

2001 年 8 月初上海强暴雨中尺度对流系统的数值模拟研究*

林永辉

(中国气象科学研究院灾害天气研究中心, 北京, 100081)

布和朝鲁

(LASG, 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

利用 NCEP 的 ETA 模式对 2001 年 8 月 5~6 日导致上海地区产生大暴雨的中尺度对流系统的发生发展过程进行了数值模拟。模拟结果基本再现了对流云团加强合并形成中尺度对流系统的过程, 所模拟的降水分布、最大降水中心位置与实测结果基本一致。模拟结果还显示其中的一个中尺度对流系统是由于位于其西南部的一支低空急流的直接流入才发展起来的。

关键词: 中尺度对流系统, 暴雨, 数值模拟。

1 引 言

越来越多的观测资料表明, 大暴雨通常是由一系列连续发展的中尺度对流系统 (MCS) 造成的。MCS 的产生不仅要求大气有位势不稳定层结, 而且还需要诸如重力波、冷锋、地形、低空急流或海陆风等的触发才可能发生发展起来^[1]。大气热力、动力及水汽等条件的差异使有些 MCS 产生后很快消亡, 而有些 MCS 产生后却不断发展; 有些 MCS 的发生发展能带来大暴雨, 而有些 MCS 仅能带来少量降水。研究 MCS 持续发展的机理, 不仅是科学研究的目标, 而且更是现实的需要。

常规的观测资料由于时间和空间的分辨率较低, 难以捕捉和分辨 MCS 的发生发展。雷达和卫星的非常规观测虽然能获取一些中尺度信息, 但据目前的技术条件和认识水平, 要想依靠这些资料来揭示 MCS 的发生发展及形成机理仍然是一件非常困难的事。中尺度数值模式较高的时空分辨率输出结果较为适合研究了解 MCS 的发生发展及形成机理, 虽然目前的中尺度数值模式还存在各种各样的问题, 但模式结果如辅之于一些较为精确的观测资料来研究 MCS 结构的演变及形成机制仍不失为一

种行之有效的办法。

最近十多年来, 国际上利用中尺度数值模式对 MCS 的结构及演变已进行过一些模拟研究^[2~5], 中国在这方面也做过不少的研究^[6~15], 并且国内研究者还针对地形的作用、模式分辨率的影响及非绝热加热等过程在模式中的作用进行了大量的敏感性试验。陈受钧和张庆红等^[6,7,14]更是借助 MM5 的模拟结果对梅雨锋上 MCS 的结构、演变进行了非常详细的分析。但这些研究多集中于梅雨锋上的 MCS, 而对于非梅雨锋上的中尺度对流系统则研究较少。

2 模式简介及方案设计

ETA 模式是一个地形呈阶梯状分布的有限区域静力原始方程格点模式^[16]。垂直方向采用 η 坐标, 避免了陡峭地形下等 σ 面过于倾斜的缺点, 减少了地形坡度引起的虚假水平气压梯度力效应, 这是该模式的一大特点。湿过程用的是显式水汽方案^[17]及 Betts 积云参数化方案, 行星边界层和湍流过程采用 Mellor 和 Yamada 方案, 地面温度由能量守恒方程计算得到, 辐射过程为 GFDL 的简单辐射冷却方案。该模式作为 NCEP 的中尺度业务模式已运行多年, 模式的稳定性和各方面性能已经过严格的检验。

* 初稿时间: 2002 年 7 月 22 日; 修改稿时间: 2003 年 1 月 9 日。
资助课题: 科技部(G1998040907) 和国家攀登 95- 专- 03。

本次试验中,模式的格距取为 24 km,垂直方向为 16 层,初始场由中国国家气象中心 T106 客观分析场插值得到。模式从 2001 年 8 月 5 日 12 时(UTC 积分到 6 日 12 时共 24 h。

3 天气过程描述

2001 年 8 月 5~6 日上海普降特大暴雨,降水量创 50 a 来日降水量之最,中心点降水量达 280

mm。这次暴雨过程是由生成于东海南部的热带低压登陆造成的。8 月 3 日在东海南部生成的热带云团加强成为热带低压,该热带低压于 4 日凌晨在闽浙边界附近登陆后,随副热带高压(简称副高)南侧的偏东气流逐渐向偏西北方向移动,于 5 日到达皖南后突然转向偏东方向移动。受强大副高的影响,此系统在江苏南部和上海上空的移动较为缓慢,中尺度对流系统得以发展起来。

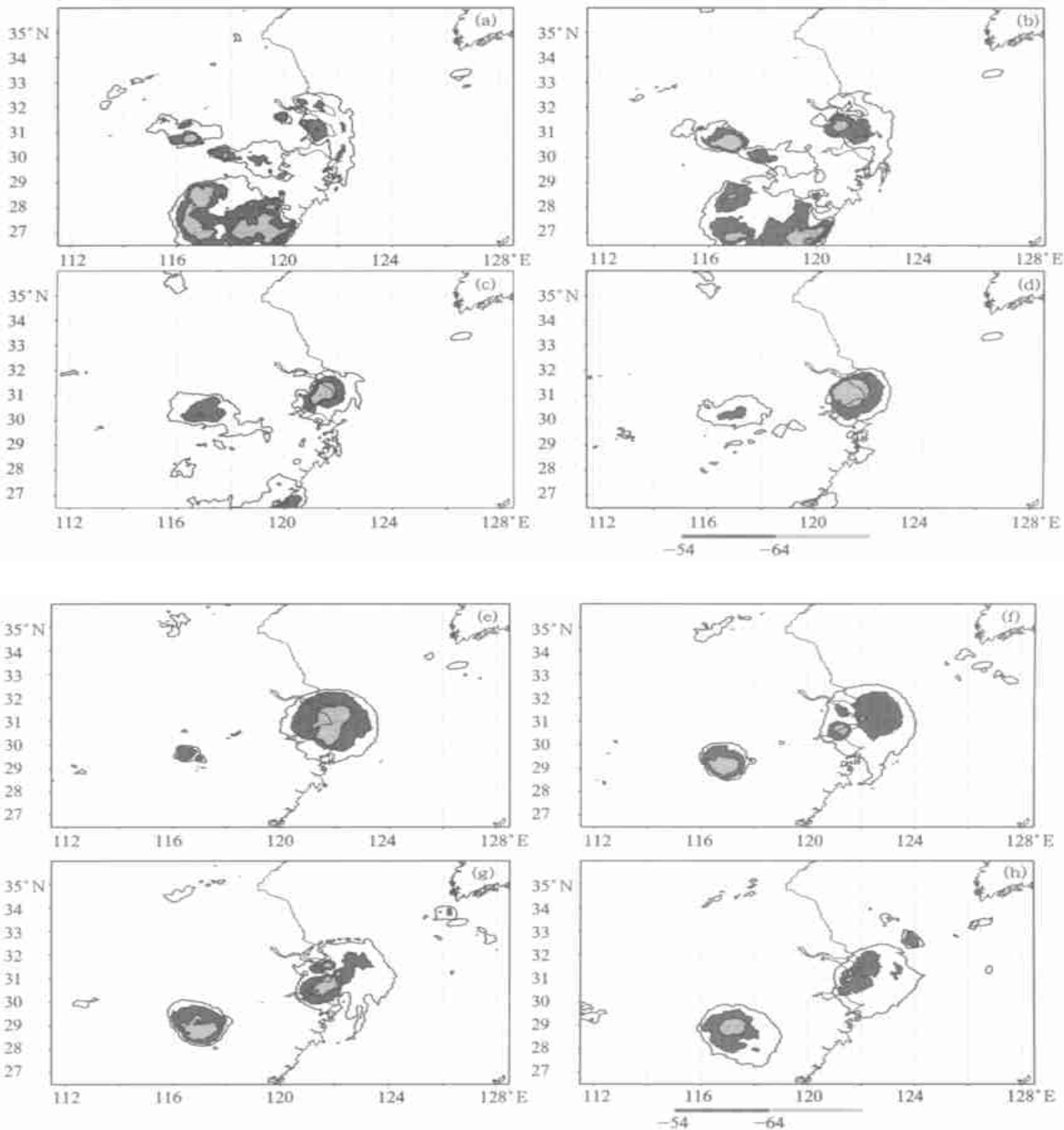


图 1 2001 年 8 月 5 日 11~24 时 GMS 红外云图的 TBB 分布

(a. 11 时, b. 12 时, c. 15 时, d. 16 时, e. 19 时, f. 20 时, g. 21 时, h. 6 日 00 时;

TBB 等值线从 -32 °C 开始, 灰色阴影区为 -54 °C 至 -64 °C, 黑色阴影区为小于 -64 °C

从高分辨率(0.06° × 0.06°)的GMS红外云图的云顶亮温(TBB)的演变情况来看,5日11时左右上海上空开始出现强对流云团(图1)。在随后的几小时里,该对流云团的范围不断扩大,至5日16时,此对流云团已完全覆盖上海及周边地区。在范围不断扩大的同时,对流云团的强度也不断加深,最终发展成为典型的MCS。5日19时左右,MCS偏离上海上空,逐渐向东海移去。此时,在杭州湾北部,一

个小对流云团又开始发展起来(5日20时,并迅速向东北方向延伸。但其强度、范围及持续时间都明显偏小,最终没有发展成为MCS。注意到,在这段时间里,江西景德镇附近的一个对流云团发展成为了MCS,但从观测结果看其带来的降水较小。

影响上海的中尺度对流云团移出大陆后,8月6日04时(图2,一个对流云团A于上海黄浦江口岸再度发展起来,1h后,云团A的覆盖范围沿上海

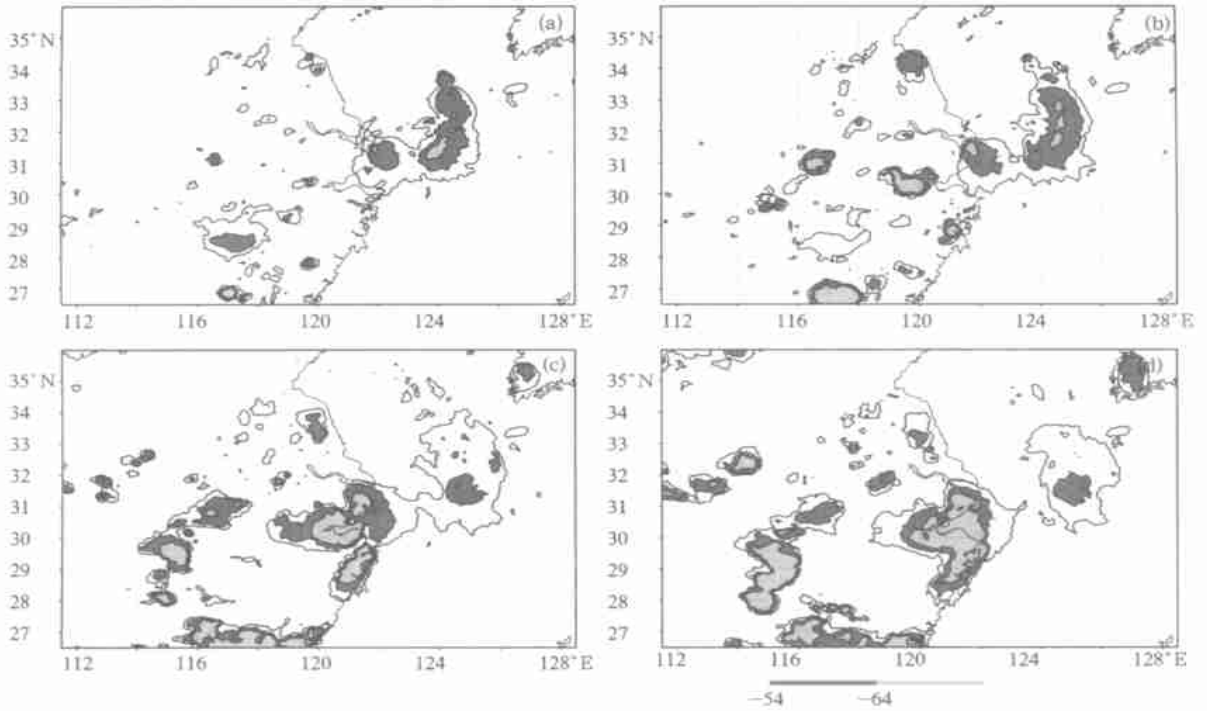


图2 2001年8月6日04,05,07,08时GMS红外云图的TBB分布
(小于-64°C a. 04时, b. 05时, c. 07时, d. 08时。
TBB等值线从-32°C开始,灰色阴影区为-54°C至-64°C,黑色阴影区为

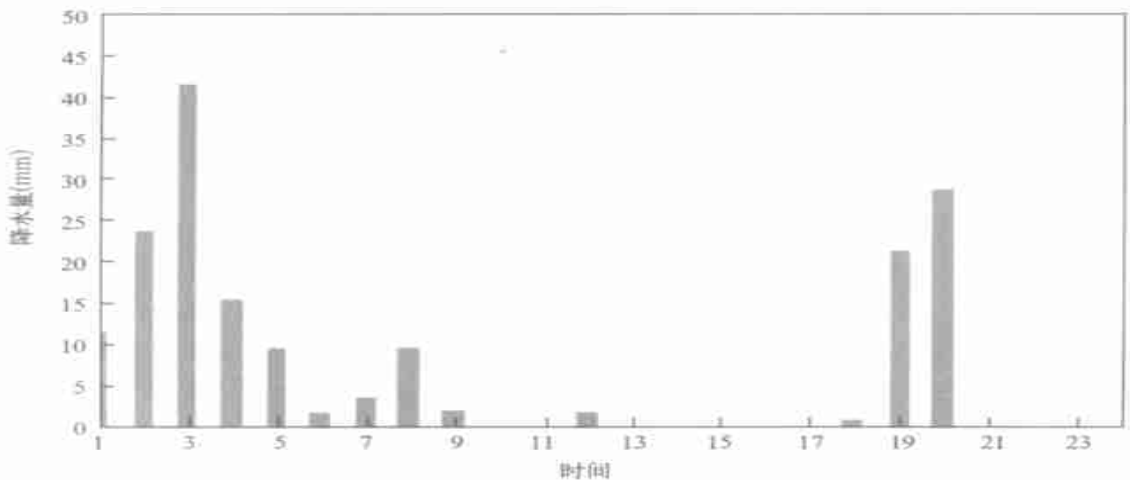


图3 上海一自动站(31.15°N,121.3°E)2001年8月
5日12时至6日12时逐时雨量演变

口岸不断扩大。与此同时, 有一快速发展的对流云团 B 出现在杭州湾西部并向东移动, 另有一对流云团 C 出现在浙江沿岸并向东北方向移动。3 个不断发展的对流云团于 08 时左右完全合并在一起, 并最终形成一个 MCS。相应地, 地面雨量站的逐时观测结果也充分反映出上海上空对流云团的演变特征。在对流云团从 8 月 5 日 11 时左右开始发展成为第一个 MCS 的过程中, 地面雨量站第一次观测到强降水 (图 3)。而那个未能发展成为 MCS 的对流云团仅带来了少量的降水。6 日 08 时左右, 当 3 个发展的对流云团合并形成另一个 MCS 时, 上海地面雨量站再一次观测到强降水 (图 3)。

综上所述, 上海这次特大暴雨过程是在稳定、强

大而少动的副高环流背景条件下, 由 MCS 的发展直接导致的。其大致可以分成两个阶段, 第一阶段的降水是由上海原地发展起来的 MCS 造成的; 第二阶段的降水是由上海原地重新发展起来的对流云团与其西边、南边发展起来的对流云团合并形成新的 MCS 造成的。

4 模拟结果分析

图 4a 是 8 月 5 日 12 时至 6 日 12 时常规站和自动站 24 h 的累积观测降水量。这次暴雨过程发生范围非常狭窄, 降水主要出现在上海市区, 上海周边地区 24 h 累积降水量大于 50 mm 的测站极少。模式积分 24 h 累积降水量 (图 4b 的分布, 最大降

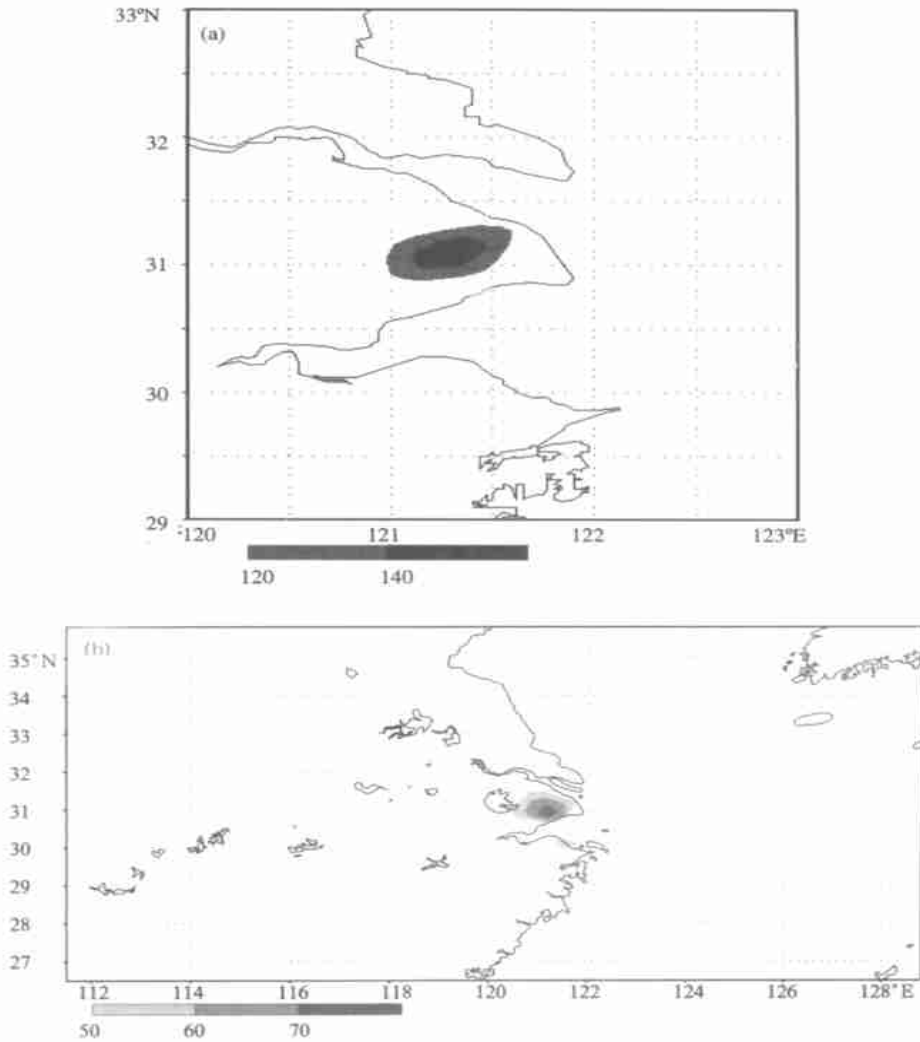


图 4 2001 年 8 月 5 日 12 时至 6 日 12 时 24 h 累积降水量

(a. 观测结果, b. 模拟结果; 单位: mm)

水中心的位置与观测结果基本一致。但最大降水中心的强度与观测结果相比偏小, 主要的原因可能是目前中尺度模式普遍存在的“旋转加强”(spin up)问题, 模式在积分的头几个小时里产生的降水很小, 而观测显示这次暴雨过程在第一阶段(即5日12时后面的几个小时)雨量就非常大。

比较直观地, 我们利用模式输出的总云量^[17]来分析模式中 MCS 的移动及演变。需要指出的是, 这里所说的总云量是模式诊断的高、中、低3种云的合成, 其值越大, 表明对流越旺盛。模式积分3 h

后, 在上海上空就出现了中尺度对流云团(图5, 此云团的分布与5日15时的TBB的分布(图1很相似。但与TBB所揭示的MCS的演变不同的是模式中此对流云团一直维持在上海的上空(见图6, 直到与来自西边的对流云团合并。

模式积分6 h后, 从总云量与850 hPa风场的迭加图上可以看出, 上海上空的中尺度对流云团仍然没有减弱, 但在太湖的西边出现了一中尺度对流云团(图6a)。1 h后, 太湖西边的对流云团开始减弱; 但注意到, 此时在黄山附近出现了一风速大于

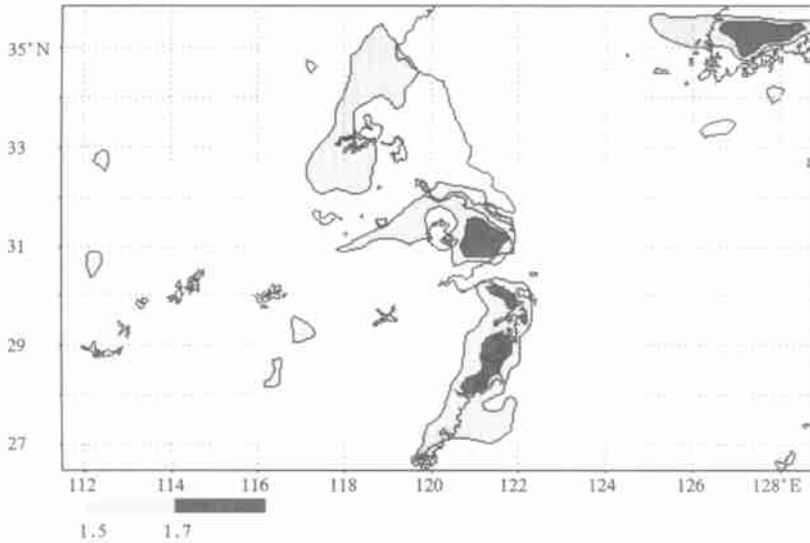


图5 模式输出的2001年8月5日15时的总云量

11 m/s的大风区(图6b)。此后不久, 大风区迅速加强成为低空急流并向北发展进入太湖西边的对流云团, 使得该对流云团迅速发展起来并向东移动(图6c, d)。最后, 向东移动的对流云团和原来位于上海上空的对流云团完全合并在一起(图6e, f), 形成MCS。这似乎与陈受钧等^[6-7]认为中尺度低空急流是与梅雨锋上的MCS相伴而生的结论不同, 模式中MCS是由于低空急流的直接流入才发展起来的。此急流向东的分支在杭州湾南部导致的对流云团(图6f)此时没有和这个MCS合并在一起, 它最终是和已进入衰减期的MCS合并在一起。

5 结论与讨论

2001年8月5~6日发生在上海的特大暴雨过程是在副热带高压稳定少动的环流背景条件下, 由生成于上海的MCS及从西边和南边移过来的对流云团和上海原地重新发展起来的对流云团合并形成

的MCS导致的。模式模拟结果基本再现了对流云团合并形成MCS的发展过程, 结果还显示第二个MCS是由于一中尺度低空急流的直接流入才发展起来的, 所模拟的降水分布、最大降水中心位置与实测结果基本一致。

但也需要指出的是, 模式所模拟的最大降水中心的强度与观测相比偏小; 生成于上海的MCS的减弱、东移入海的过程没有模拟出来; 此外, 第二个MCS加强发展的时间与观测结果存在差异。造成这种结果的原因, 一方面可能是由于目前模式在描述某些物理过程方面还存在不足; 另一方面, 模式所用初始场是大尺度的T106客观分析场资料, 其包含的中尺度信息非常有限。这些无疑是需要进一步改进及加强研究的。

致谢: 国家卫星气象中心朱小祥先生提供了GMS-TBB逐时资料, 中国气象科学研究院灾害天气中心的史历博士给予了有益建议, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 陶诗言,丁一汇,周晓平. 暴雨和强对流天气的研究. 大气科学, 1979, 3(2): 227~ 238
- 2 Zhang D L, Fritsch J M. Numerical simulation of meso- α -scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood, Part 1: Model description and verification. J Atmos Sci, 1986, 43: 1913~ 1943
- 3 Zhang D L, Fritsch J M. Numerical simulation of meso- α -scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood, Part 2: Inertially stable warm-core vortex and the mesoscale convective complex. J Atmos Sci, 1987, 44: 2593~ 2431
- 4 Nagata M, Ogura Y. A modeling case study of interaction between heavy precipitation and a LLJ over Japan in the Baiu season. Mon Wea Rev, 1991, 119: 1309~ 1336
- 5 Davidson N E, et al. Dynamics and prediction of a mesoscale extreme rain event in the Baiu front over Kyushu, Japan. Mon Wea Rev, 1998, 126: 1608~ 1629
- 6 Chen S J, et al. Mesoscale convective system over the Yellow sea—A numerical case study. Meteor Atmos Phys, 1999, 70: 185~ 199
- 7 Chen S J, et al. A modeling case study of heavy rainstorms along the Me+Yu front. Mon Wea Rev, 1998, 126: 2330~ 2351
- 8 程麟生, Kuo Y H, 彭新东. 中国暴雨中尺度系统发生与发展的诊断分析和数值模拟. 应用气象学报, 1993, 4(3): 269~ 277
- 9 陶祖钰等. 1995年中国的中尺度对流系统. 气象学报, 1998, 56(2): 166~ 177
- 10 王建捷等. 1998年汛期长江中下游一次梅雨锋暴雨中尺度对流云系模拟与诊断分析. 气象学报, 2002, 60(2): 146~ 156
- 11 孙建华, 赵思雄. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究. 大气科学, 2000, 24(3): 381~ 392
- 12 阎敬华, 薛纪善. 一个华南锋面中尺度暴雨系统结构的数值模拟分析. 见: 周秀骥主编. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京: 气象出版社, 2000. 234~ 241
- 13 贝耐芳. “98.7”突发强暴雨中尺度系统的诊断与模拟研究: [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2000. 1~ 274
- 14 张庆红, 陈受钧, 刘启汉. 台湾海峡中尺度对流系统的数值研究. 见: 周秀骥主编. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京: 气象出版社, 2000. 311~ 344
- 15 冯伍虎, 程麟生, 程明虎. “96.8”特大暴雨和中尺度系统发展结构的非静力数值模拟. 气象学报, 2001, 59(3): 294~ 307
- 16 Mesinger F, et al. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. Mon Wea Rev, 1988, 116: 1493~ 1518
- 17 Zhao Q, Carr F H. A prognostic cloud scheme for operational NWP models. Mon Wea Rev, 1997, 125: 1931~ 1953

NUMERICAL SIMULATION OF MESOSCALE CONVECTIVE SYSTEMS OF SHANGHAI RAINSTORMS IN AUGUST 2001

Lin Yonghui

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Bueh Chaolu

(LAS G, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

Based on the NCEP- ETA numerical simulation, the development of a mesoscale convective system causing 2001 Shanghai rainstorms is investigated. The modeling results fundamentally reproduce the growing processes of a mesoscale convective system, the simulation indicates that the mesoscale convective system has not been formed until the inflow of a low-level jet. Furthermore, the simulating rainfall distribution and location of the maximal precipitation are basically consistent with the observation.

Key words: Mesoscale convective system, Rainstorms, Numerical simulation.

林永辉等：2001年8月初上海强暴雨中尺度 对流系统的数值模拟研究

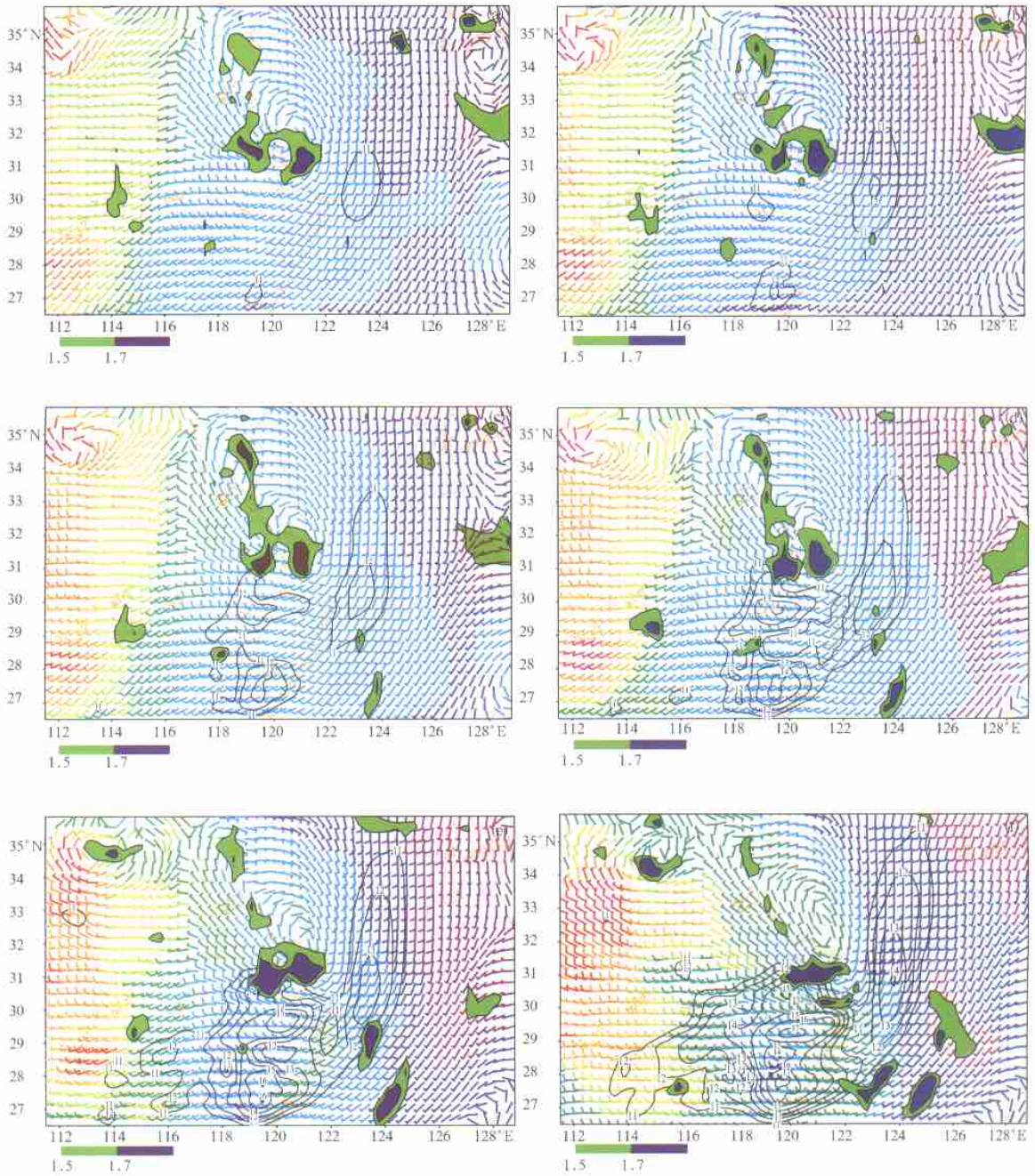


图6 850 hPa风场与总云量的迭加

(a~e分别为8月5日18, 19, 20, 21, 23 时; f.8月6日 02 时; 阴影部分为总云量, 细实线为等风速线, 单位为m/s)