

登陆北上台风暴雨突发性增强的一种机制研究*

黎清才

(山东省气象台, 济南 250031)

王成恕

(山东省气象研究所)

曹钢锋

(山东省气象局)

摘 要 采用一个三维混合模式对 1992 年 8 月 30 日至 9 月 2 日一次登陆北上台风暴雨过程进行了模拟。模式可以较准确地预报出与地面倒槽相一致的地面降水位置及降水量值。模拟的台风云系结构与卫星云图比较表明, 外围云场与实例云况吻合很好, 验证了本模式模拟卫星云图的能力, 对卫星云图预报有实际意义; 暴雨突然增幅的直接原因是高层冰云与低层供水云的突然北移重叠造成的。受地面倒槽附近强烈辐合抬升的动力作用, 各相态云系的分布与垂直运动紧密相关; 辐合线右侧的东南低空急流为降水的增幅及维持提供水汽来源; 云相变潜热非绝热加热作用对暴雨的增幅及维持具有正反馈作用, 它对暴雨维持具有积极贡献。

关键词 混合相云模式 登陆北上台风暴雨 云模拟

1 引言

国内外有关台风与热带风暴热力、动力方面的研究已有很多, 如 Anthes^[1,2]、Chang^[3]等从边界层摩擦、积云潜热释放反馈和海洋等不同方面对热带风暴的主要作用, 如风暴潮、强风暴和暴雨的热力、动力结构进行了深入细致的研究。在我国, 登陆北上的台风经常造成暴雨, 形成洪涝灾害。伴随台风周围的外围云系, 它的移动与发展直接影响暴雨的落区及强度, 因此, 研究和揭示外围云系的结构及演变, 对寻找暴雨预报线索具有重要意义。1992 年 8 月 30 日至 9 月 2 日的一次登陆北上台风暴雨过程, 对华北地区造成了巨大的经济损失, 本文利用一个混合相云模式对该过程进行了模拟研究, 初步得到了一些有意义的结果。

2 模式简介及资料来源

本文所用模式的动力学框架主要以 PSU/NCAR 的 MM2 和 MM4 中尺度模式版本为基础, 采用了静力平衡、气压 σ 为坐标的模式, 模式的物理过程包括整体边界层参数化¹⁾, 地形资料采用 NCAR 的 $10' \times 10'$ 的格点资料, 经客观分析到模式的格点上输入模式, 基础模式采用跳点格式, 时间积分方案采用以蛙跃中央差为基础的

1995-01-28 收到, 1997-09-11 收到四改稿

* 获“八五”国家科技攻关 85-906-03-07 和 -07-04 号课题资助

1) 王鹏云、潘在桃, 1990, 中尺度业务试验数值模式系统 (MOMS) 使用说明, 气象科学研究院中尺度气象研究所, 3~20.

Brown-Campama 格式^[4]。模式中云物理过程采用胡志晋所研制的混合相双参数云物理过程参数化方案^[5]。由于云物理过程计算的复杂性,本次计算中未考虑冰晶的增生及破碎过程。模式的有关详细过程参见文献[6~8]。

资料取自 1992 年 8 月 31 日 08 时至 9 月 1 日 08 时常规探空资料,并用中央气象台出版的 T42 格点资料以弥补沿海地区资料的缺乏。本算例中水平格距取 90 km,中心经纬度为 (38°N, 115°E),格点取 31×31,垂直方向从地面至模式顶 (150 hPa) 不等距分成 10 层。考虑到台风外围云系有关特征,首先假定保持不变,我们把模式的云微物理过程在不模式的动力场中充分酝酿 2 h 的云系结果作为云微物理的初始输入场,以改进原来假定无云的初始场条件。

3 主要模拟结果

模式对本算例台风暴雨过程进行了 24 h 积分。结果表明,在暴雨增幅时段,模

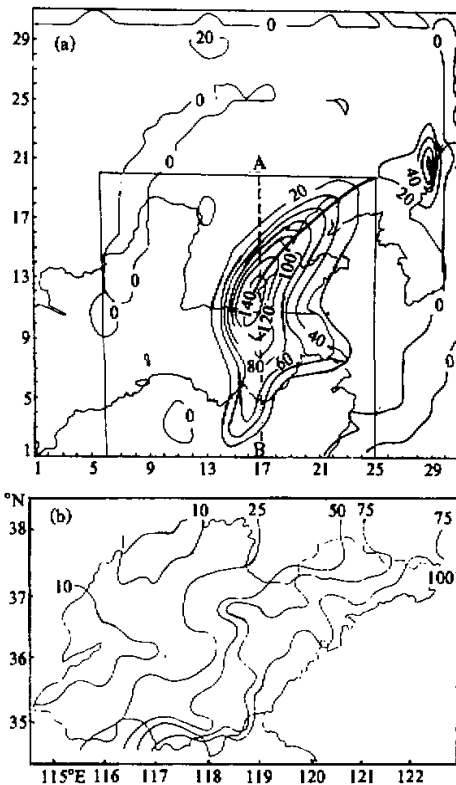


图 1 1992 年 8 月 31 日 08 时至 9 月 1 日 08 时
24 h 降水

(a) 模拟结果,纵横坐标为本算例纵横方向格点,图中框内为模拟范围,粗实线为 31 日 20 时倒槽实况,南北点划线 BA 为剖面位置;(b) 实况。单位: mm / 24 h

拟的雨区东西向窄,西南东北走向长,向东北方向发展明显,雨量增幅清楚,与实例地面气压倒槽吻合很好。50 mm 以上的暴雨区位于山东中北部、山东半岛西北部、河南北部及河北东南部等地区,笼罩范围和形态与增幅时实况相近。模拟暴雨中心雨量大于 140 mm,稍多于实况,位置与实况相比偏差约 75 km,在格距误差范围之内,可以说本算例的模拟是成功的(见图 1、2)。

3.1 水平云场的宏观结构与卫星云图分析

为便于比较和说明问题,我们的模式每隔 1 h 输出一 次结果。图 3a、b 是两个特征时次水凝结物总量 $[\theta(\text{云水}) + \theta_r(\text{雨水}) + \theta_s(\text{雪水}) + \theta_i(\text{冰水})]$ 10 层总和的分布。图 4a、b 分别是相应时次卫星云图实况。

通过比较,可以直观地发现,模拟结果较好地刻画了台风北部外围云系的分布。其北部边缘范围基本与实况云图一致,同时模式还描述了西风槽云系的存在。但北部和东部洋面上的模拟与实况有差异,其原因可能是初始资料的缺乏所致,随着台风的北移,其北部边缘云系也北上增强,造成江苏北部及山东

半岛的强暴雨过程, 8 月 31 日 20~22 时, 暴雨出现突然增幅现象 (见图 2)。

3.2 暴雨突然增幅的云物理学机制分析

图 5 是本次暴雨突然增幅前后两个时次 10 层等压面上云水总量 (θ_c) 的分布。

在暴雨增幅之前 (16 时、18 时), 低层强云水中心位于长江流域及江浙沿海一带, 高层冰水云位于苏北地区及鲁南附近; 在江南地区, 由于高空冰云很弱, 虽然低层存在很好

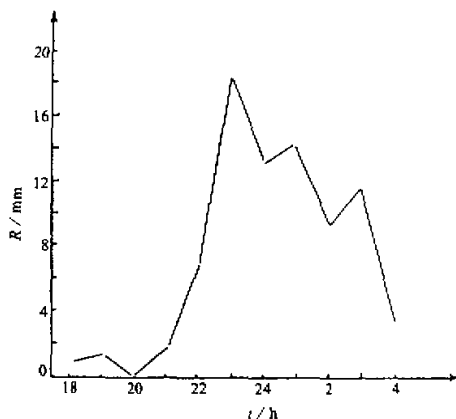


图 2 青岛附近的五莲县 8 月 31 日 18 时至 9 月 1 日 04 时逐时降水曲线

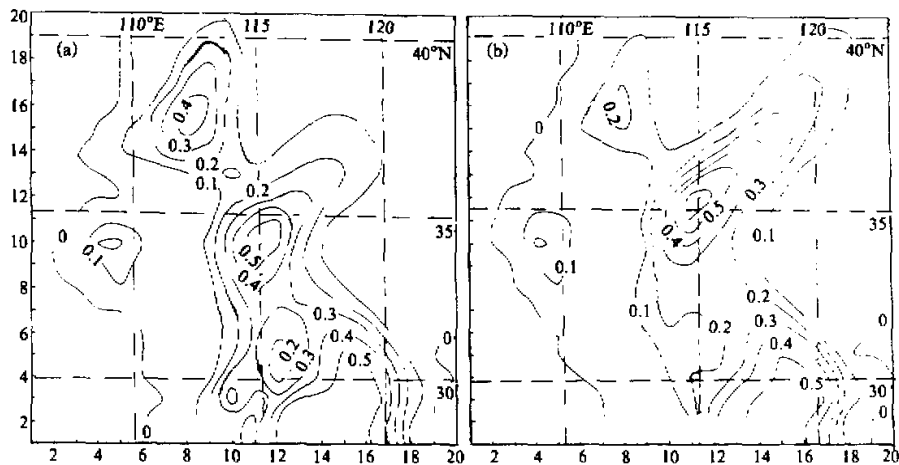


图 3 1992 年 8 月 31 日水凝结物 (单位: g/kg) 10 层总和分布
纵横坐标为模拟范围纵横方向格点。(a) 20 时, (b) 24 时

的丰水云, 但可能缺少来自高层冰云的引晶催化, 同时云水向雨水的自动转化很弱 ($\text{WCAR} \approx 0$), 暖雨过程不明显, 难以促成云水向雨水的转化, 所以地面降水较弱。另一方面, 在苏北地区虽然高层存在有利的冰水云条件, 但低层没有可供催化的云水, 仍然不能形成降水。20 时, 即暴雨开始突然增幅之时, 低层丰厚的供水云快速向东北方向伸展移动, 强云水中心由一个分裂为两个, 南部中心位于福建沿海, 北部中心增强并向东北方向迅速推进 200~300 km, 北部边沿进入冀鲁地区, 22 时, 北部伸展到渤海湾及东北地区, 此时云水倒槽的形势与地面倒槽形势基本一致, 呈东北至西南走向; 高层冰水云在增幅前后基本少变少动。可见, 在暴雨开始增幅时, 受低空东南气流影响, 低层云水区快速北移至冰水云的下方, 并向北方伸展, 形成极为有利的催化云-供水云自然催化的重叠形势。这样, 来自高层的冰粒子增长达到一定末速后落入低层云水中进

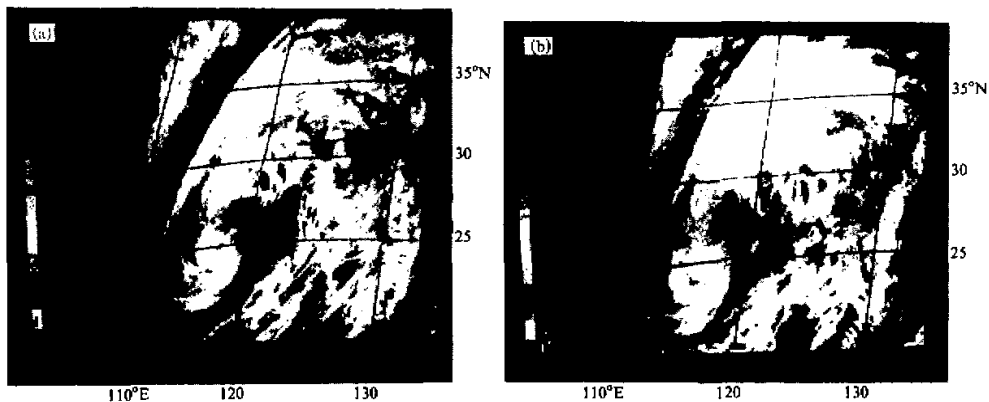


图 4 1992 年 8 月 31 日 (a) 20 时, (b) 24 时卫星云图

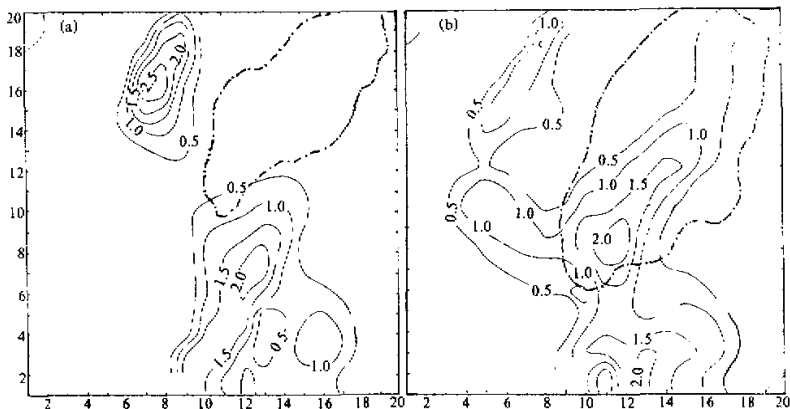


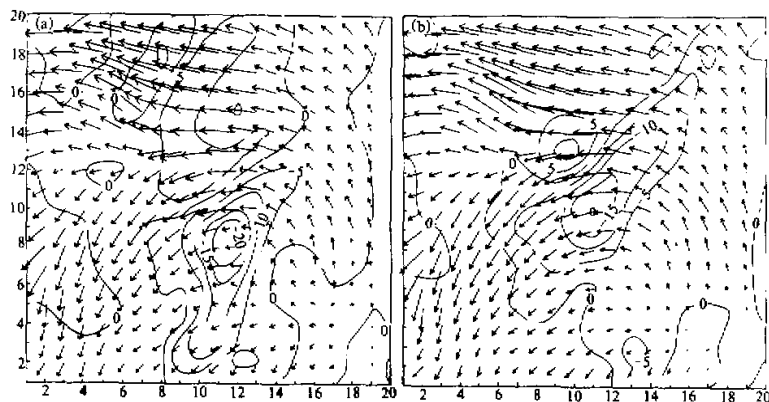
图 5 1992 年 8 月 31 日 10 层云水 θ_w (单位: g/kg) 总量分布
纵横坐标为模拟范围纵横方向格点。(a) 18 时, (b) 22 时, 点划线是相应时次的冰晶区范围

一步快速增长, 充分的云雨转化使得地面降水突然增强, 因此, 一个低层突然北伸的云水区与高层少动冰云区重叠是造成地面降水突然增强的一个可能的直接原因。31 日 24 时, 高层冰水云由于自然引晶的大量消耗使得云体减弱, 但位置少变, 从图中可看出, 由于东南低空急流的存在, 仍维持一个丰厚的云水层, 但由于高层冰云减弱, 降水也逐渐减弱。

结合卫星云图分析, 还可以发现, 在高层冰云存在的位置, 对应有几条中尺度低温云带, 它的变化与高层冰水云基本类似。这也为上述高层冰云模拟的正确性提供了证据。对低层云来说, 8 月 31 日 20 时, 随着台风的北移, 在原来位于江南沿海的低压中心北伸的倒槽内, 在南方附近新生一低压中心, 受其影响, 低层云水中心也分裂为两个, 其中北部中心位于南京附近。低压中心与北部云水中心在出现的时间及位置上有很好的—致性。云水中心的生成可能与该诱生低压的形成直接相关, 而后的形成促进了低空的辐合, 从而导致水汽的凝结而形成丰厚的云水。

3.3 暴雨突然增幅的动力学条件

高、低云的不同配置直接决定了降水的大小及分布, 反过来, 高、低层云系的分布又直接与大气的垂直运动密切相关, 图 6 是两个不同时次垂直速度场的分布, 可以直观看出, 分别对应不同时次垂直速度位置及区域, 低空云水区位置与其吻合很好, 在暴雨突发性增强前, 强上升区位于长江流域; 在暴雨突然开始增幅时, 上升运动迅速北上, 伴随着垂直运动的北移, 前面所说的低空云区也突然北移, 31 日 20 时, 垂直速度 $\bar{\omega}$ 中心的位置恰好位于高层冰云的位置, 这样, 由于垂直运动的北移增强, 使得低空水云也突然与高空冰云得到重叠加强, 暴雨增幅此时开始。



16 时, 垂直速度 ω 随高度的升高向北倾斜更为明显, 高、低层中心位置相差 400 km, 低层的移动远快于高层, 在暴雨开始增幅时, 高低层强上升区趋于向垂直方向转化, 促使与垂直运动紧密相关的多层云系分布也趋于垂直, 从而造成高层冰水云与低层云水层重叠。

3.4 暴雨突然增幅的相变潜热反馈作用

从不同高度上暴雨突然增幅前后 6 h, 14~17 时、20~23 时、23~02 时 3 个时段内 3 h 温度增量分析 (图 8), 暴雨突然增幅时, 鲁北地区中空 (519 hPa) 有一很强的加热中心, 3 h 增温大于 2°C 的范围较大, 这主要是水汽凝结释放潜热造成的, 在 215 hPa 等压面上, 鲁北地区有一强冷却区, 这十分有利于冰晶的核化过程。温度的降低可以更大限度地促进冰核的核化, 该时段前后迅速形成的高空冷却作用为地面降水增幅补偿了大量用于自然引晶而消耗的冰粒子, 为降水的维持提供了粒子条件。

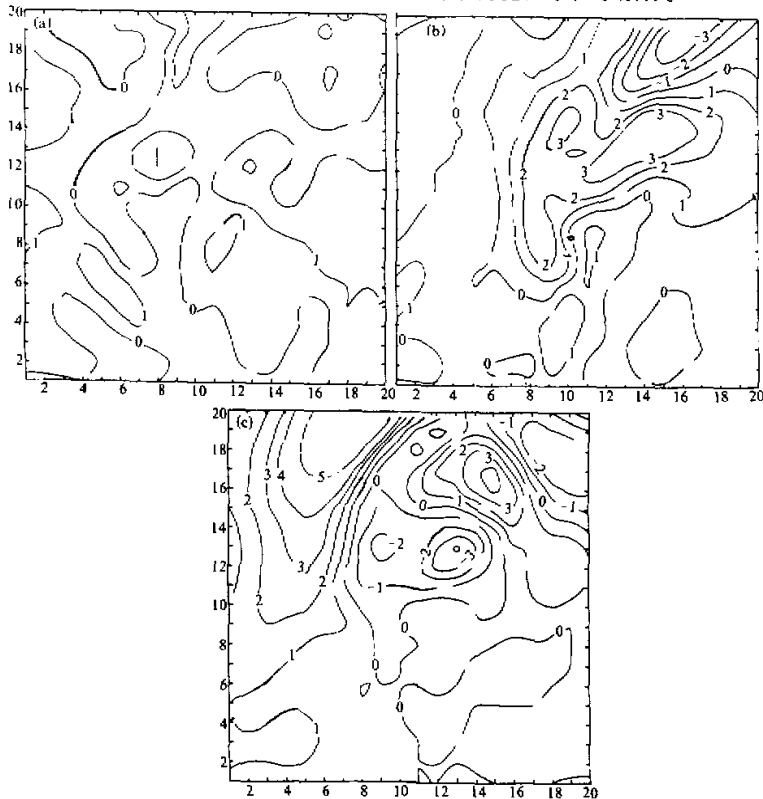


图 8 暴雨突然增幅时 20~23 时等压面上 3 h 温度增量分布
纵横坐标为模拟范围纵横方向格点。(a) 847 hPa, (b) 519 hPa, (c) 215 hPa

另外, 由于中层大气的非绝热加热位置位于地面倒槽辐合线上方, 大致呈东北—西南向, 大气的加热必然导致地面倒槽附近上升运动的迅速增强。云微物理转化造成的大气非绝热加热作用对大气动力场的影响是很重要的, Orville 等^[9]论证了温度扰动对垂直

动力场的贡献, 在第三运动方程中我们知道温度扰动项可驱动大气变得更为不稳定, 所以, 温度扰动浮力可进一步迅速增强地面倒槽附近的上升运动。如不考虑降水物的拖曳作用, 温度扰动的变化决定了动力加速度的变化, 所以相变潜热加热对动力场起正反馈效应。

另一方面, 进一步增强的垂直运动又将会促使大量的水汽凝结, 考虑水汽的凝结过程, 它将释放大量的凝结潜热。假定在 dt 时间内, 有 dm 的水汽凝结出来, 由热力学第一定律可得

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{L_V} (c_p \Gamma_C + g) W,$$

式中 L_V 为凝结 / 蒸发潜热, Γ_C 为云内温度递减率, 可见, 凝结量的变化正比于垂直运动, 假定大气在 2 min 之内, 仅由温度扰动可增加 1 cm/s 的垂直运动量级, 必将有大量的水汽凝结出来。从而保证低层丰富的可供催化的供水云, 反过来又将会促进降水的增强。

在 23~02 时段内, 虽然高层冷却的增强仍然维持一个较强的冰云, 但中层加热明显向东北移且减弱, 供水云已基本上移出冰云的下方, 降水减弱。

4 结语

混合相云模式成功地模拟了本例的台风暴雨增幅过程。它可以较准确地预报与地面倒槽相一致的降水范围和降水量; 模式不仅能够描述伴随台风倒槽暴雨过程的外围云系, 还具有一定预报云系发展的能力。

台风暴雨的突然增幅, 可能主要是由于江南沿岸的低层云水区突然快速北移与高层冰晶云相重叠造成的。垂直上升运动的移动变化是形成高低层云系突然重叠的重要原因。同时, 低层云水中心的北移与地面倒槽内诱生低压中心有关, 它提供了下落冰粒子进一步增长的云水环境。

云物理过程参与降水的另一个重要方式是非绝热加热。在中层, 相变潜热的加热增强了垂直运动, 促使了低层水汽的凝结, 从而为地面降水突然增幅后的维持提供了丰富的可供催化的供水云; 在高层, 冷却作用有利于冰晶的核化, 从而补偿了由于自然引品大量消耗的冰粒子, 保证了降水的增幅和维持。

参 考 文 献

1. Anthes, R. A. and Rosenthal, S. L., 1971, Comparisons of tropical cyclone simulations with and without the assumptions of circular symmetry, *Mon. Wea. Rev.*, **99**, 759~766.
2. Anthes, R. A., 1974, The dynamics and energetics of mature tropic cyclones, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, 495~522.
3. Chang, S. W. and Anthes, R. A., 1979, The mutual response of the tropical cyclone and the ocean. I., *Phys. Oceanogr.*, **9**, 128~135.
4. Brown, I. and Campama, K., 1978, An economical time-differencing system for numerical weather prediction, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1125~1136.

- 5 胡志晋、严采繁, 1986, 层状云微物理过程的数值模拟(一)——微物理模式, 气象科学研究院刊, 1(1), 37~52.
- 6 刘公波、胡志晋、游来光, 1994, 混合相层状云系模式的中尺度低涡云系的实例模拟, 气象学报, 52(1), 78~89.
- 7 王成恕、胡志晋、游来光, 1995, 华北地区锋面云系和降水个例研究, 气象学报, 53(增刊), 631~640.
- 8 Hu Zhijin et al., 1994, Primary results of numerical study on mesoscale effect of ice seeding in stratiform cloud, Proceedings, 6. WMO Scientific Conf. on Weather Modification, WMO / TD-No. 596, 483~486.
- 9 Orville, H. D. et al., 1984, Some surprising results from simulated seeding of stratiform-type clouds, *J. Climate and Applied Meteorology*, 23(12), 1585~1600.

A Mechanism Study of Torrential Rain Intensifying due to Landing Typhoon

Li Qingcai

(Meteorological Observatory of Shandong Province, Jinan 250031)

Wang Chengshu

(Institute of Meteorology of Shandong Province)

Cao Gangfeng

(Meteorological Bureau of Shandong Province)

Abstract Using a three-dimensional mixing model, the numerical simulation for the process of the torrential rain caused by the landing and moving northward typhoon from 30 August to 2 September 1992 is performed. The model can predict the precipitation area and amount associated with surface inverted trough. The simulated cloud system structure of typhoon is compared with the satellite cloud pictures and it is showed that the simulated periphery of cloud field coincides with the actual. The ability of the model to simulate satellite cloud pictures is examined. The direct reason of the rainfall increasing sharply is that the low clouds supplying water vapour for high cloud moved suddenly northward and is overlapped by the high ice clouds. Because of the dynamic effects of the strong convergence and lifting from the surface inverted trough, the distribution of all phase cloud system is related to vertical motion. The southeast wind jet in low layer on the right of convergence line supplies the water vapour source for rainfall so violent and lasting. The adiabatic heating produced by cloud phase change has a positive feedback effect on the rainfall intensifying and maintaining.

Key words mixing phase cloud model landing and moving northward typhoon torrential rain
cloud simulation