

中国暴雨中尺度系统发生与发展的 诊断分析和数值模拟 (I)数值模拟

程麟生 Ying-Hwa Kuo^{**} 彭新东
(兰州大学大气科学系,兰州 730000)

提 要

通过改进的 MM4 中尺度数值模式,对我国三次典型大暴雨过程的模拟,来探讨暴雨中尺度系统发生与发展的问題。主要结果指出:

气旋性涡柱在不稳定暖湿气柱内生成和发展,以及与整个涡柱共存的上升运动的持续加强,对暴雨中尺度系统的发展具有重要的作用;地面热通量,凝结潜热释放对暴雨中尺度系统的发展有决定性的作用;各种不同的物理过程和参数化、青藏高原的构形造成的外强迫影响,以及模式空间分辨率等,对暴雨中尺度系统结构与演变以及降雨量的模拟结果均有重要的作用。

关键词:暴雨;中尺度系统;数值模拟。

1 引 言

通过我们的分析和诊断^[1],不仅对这类与暴雨直接关联的中尺度系统产生的大尺度环境场有了较清晰的认识,而且对这些暴雨中尺度系统发生发展的涡度结构和演变,以及涡源与热源对这类系统发展的动力学和热力学贡献有了更为深入的了解;因而也进一步提高了我们对这类持续性特大暴雨成因的认识。我们通过对 PSU/NCAR MM4 中尺度模式模拟系统^[2]的检验和发展,先后对我国“81.7”、“81.8”和“91.7”持续大暴雨过程期间中尺度系统的发生和发展,进行了一系列的数值模拟研究^[3-7]。结果发现,对暴雨中尺度系统的发生和发展有一些特别值得注意的物理过程和强迫因子,尽管这些过程和因子的重要性会因个例不同而有差异,但其本质的共性是存在的。因此,本文的目的则希望能回

1992年12月25日收到。

* 85-906 国家科技攻关项目;04-01,08-05,08-06 课题资助。

** NCAR, U. S. A.

答这样一个问题,即从预报角度考虑,对暴雨中尺度系统的发生和发展,应着重考虑哪些有本质影响的物理过程和强迫因子。

2 模式简述和模拟设计

2.1 模式简述

中尺度模式 MM4 在文献[2]中有较为详细的说明,但因研究的问题与例子的不同,常常需要对模式进行修改。以下仅对各例所用模式作一简述。

(1) 模式基本参量: $p_0 = 100\text{hPa}$; $K\sigma = 16$ (高分辨 PBL) 或 14 或 11 层(总体 PBL); 格距 $d = 80\text{km}$; 模拟水平域格点: 46×61 , 或 32×45 , 或 91×121 ; 时间步长 $\Delta t = 120\text{s}$ 或 150s 或 180s 。

(2) 初始条件: 美国 NMC 全球分析 + 探空资料(+ 非线性正规模初始化: “81.7”, “81.8”)。

(3) 侧边界条件: 时变海绵边界, 大尺度趋势由线性时间内插 12 小时观测资料获得。

(4) 行星边界层物理过程: 总体 PBL 参数化(对 $\sigma = 11$ 或 14 层) 或高分辨 PBL 参数化(对 $\sigma = 16$ 层)。

(5) 地面物理过程: 包括有非均一地表的热通量、水汽通量和动量通量; 地面温度是由浅层模式和有云效应的能量收支方程预报获得。

(6) 积云对流参数化和非对流参数化: 采用 Anthes - Kuo 型参数化方案。对于对流参数化, 总对流加热与水汽辐合的垂直积分成比例, 而其分布是由估计的对流云底及云顶和假设的函数计算的; 对于非对流参数化, 饱和以后的凝结以降水的形式降落, 而其潜热加入热力学方程; 在未饱和层内无蒸发。

(7) 模式地形: 通过分析 NCAR 半度(或 1 度) 地形资料和中尺度客观分析方案, 以及采用 1-2-1 平滑——解平滑算子作两次平滑后而获得最终 80km 格点上的地形资料。

(8) 陡坡地形气压梯度为(PGF)的计算: 通过定义参考态和扰动态的场分解方法, 利用静力扣除, 减少了青藏高原陡坡地形 PGF 的计算误差。此外, 根据“黑河地区地气相互作用观测试验研究(HEIFE)”资料, 还修改了近地层物理过程参数化公式中某些不尽合理的参数。

在对各例模拟的设计中, 包含上述全部条件和物理过程等的模拟, 则称控制模拟; 而敏感性试验或对比模拟则依试验的目的而定。

2.2 模拟设计

表 1 给出“91.7”过程的 72 小时模拟设计。试验的水平模拟域均与诊断分析域^[1]的相同, “91.7”过程的格点为 32×45 个。无通量模拟指略去地面感热和潜热通量, 但保留地面动量通量, 以便考查地面热通量对暴雨中尺度系统的影响; 总体 PBL 干过程指既无地面水汽通量, 又无水冷循环的纯干过程; T 42 后处理分析指初始条件和侧边界条件仅仅使用了每天只有一个时次(12UTC) 的 T 42 后处理全球分析资料。

表 1 “91.7”过程的数值模拟设计

模 拟	地面 通量	湿过程	地面摩擦	分析+探空	说明 (总体 PBL 参数化)
1	有	有	有	有	控制模拟
2	无	有	有	有	无通量模拟
3	有	无	有	有	干过程模拟
4	有	有	有	无	T42后处理分析

3 控制模拟结果

3.1 暴雨低涡切变线的模拟结构和演变

图 1 是“91.7”过程^[1]低涡切变线涡度垂直结构演变的 72 小时模拟结果。由图 1 可见, 一个垂直向涡柱在模拟 24 小时后(图 1B)已经形成, 其后, 该涡柱的强度在持续发展(图

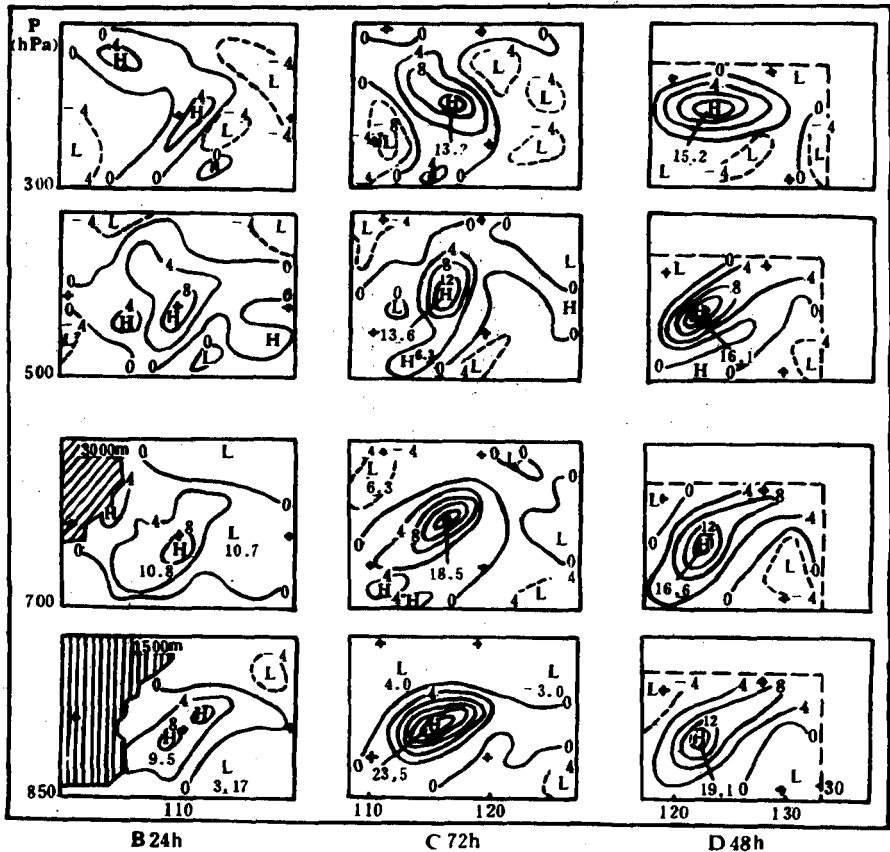


图 1 1991 年 7 月 4 日 12UTC 至 7 月 7 日 12UTC 的低涡切变线涡度($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)垂直结构的 72 小时控制模拟结果(图中 B(24h), C(48h)和 D(72h)分别与文献[1]中图 8 的内域 B, C 和 D 对应;而阴影部分分别是大于 1500m 和 3000m 的地形高度)

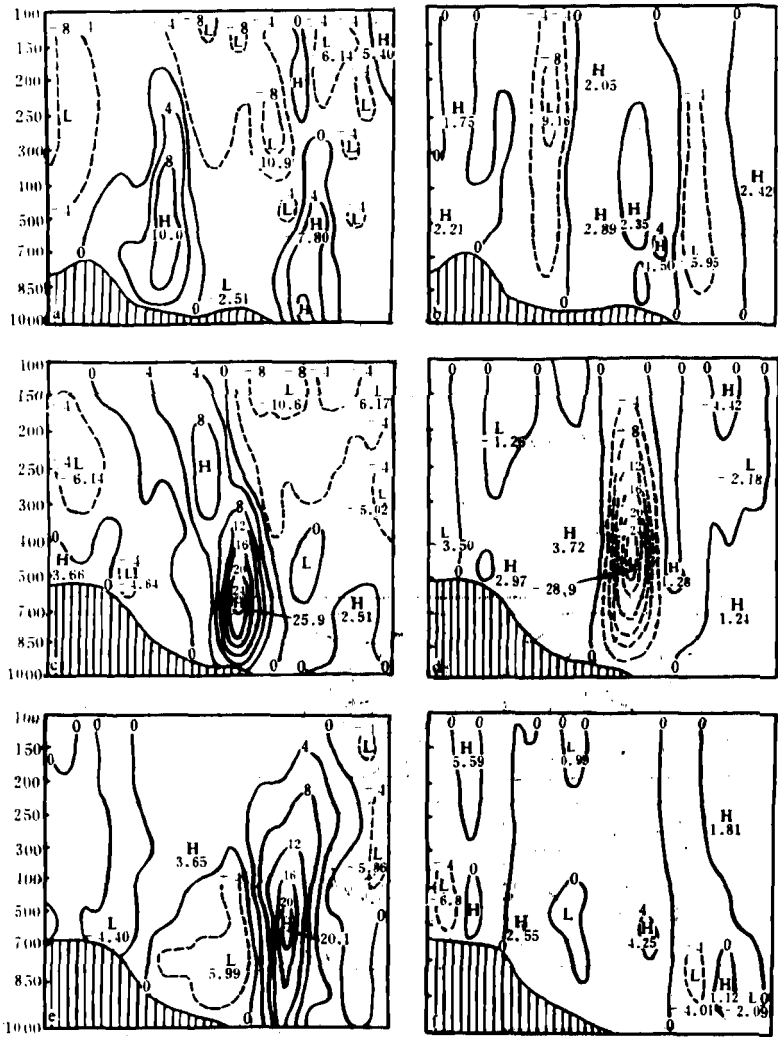


图2 通过图1中850hPa上正涡度中心作的控制模拟涡度(a,c,e)和垂直速度 $\omega(\times 10^{-4} \text{hPa/s})$ (b,d,f)的东西剖面(虚线表示负涡度和上升($\omega < 0$)运动;其余说明同图1)

1C、D);与实测涡柱^[1]比较表明,在整个低涡切变线演变期,模拟结构和强度与观测的结果相当一致,只是在低涡切变线发展的最强阶段(图1C),模拟的涡度显得略强于实测的^[1],但其位置和范围仍基本一致。为了进一步了解该涡柱的垂直结构及其与垂直运动场的空间配置,再通过850hPa上正涡度中心作了垂直剖面图;对应的结果在图2中给出。由该图可见,从7月4日12UTC开始的模拟,至24小时(图2a,b),一个伸展到250hPa的涡柱已形成,其中心强度为 $10.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$;与其相对应,一个伸展到100hPa的上升运动气柱中心强度约 $-9.2 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。至48小时,东移并强烈发展的涡柱一直伸展至100hPa,由于涡柱西倾,该涡柱有两个中心,由地面伸展至300hPa的涡柱中心强度达 $25.9 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$;与此同时,东移强烈发展的上升运动气柱与涡柱对应相伴,在500hPa附近的中心强度达 $-28.9 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$;这些事实揭示,在低涡切变线持续强烈发展期,

整个气柱的上升运动与气旋性涡度并存;在对流层中部出现的上升运动极大值(图 2d, 48 小时)和在 700hPa 附近出现的正涡度极大值(图 2c, 48 小时)之间的匹配意味着,低空的强涡度中心生成和维持必然与低空的强辐合、中空**的强上升运动以及高空的强辐散相伴**;正由于这一机制,约束了涡柱在 48 小时模拟中(图 2e)出现了两个中心,伸展至 300hPa 的主涡柱正上方的负涡度实际与高压辐散相伴。当模拟至 72 小时(图 2e, f),该东移的涡柱继续演变为一个垂直涡柱,其中心强度($20.1 \times 10^{-5}/s$)略有减弱;但最值得注意的,与其相伴的垂直上升运动气流几乎消失(图 2f);这一事实说明,强的气旋性涡柱并不总**与强上升运动相伴**,这种不与强上升气流共存的涡柱意味着气旋性环流将减弱,或者说,暴雨低涡切变线处于消弱阶段。

图 3 是相当位温 θ_e 剖面 and 配有比湿的水平风速剖面。该剖面对应 48 小时控制模拟结果。由图 3(a)可见,在对应强上升运动和气旋性涡柱(图 2c, d)内,在 700hPa 以下为条件不稳定($\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$),在 700 至 300hPa 的中、高空为近似湿中性,即 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} \approx 0$;而在强上升气流两侧为对应下沉气流的干区;在这两个干区之间的条件不稳定区,有一条伸展到 400hPa 的湿舌与偏南风低空急流($V > 24m \cdot s^{-1}$)相伴(图 3b);在该低空急流左侧的强烈气旋性涡度切变区,正是强涡柱和强上升运动并存的(图 2e 和 d, 48h)不稳定暖湿气柱(图 3a, b);暴雨低涡切变线也正是在这样一些极其有利的配置条件下发展的。随着模拟延续至 72 小

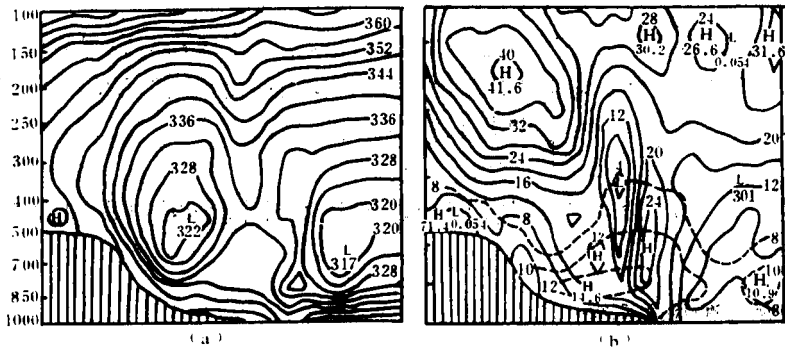


图 3 (a)相当位温 θ_e (K)和(b)配有比湿(g/kg,虚线)的水平风速($m \cdot s^{-1}$)剖面,与控制模拟 48 小时剖面对应

时,东移涡柱不再伴有上升运动(图 2f)和低空急流(图略)以及暖湿结构(图略)。因而,暴雨低涡切变线演变为一个相对较干的深厚正压涡旋,该次暴雨过程也趋于结束。

由以上对“91.7”暴雨低涡切变线结构和演变**的控制模拟结果讨论可知**,模拟再现的这些特征,不仅与诊断分析结果^[1]基本一致,而且更深刻地揭示其发生发展的机制;其中,气旋性涡柱在不稳定暖湿气柱内生成和发展,以及与整个涡柱共存的上升运动的持续加强具有本质的重要性。随着这些运动场和温湿场结构配置的失调或消失,这类暴雨中尺度系统便减弱或趋于消亡。因而,暴雨过程也渐趋结束。

3.2 降水预报

图 4 是该例 24 小时(a)和 48 小时(b)控制模拟降雨量与实测降雨量(c)、(d)的比较。

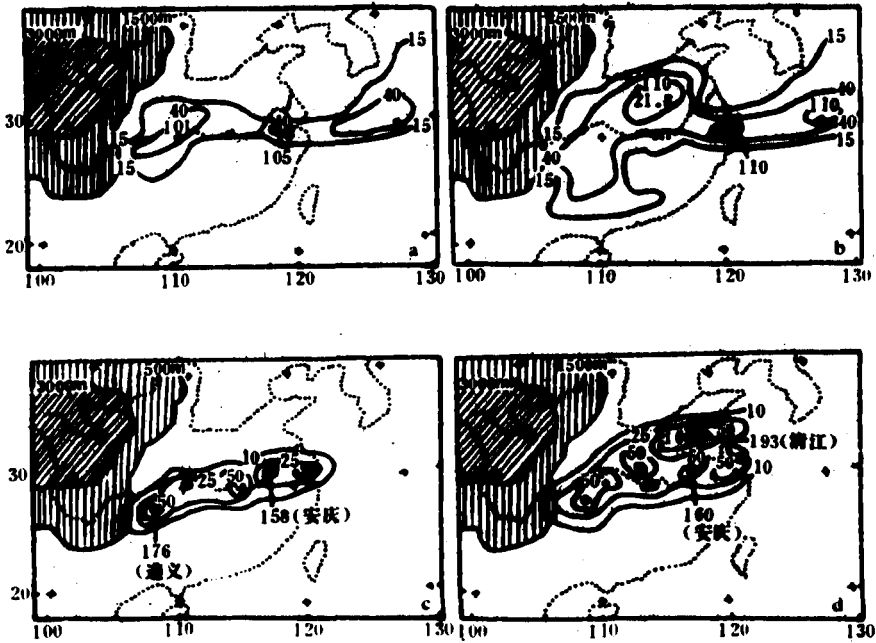


图1 “91.7”过程控制模拟的24小时(a)和48小时(b)降雨量(mm)以及观测的24小时(c)和48小时(d)降雨量

由图可见,无论是24小时还是48小时降水预报,其暴雨区都与观测的(图4c,d)雨区基本一致。雨带中的主要暴雨中心预报出来了,但预报的雨强均偏小,一般只有观测雨量的三分之二;但至48小时,预报与实况较接近。

4 不同物理过程和参数化对模拟结果的影响

4.1 不同物理过程的影响

图5是与图2控制模拟对应的无地面热通量模拟。由图5和图2的对比分析可见,当模拟至48小时(图5a,b),由于无地面热通量的影响,已使原来强烈发展的涡柱(图2c)和

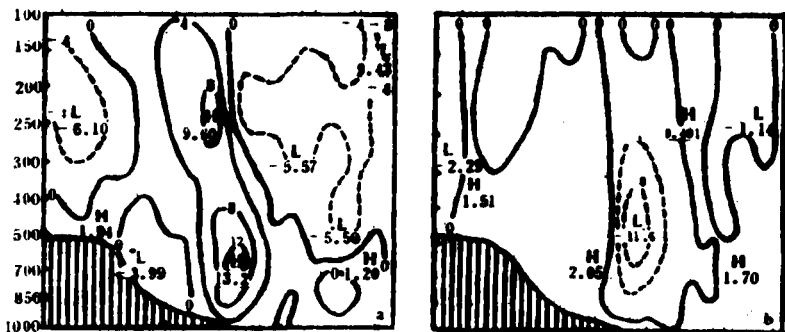


图5 与图2对应的无地面热通量模拟剖面

上升运动(图 2d)分别从 $25.9 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 和 $-28.9 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 减弱到 $13.2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 和 $-11.6 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$; 至 72 小时, 涡柱强度继续减弱到 $8.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (图略), 而原来的弱上升运动(图 2f)已变为下沉运动(图略)。由此可见, 地面热通量对暴雨中尺度系统的强烈发展有显著影响, 其结果, 使运动场和水汽场垂直结构不再有利于暴雨中尺度系统发展, 进而影响降水。我们计算了无地面热通量时的 24 小时降雨量, 由计算可知, 此时雨带从中部断开, 两个雨区中心最大雨量分别从原来(图 4a)的 105mm 和 70.1mm 减小到

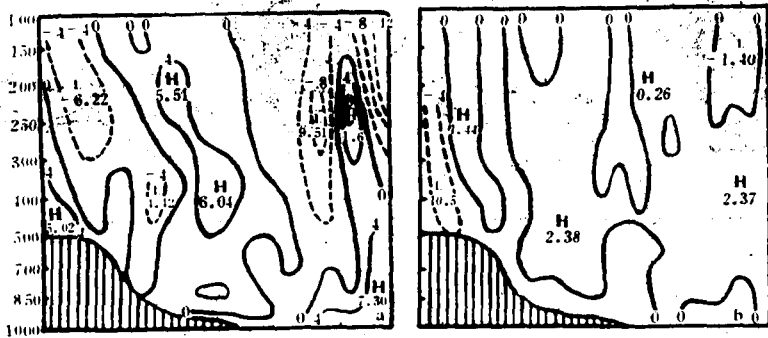


图 6 与图 2 对应的干模拟剖面

40mm 和 43mm (图略)。对海域, 因无观测雨量, 无法对比。由此可见, 地面热通量对“91.7”暴雨低涡切变线的发展和相伴的降雨量均有重要影响。

图 6 给出无地面水汽通量和水汽循环的干物理过程 48 小时模拟结果。与图 2(c,d) 比较可见, 此时, 暴雨中尺度系统的垂直结构和演变已完全畸变。这一事实揭示, 采用干物理过程模式, 无法模拟出这类暴雨中尺度系统的结构及其演变。

4.2 行星边界层参数化的影响

由于 PBL 参数化对暴雨中尺度系统发生发展的重要性, 我们曾对“81.8”暴雨过程的数值模拟设计了不同 PBL 参数化对低涡切变线发展的影响^[4]。这些结果表明, 只有包括高分辨 PBL 参数化的湿物理过程(控制模拟), 才能较好地模拟出低涡切变线在 PBL 内的突然加强和较接近实测的降雨量。这意味着, 尽可能改进 PBL 参数化方案的必要性。

5 地形强迫、空间分辨率与初值质量的影响

5.1 青藏高原构形和模式空间分辨率的影响

一系列的数值试验^{[3][5-6]}指出, 青藏高原地形强迫和模式空间分辨率对西南涡演变的主要影响是, 模式地形尽可能逼真是成功模拟西南涡演变的外强迫条件, 模式地形严重失真而无法模拟出西南涡的事实表明, 西南涡的确是西南季风气流沿青藏高原东南角绕流和爬越的一个地形强迫环流; 这一环流对西南涡的初生和维持都是必要的。而降低模式水平分辨率的主要影响是, 减弱或缺乏模拟西南涡生成的能力, 而对其发展和位置的模拟也

不好。因此,尽可能提高模式空间分辨率或采用套网格是必要的。

5.2 初始条件的影响

对“91.7”过程的模拟结果表明,在其他模拟条件不变的情形下,初值质量对低涡切变线结构与演变以及降水预报结果有决定性的影响。

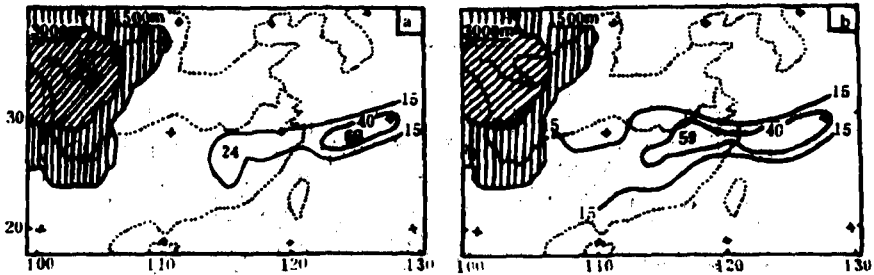


图 7. 用每日一个时次(12UTC)和 T42 后处理全球分析资料作初值(1991 年 7 月 4 日 12UTC)预报的 24 小时(a)和 48 小时(b)降雨量(mm)(说明同图 4)

为说明初值质量的重要性,我们在图 7 中给出了用 T42 后处理全球分析作初值预报的 24 小时和 48 小时降雨量。尽管该模拟与表 1 中控制模拟仅是初值质量不同,但雨区区和雨量的预报与控制模拟的(图 4a,b)结果相差甚远。因此,如何提高初值质量,对暴雨预报和中尺度系统发生与发展的模拟来说,都是一个至关重要的问题。

6 结 论

综上所述,可得如下结论:

- (1)修改和改进的 MM4 有能力模拟这类暴雨中尺度系统发生与发展的基本结构特征及其演变,即使用总体 PBL 参数化的 10 层模式。
- (2)气旋性涡柱在不稳定暖湿气柱内生成和发展,以及与整个涡柱共存的上升运动的持续加强,对暴雨中尺度系统的发展具有本质的重要性。
- (3)没有地面感热和潜热通量,不仅会减弱暴雨中尺度系统的生成和发展强度,而且会使其结构失真,相伴的降雨量减小。
- (4)水汽和凝结潜热释放对暴雨中尺度系统的发展有决定性的作用;没有水汽的干物理过程不能模拟出这类中尺度系统的结构和演变。
- (5)在全物理过程条件下,高分辨 PBL 参数化比总体 PBL 参数化能更好地模拟出暴雨中尺度系统在 PBL 内的突然加强及其涡度演变的垂直结构。
- (6)青藏高原的构形对西南涡的演变有显著影响;人为使模式地形严重失真,则不能模拟出西南涡的生成和发展;西南季风气流沿青藏高原东南角绕流和爬越是西南涡生成的必要外强迫条件。
- (7)降低模式空间分辨率,不仅使模式缺乏模拟中尺度系统生成的能力,而且使其发展强度减弱。

(8)在其他模拟条件不变的条件下,初值质量对暴雨中尺度系统结构与演变以及降雨量的模拟结果有决定性的影响。

参 考 文 献

- 1 程麟生, Y. -H. Kuo, 彭新东, 李小莉. 中国暴雨中尺度系统发生与发展的诊断分析与数值模拟. (1): 诊断分析. 应用气象学报, 4(3): 257-268.
- 2 Anthes R. A., E.-Y. Hsie and Y. -H. Kuo. Description of the Penn. State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4), NCAR, NCAR/TN-282+STR, pp46.
- 3 Kuo, Y. -H., L. Cheng and J. -W. Bao. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood. Part I: Evolution of a mesoscale southwest vortex. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 2481-2504.
- 4 Cheng, L., and Y. -H. Kuo. Mesoscale numerical simulation of the influence of PBL parameterization and moist process on development of a shear-line vortex. *C. J. Atmos. Sci.*, 1992, **16**: 90-100.
- 5 程麟生, 郭英华. 物理过程和分辨率对西南涡演变的中尺度模拟影响. 高原气象, 1988, **7**: 289-299.
- 6 程麟生, 郭英华. 初始条件和大地形对西南涡演变的中尺度模拟影响. 兰州大学学报, 1990, **26**: 140-147.
- 7 Cheng, L., X. Peng, X. Li and Y. Ma. Diagnosis and numerical simulation of the evolution of a mesoscale vortex with shear line during July 1991 heavy rainfall over Yangtze-Huai River. 3rd PRC/USA Workshop on Mesoscale Meteorology, Dalian, China, 1992, 24-26.

DIAGNOSIS AND NUMERICAL SIMULATION FOR THE GENESIS AND DEVELOPMENT OF MESOSCALE SYSTEMS WITH HEAVY RAINFALL

Part I: Numerical Simulation

Cheng Linsheng Ying-Hwa Kuo* Peng Xindong

(Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract

Using a improved model of MM4, the genesis and development of the mesoscale systems with the heavy rainfall are further discussed based on the three typical heavy rainfall events (81.7, 81.8 and 91.7) in China. The principal findings are:

It is important to the mesoscale systems that a column of cyclonic vorticity is generated and developed within an unstable and warm air with moist, while a persistently intensive ascending motion is maintained with whole vorticity column.

The effect of the condensation latent release on the mesoscale systems development is significant. The various physical processes, model parameterization, the configuration of the Qinghai-Xizang Plateau forming the external forcing influence and the model spatial resolution and so on are all important to the simulative results concerning the structure, evolution and precipitation for the mesoscale systems producing heavy rainfall.

Key words: Heavy rainfall; Mesoscale systems; Numerical Simulation.

* NCAR, U. S. A.