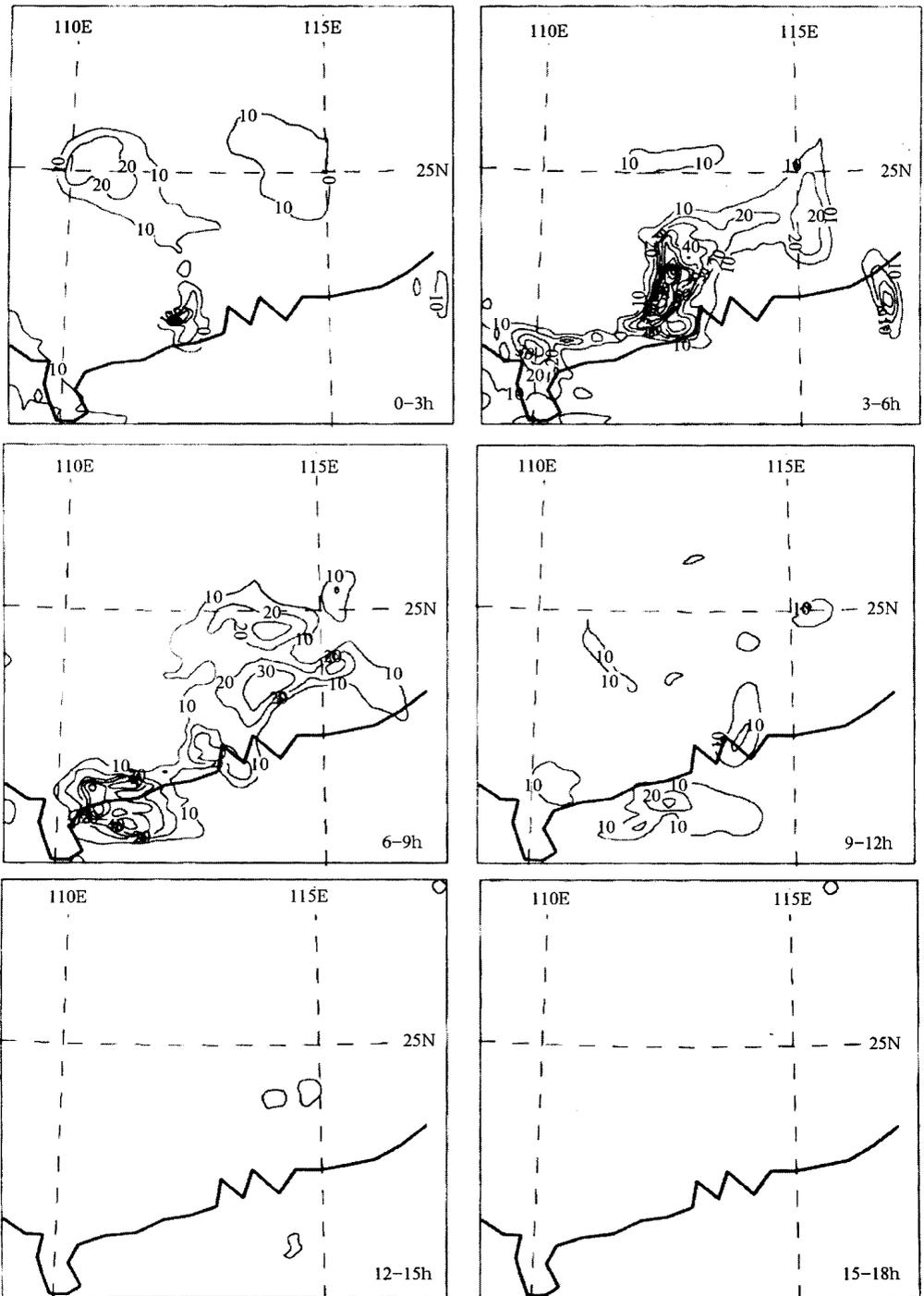


图 4(a) 模式预报中网格区域每 3 h 降水量(等值线间隔 10 mm)

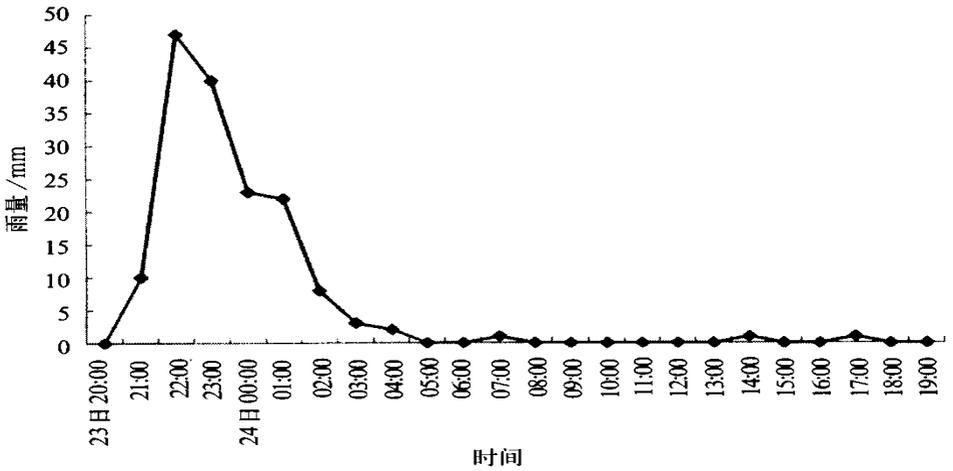


图 4(b) 模拟最大降水中心逐时雨量分布

为 135 mm, 158 mm 和 172 mm。5 km 细网格模拟不但较好地预报了最大降水量, 且表现出与实况相似的、更细致的多中心中尺度结构(图略)。

(2) 降水量的时段分布 卫星云图显示, 造成珠江口以西地区的降水云团 24 日 08:00 以后南移入海(图略), 因此主要降水发生在 23 日夜间到 24 日上午, 图 3 给出的在降水中心范围 4 个站逐时降水量分布也表明了这种趋势。与之相比较, 模拟的 23 日 20:00 至 24 日 20:00 每 3 h 时段降水量(图 4a) 也集中在前 15 h, 因而模拟降水时间趋势与实况基本吻合, 但从模拟的最大降水中心降水量逐时变化(图 4b) 来看, 模拟降水比实况提前 3~5 h。4 站实测降水和模拟最大降水中心的逐时变化均反映出这次降水集中在很短时段, 同时在相邻站点间降水量差异也很大(见图 1a), 说明这次降水性质以对流性降水为主。

(3) 云顶高度 图 5 给出中网格模拟的 5 月 24 日 00:00 云水、冰晶、雪、霰、雨水混合比延图 1b 通过最大降水中心的 AB 线段向上所作的垂直剖面, 图中雨水的顶高达到 400 hPa, 在其上方为云水、霰、雪的高值区, 高度在 300~400 hPa(相应于 8~10 km)。这与香港 10 公分多普勒雷达在同时间观测的回波顶高 8~10 km 基本一致。

通过上述比较, 总的来看, 模拟降水较好地反映了这次暴雨实况。但在降水时空分布的细致结构上还不能与实况完全相符。例如, 珠海站的降水中心(202 mm) 就未模拟出来; 在降水时段上模拟比实况提前, 这与本次降水为尺度较小的中尺度对流性降水, 但初值和侧边界值资料较粗而加密观测资料尚未同化进去有关。

3 云物理过程及其与动力热力过程的相互作用

形成降水的云物理过程基本可分为二类: 暖云过程和冷云过程。暖云过程, 云中以水相为主, 成云致雨主要由水汽凝结和大小云滴之间的碰并增长形成; 冷云过程, 云中除水相外, 还有冰相的作用, 由于贝吉龙冰水转化过程, 冰相粒子(霰、雹、雪)间的聚并以及与

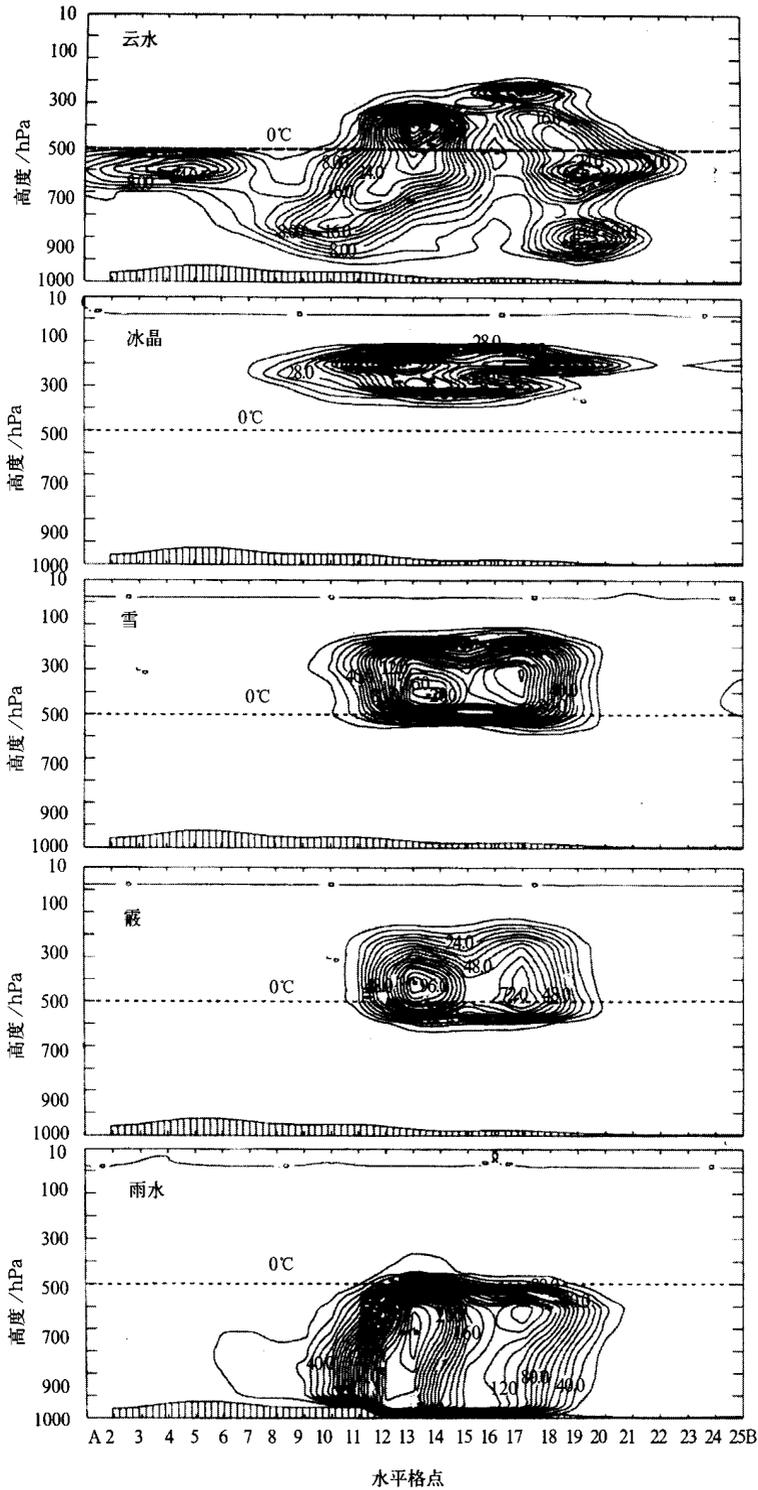


图 5 通过图 1(b) 中 AB 线段的云水、冰晶、雪、霰和雨水的混合比垂直剖面(图中等值线单位 10^{-5}kg/kg)

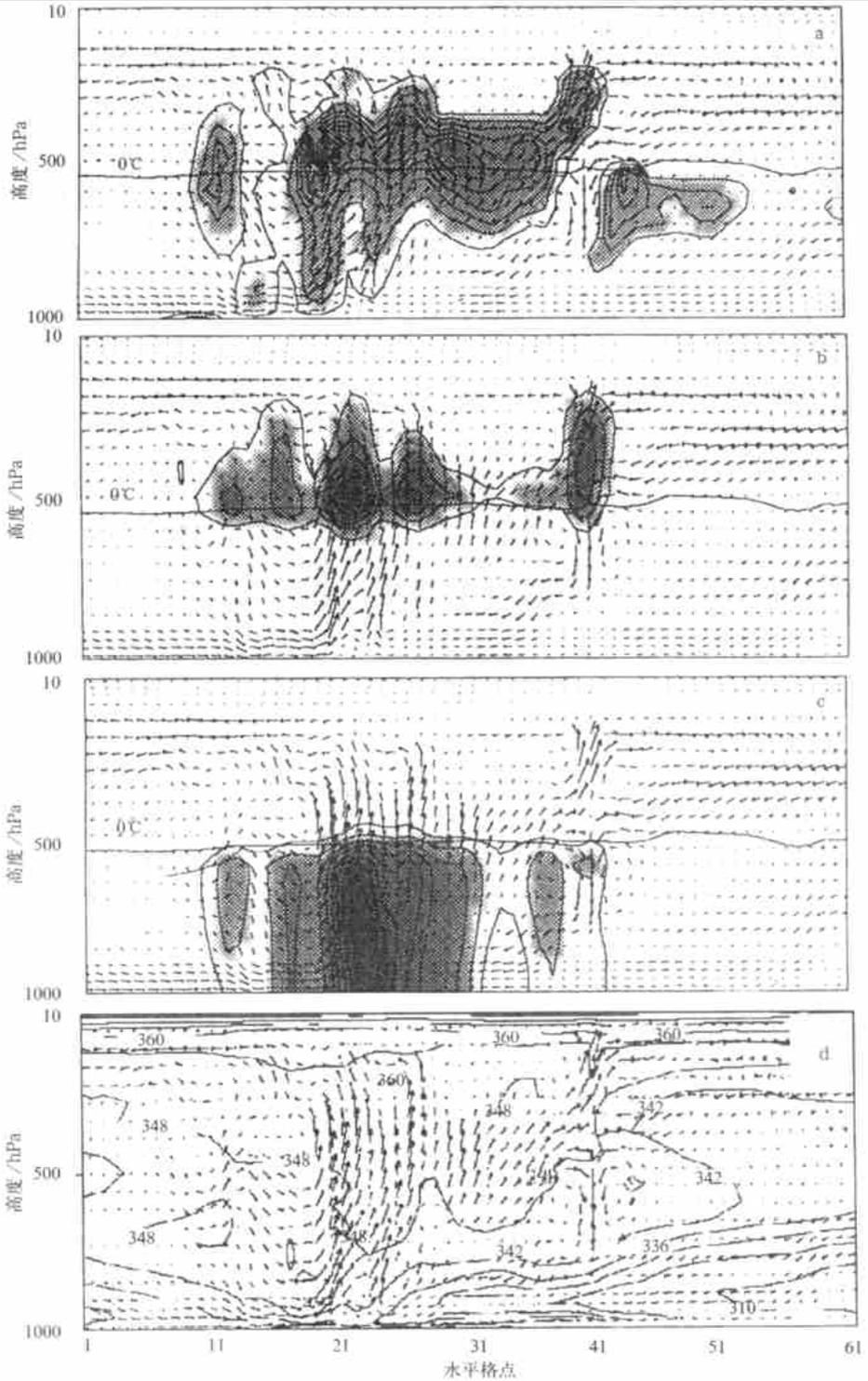


图 6 5-D 可视化系统显示的 1998 年 5 月 24 日 01 :00 通过雨区的南北方向垂直剖面 (图中等值线和阴影部分分别为 :a.云水;b.霰;c.雨水;d. θ_e 。纵坐标为气压,自 1000 hPa 向上到 10 hPa,共 25 层)

云雨粒子的撞冻形成降水。实际大气中这二种过程也会同时存在。何观芳和胡志晋^[12]、洪延超^[13]等对中国不同地域和特点的强对流云的模拟研究表明,初始降水元主要由云雨自动转化形成,一旦冰相粒子(霰、雹等)出现,它们和云、雨滴碰冻而迅速长大,待其落入暖区则融化成雨水,因而在过冷水与冰相共存的对流云中由于冰相的加入而使地面降水量大大增加。

由图 5,在降水中心上方,液态的云水从地面上方 950 hPa 一直伸展到 300 hPa 左右。零度线位于 500 hPa,在零度线上方仍有过冷的云水;在云水上方,从 350 hPa 至 100 hPa 为冰晶构成的冰云;固态的雪和霰存在于 550 ~ 200 hPa 高度,其中在零度线下方的正温度区(500 ~ 550 hPa)为尚未融化的部分。可见,在 550 hPa 至 300 hPa 高度范围既有液态的云水,又有固态的雪和霰。在此冰、水相共存区由于贝吉龙过程以及由于对流(上升气流速度最大值为 1.7 m/s)造成的霰、雪的碰并和与过冷云、雨水的撞冻,使得霰和雪的比水含量迅速增加,在零度层上方附近均达到其最大值(分别为 1.08 g/kg 和 2.16 g/kg)。霰和雪在零度层下融化后形成融化带下方的雨水最大值(2.79 g/kg),由此形成了地面降水。可见本次降水过程,虽然对流远不及何观芳和胡志晋等模拟的冰雹云强(上升气流速度达 10 ~ 20 m/s),但有冰相参加的冷云过程也对降水形成起主导作用。而在其它只有液态云水而无冰相的部分则只有弱降水。

用 5-D 可视化系统显示的云水、雨水、冰晶、雪和霰的三维空间分布和随时间演变动画可清楚地看到,初期只有液态的云水时还无雨水,只有当冰相开始发展时雨水才产生,之后在云水和冰水共存的部位也是下面雨水最大的部位,最大雨水随着这个‘共存部位’的移动而移动。冰相变弱乃至消失后雨水也跟着消失。图 6 给出动画中的一幅。

图 6 中还给出与云和降水同一部位的气流及 θ_e 的垂直剖面。源于近地面层的辐合形成较强的垂直气流,与之相应的是上面冰水混存及其下方雨水的形成。相比之下,在雨水区间隙处,由对流层中层弱辐合形成的垂直气流较弱,虽也有大片的云水,但无冰相,雨水很少或几乎没有。图中 θ_e 的等值线表明,在无降水的弱对流区层结稳定($\partial \theta_e / \partial z > 0$)而在有降水的强对流区层结为中性或不稳定($\partial \theta_e / \partial z \leq 0$)。

作者还对 1998 年 5 月 23 日 08:00 ~ 24 日 08:00 时段作了模拟,并用了几种不同的湿物理过程显式方案(如 Reissner 霰方案,Reissner 混合冰相方案,Goddard 微物理方案)和次网格尺度对流参数化方案(如 Anthes-Kuo 方案,Grell 方案,Kain-Fritsch 方案)进行了分组试验,用 5-D 可视化系统显示研究,均得到与上述类似的结果。

4 小 结

用含有对湿物理过程显式方案的高分辨非静力平衡中尺度数值模式 MM5,模拟研究 1998 年“海峡两岸及临近地区暴雨试验”(HUAMEX)一次加强观测(IOP)的华南暴雨两个例中云物理过程,用 5-D 可视化系统观察分析各种相态的云物理结构和流场、热力场的三维空间分布和随时间的演变。发现,由对流形成的具有汽、水、冰三相混合作用的冷云过程是华南暴雨形成发展的主要云物理过程。当对流较弱因而只有液相云水而无冰相加入时,只有范围虽大但强度较弱的降水。

参 考 文 献

- 1 Browning K A. Conceptual models of precipitation systems. *Weather and forecasting*, 1986, (1) :23 ~ 41 .
- 2 Hobbs P V. Organization and structure of clouds and precipitation on the mesoscale and microscale in cyclonic storms. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1978, **16**: 741 ~ 755 .
- 3 Hobbs P V, et al. A new conceptual model for topographically altered cyclones in the central United States. *Proceedings of sixth conference on mesoscale processes*. 17-22 July 1994, Portland, Oregon, USA. 213 ~ 214 .
- 4 黄土松. 华南前汛期暴雨. 广州: 广东科技出版社, 1986. 244 .
- 5 余志豪, 陆汉城. 梅雨锋暴雨的中尺度雨带和雨峰团. *中国科学 B 辑*, 1988, **9**: 1002 ~ 1010 .
- 6 赵思雄. 用 10 层准拉格朗日有限区域模式对高原东侧锋生过程的数值模拟. *大气科学*, 1991, **15**(3) : 40 ~ 49 .
- 7 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993 .
- 8 崔波, 李泽椿, 等. 对北京地区一次局地灾害性暴雨的数值模拟分析. *暴雨·灾害*, 1998, (1) : 79 ~ 88 .
- 9 Grell G A. A description of the fifth-generation Penn State/ NCAR mesoscale model (MM5) . NCAR/ TN-398 + STR NCAR technical note, 1994. 138 .
- 10 王鹏云, 肖乾广, 林永辉, 等. 卫星遥感地表植被及其在华南暴雨中尺度数值模拟中的应用试验. *应用气象学报*, 2001, **12**(3) : 287 ~ 296 .
- 11 Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. Explicit forecast of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1998, **124**: 1071 ~ 1107 .
- 12 何观芳, 胡志晋. 不同云底温度霰云成霰机制及其引晶催化的数值研究. *气象学报*, 1998, **56**(1) : 31 ~ 45 .
- 13 洪延超. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究. *气象学报*, 1999, **57**(1) : 30 ~ 44 .

NUMERICAL STUDY ON CLOUD PHYSICAL PROCESSES OF HEAVY RAINFALL IN SOUTH CHINA

Wang Pengyun Ruan Zheng Kang Hongwen

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The heavy rainfall IOP case of the HUAMEX project during 23 - 24 May 1998 is simulated by using the non-hydrostatic meso-scale model MM5 (V2) . Results show that the cold cloud process in which ice phase is coexisted with super-cooled liquid phase of cloud water plays the most important role in the formation and development of convective heavy rainfall in South China. The warm process (condensation and aggregation of liquid droplets) for the formation and development of rains in South China may play a role only for the non-convective precipitation with larger scale but not very strong intensity .

Key words: Heavy rainfall in South China MM5 Cold cloud process