

# 1986年6月26—27日京津冀 大暴雨的数值试验研究

潘在桃 王鹏云

(国家气象局气象科学研究所)

## 提 要

用移植到 DPS-7 机上的美国 PSU/NCAR 中尺度模式 MM4 对 1986 年 6 月 26—27 日京津冀地区大暴雨过程进行了数值试验。结果表明：高空对流区附近风速减小和低空急流核加强并通过暴雨区对暴雨起决定性的影响；潜热的反馈作用、下垫面提供的热量和水汽通量对降水有重要影响。大陆以东洋面的水汽供应以及西北涡在这次暴雨过程中的作用不显著。另外，采用显式降水方案后，预报的降水落区、中心位置和量值均有所改进。

## 一、降雨实况和天气背景

1986年6月26日白天暴雨区从陕西经山西进入河北，夜间移至京津地区并突然加强，且伸展到保定地区，然后于27日14时前后出海。北京市29个测站中26日08时至27日08时（北京时下同）日降水量 $>100\text{mm}$ 的就有14个， $50-100\text{mm}$ 的12个，最大日降水量达 $157\text{mm}$ ，创1895年以来同期日降水量记录<sup>[1]</sup>。

这次暴雨过程是在欧亚中高纬度形势从一槽一脊调整到二脊一槽型之后，位于日本海附近的中纬度高压与西太平洋副高在 $115^{\circ}\text{E}$ 以东打通，形成了缓慢东移的高压坝，有利于暴雨形成的东高西低形势下形成的。在此背景下25日20时 $850\text{hPa}$ 和 $700\text{hPa}$ 图上陇东有一西北涡，地面图上四川盆地为一热低压；26日08时该西北涡移至银川附近，地面图上京津地区有一低压形成；26日20时 $850\text{hPa}$ 图上的西北涡继续东移至太原以北，同时在渤海湾附近，有一西南与东南风的暖式切变位于西南急流前方。在这过程中，从25日20时至26日20时 $200\text{hPa}$ 图上的高空急流轴从酒泉附近向东南压至二连浩特以东，同时强度稍微减弱。

## 二、模式和试验设计

### 1. 模式简介

试验所用模式 MM4 是一个三维静力平衡、可压模式，垂直坐标为  $\sigma = (p - p_t) / (p_s - p_t)$

$p_s$ ), 其中  $p_s, p_t$  分别为地面和模式顶部气压。该模式对主要物理过程的处理包括: 郭晓岚与 Anthes 的积云参数化方案, 显式对流降水方案, 高分辨边界层, 或低分辨 (Bulk) 边界层参数化, 单双向作用的套网格, 地面能量收支平衡等, 详见文献[2]。本文中取  $p_t = 100 \text{ hPa}$ , 垂直方向上分为10层,  $\sigma$  值分别为 0.0, 0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.55, 0.66, 0.77, 0.88, 0.95, 1.0, 水平范围为  $2700 \times 2700 \text{ km}$ , 网格距  $90 \text{ km}$ , 中心点位于  $115^\circ \text{E}, 38^\circ \text{N}$ 。

高空和地面观测资料由客观分析内插到网格点上, 经整层无辐散处理后, 送入模式主体积分。为节省计算时间, 除 EX6、EX7 之外, 所有试验选用了积云参数化方案, 并且全部试验均采用低分辨边界层和非套网格, 边界条件为定常。

## 2. 试验设计

表1 试验方案

试验编号	格距 (km)	方案	初始积分时间	试验内容	试验目的	说明
EX1	90	对流参数化	1986年6月26日20时	控制试验	检验模式对该个例的模拟能力	
EX2	同上	同上	同上	无凝结加热	试验凝结潜热反馈对暴雨的作用	
EX3	同上	同上	同上	无地面水汽热量通量	试验下垫面条件在暴雨中的作用	
EX4	同上	同上	同上	干燥地面	检验地表潮湿度对暴雨的影响	地面水汽利用率从0.7减小到0.3
EX5	同上	同上	同上	无沿海海面水汽提供	了解我国大陆东面水汽供应在这次暴雨中的作用	海面水汽利用率从1.0变为0.0
EX6	同上	显式降水	同上	显式降水方案	比较积云参数化和显式降水方案对暴雨的模拟效果	
EX7	45	同上	同上	细网格	试验显式方案中模式对格距的敏感性	
EX8	90	对流参数化	同上	弱低空气流	试验低空急流减弱后暴雨的发展情况	每积分一小时后, 人为地把急流强度减弱到 $16 \text{ m/s}$
EX9	同上	同上	同上	定常高空急流	试验高空对流区风速减小对暴雨所起的作用	每积分一小时后, 把急流风速人为地恢复到初始时刻的值
EX10	同上	同上	1986年6月26日08时	对比试验 (和 EX11)	作为 EX11 的控制试验	
EX11	同上	同上	同上	初始场中无西北涡	了解西北涡在这次暴雨中的作用	初始场中平滑掉西北涡流场

为了研究与这次暴雨有关的物理过程, 本文设计了11个数值试验 (见表1), 其中试验

EX1—7是从模式中所含的物理过程考虑的。EX8—11是为考虑不同天气因子对暴雨发展的影响而设计的。

EX1作为控制试验,它包括“完善”的物理过程,即对模式中包含的物理过程未作任何简化。EX2—EX5分别为检验凝结潜热(对流和非对流)反馈、地表面水汽和热通量、陆地以及海面水汽条件对暴雨的影响。在中尺度模式中,关于对流过程的处理无疑是十分重要的,尤其是用于降水的模拟时更是如此。因此,EX1—EX5试验采用对流参数化方案,EX6、EX7采用显式降水方案<sup>[2]</sup>,其优点是直接分辨积云尺度的运动(如果网格足够细)并考虑云雨转换等微物理过程。考虑到显式降水方案需要水平分辨率较高以及计算机的承受能力,EX7采用较细网格以揭示更小尺度的结构,以及模式本身对格距的敏感性(尤其用显式降水方案时)。显式降水方案较费时,所以EX8—EX11仍采用积云参数化方案。由控制试验结果可知,这次暴雨中低空急流很强,但高空急流在暴雨区一度很弱。EX8和EX9分别在积分过程中间断地减弱低空急流强度和恢复暴雨区上空高空急流的强度。这种在积分过程中改变或更新资料的方法也是四维同化中常用手段之一。EX10、EX11是检验西北涡在这次暴雨中所起作用的一组对比试验。

### 三、数值试验结果

#### 1. 模式预报揭示的主要天气过程

图1(a,b)分别给出了从26日14时至27日20时时段内6小时强降雨区随时间演变的模式预报及其实况场。其中,从26日14时至27日08时为EX10的预报结果(初始场为26日08时),从27日08时至27日20时为EX1的预报结果(初始场为26日20时)。由图可见,降水区移

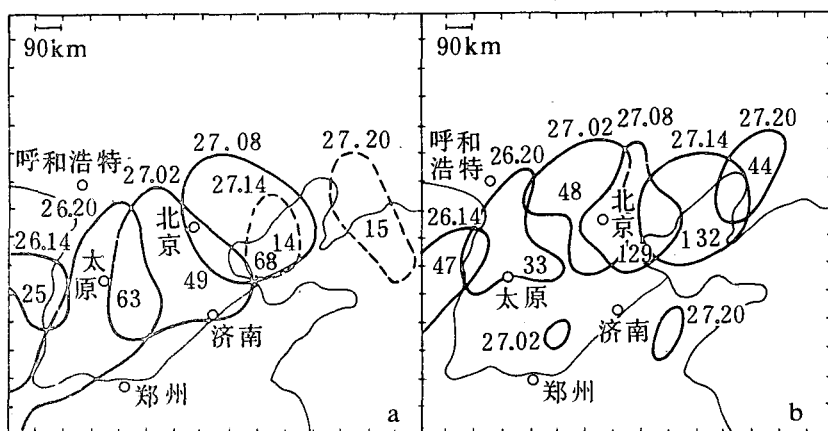


图1 6小时强降雨区的移动

(a)预报 (b)实况

(实线为20mm 虚线为10mm)

动速度和方向的预报与实况基本一致。26日14时降水位于山西南部,其后以约25km/h的

速度向偏东方向移至京津冀地区。预报的最强降水发生在27日02—08时,6小时雨量达68mm,实况雨量在该时段也很大(129mm)。27日08—14时实况雨量最强(132mm),预报降水区却减小至14mm。

本文用EX1作了27日02时和08时6小时雨量的预报,并且同实况进行比较(图略),发现预报的27日02时降水落区和中心数值与实况十分接近;中心数值只比实况大几毫米,中心位置偏离200km左右;预报的08时暴雨中心与实况相距约几十公里,最大雨量为实况的一半,雨区偏大。

降水分布和演变是大气中动力热力过程综合作用的结果。控制试验对降水落区及中心值的预报基本与实况吻合,表明模式预报的天气过程能基本描述天气实况。以下分别讨论对这次暴雨过程起作用的各种因子。

### (1)中尺度低涡与低空急流核前方辐合区合并

初始时刻(26日20时)850hPa图上西北涡位于太原附近(图略),积分3小时后,700hPa图上在北京西南约200km出现一个散度为 $-6.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的辐合中心,同时在低空急流前方,北京以北约300km处也有一个散度为 $-5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的辐合中心(图2上)。与这二个辐合中心相对应,500hPa等压面上垂直速度 $\omega$ 的分布也呈现二个上升速度中心(图2中),由此造成了地面降水的二个中心(图2下)。6小时后,低空急流向东南方向移动,北京北面的急流前辐合中心也随之向东南移动,同时强度稍微减弱( $-3.4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ )。而在北京西南的西北涡辐合中心,受西南气流引导向东北方向移动,南北二个辐合中心的距离从3小时的6个格距(540km),缩短到3个格距,并且 $-2.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 等值线已经打通。500hPa图上北面的升速中心已增强到 $-21 \times 10^{-3} \text{hPa s}^{-1}$ ,而南面的升速中心减弱为 $-19 \times 10^{-3} \text{hPa s}^{-1}$ ,同时 $-15 \times 10^{-3} \text{hPa s}^{-1}$ 线也已连通。与此相应,地面降水也连成一条具有二个中心的带状。随着急流的发展和向东南移动,9小时后二个中心已完全合并起来。合并后500hPa图上 $\omega$ 值达 $-26 \times 10^{-3} \text{hPa s}^{-1}$ ,地面降水量增大到40mm/3h。27日02—08时,6小时的实际降雨量由48mm骤增到129mm。设在北京气象中心楼顶的降水自记记录的最强降水也发生在27日03—05时,其中03—04时雨量为30.0mm,04—05时为34.2mm,可见模式(EX1)预报的二个中心合并后雨量的增大较好地反映了实际降水变化。

低涡云系和急流云系的合并过程在卫星云图和雷达回波上也很清楚。在卫星红外云图上,河套北部和华北南部的云系于26日20时—27日02时开始靠近,27日02—08时之间在京津地区合并,合并后云顶升高(云顶温度降低,图略)。设在北京气象中心楼顶的5cm测雨雷达观测到26日下午在山西中部和河北西部各有一块强回波互相靠近,并于夜间合并,合并后回波强度加强(图略)。

### (2)低空急流核移过暴雨中心附近

由用EX1预报的急流中心和强降水中心的相对位置演变(图略)可见,初始时(26时20时)急流强度较弱(16.5m/s),急流轴距强降水中心约150km,3小时后急流轴东移,其中心强度加强到19.3m/s。6小时后急流轴开始移过暴雨中心,到9小时急流中心处于雨区中心的右后方,同时雨区中心附近风速减小,因而水平风速梯度加大,辐合加强,使得500hPa上 $\omega$ 值达 $-2.6 \times 10^{-3} \text{hPa s}^{-1}$ ,成为这次降水过程中 $\omega$ 最大值。

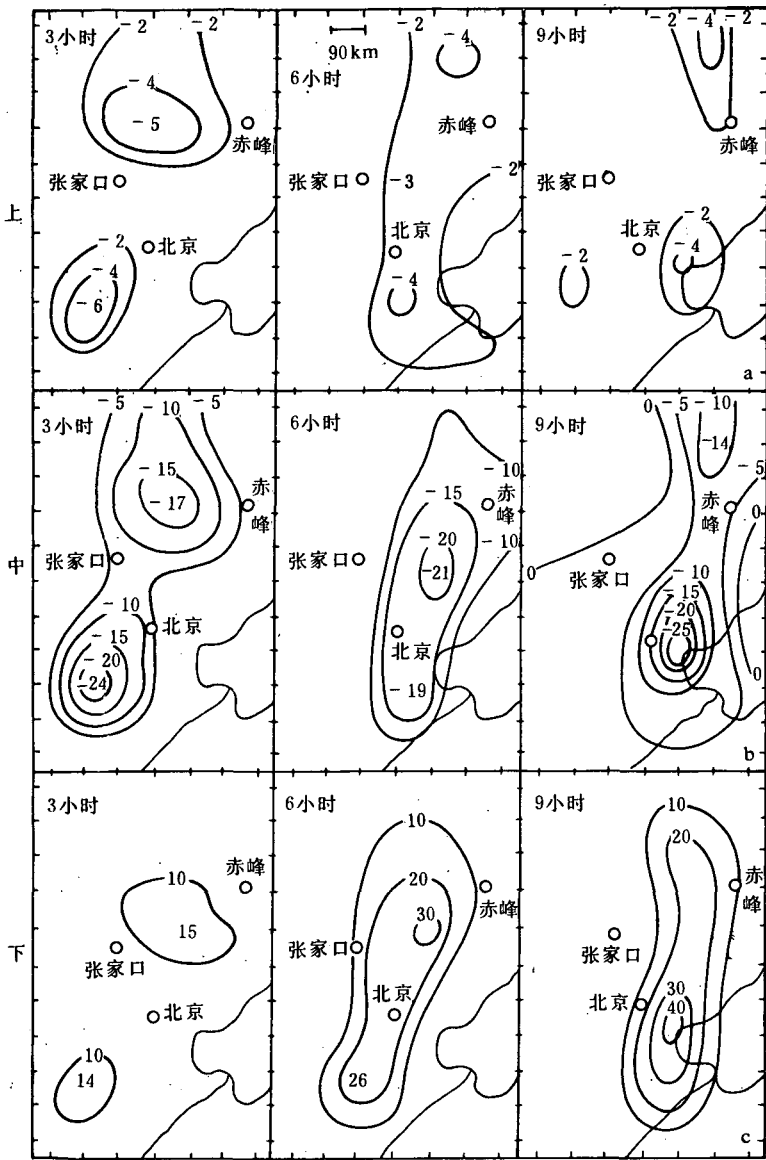


图2 EX1模拟的散度场、 $\omega$ 场和雨量场

上:积分3、6、9小时700hPa散度场( $10^{-5}s^{-1}$ )

中:积分3、6、9小时500hPa的 $\omega$ 场( $10^{-3}hPa s^{-1}$ )

下:积分3、6、9小时的3小时雨量(mm)

(3)高空对流区附近风速减小

在本次过程中(26日20时—27日08时),当雨量突然加大时,高空对流区(与地面暴雨区相对应的地区)风速明显减小,300hPa图上风速最弱时仅为12m/s。在风矢量图上(图略),初始时刻风速分布比较均匀,3小时后对流区风速开始减小,6小时后在暴雨区下游风速最小,且风向向北偏。同时在对流区下游的边缘辐散很强,达 $9.2 \times 10^{-5}s^{-1}$ 。9小时后辐

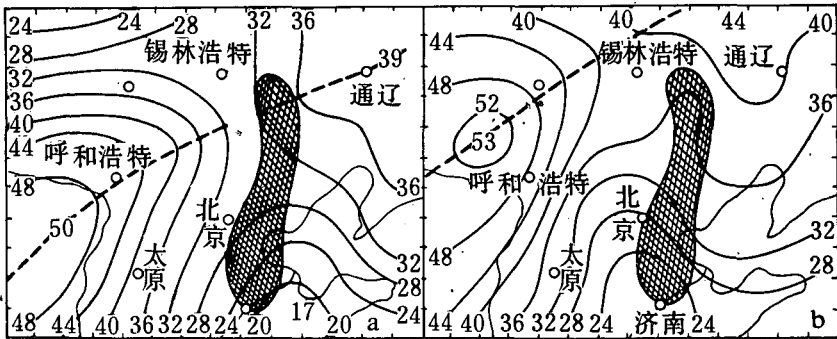


图3 200hPa急流核及强降水区附近风速( $\text{ms}^{-1}$ )的分布

(a)积分6小时 (b)积分9小时

(阴影区为3小时雨量大于20mm区,虚线代表急流轴)

散仍很明显。12小时后风速分布基本上恢复到初始时刻的均匀状态,但风速普遍增大。由于在初始时刻和积分12小时图上风速分布都比较均匀,仅在其间风速水平梯度增大,因此从时隔12小时的常规天气图上是分析不出这种现象的。

图3给出了6和9小时200hPa上急流核及强降水区附近的风速分布。由图可见强降水区位于主急流轴的右前方。但由于强降水区的风速很小,使急流轴断开,这样强降水区就处于次急流核的右后方,有利于对流加强。

### 2. 凝结潜热的影响

为了研究这次过程中潜热对暴雨的反馈作用,在EX2中不考虑凝结潜热项。图4给出了用EX2计算的6小时(图4c)、12小时(图4d)累积雨量,并与控制试验EX1(图4a、4b)比较。得到EX2计算的12小时累积雨量中心仅30mm,而EX1则为76mm,足以可见凝结潜热的反馈对暴雨雨量的影响。

此外,在EX1试验中,出现在对流区附近的风速极小区在EX2试验中就不复存在。并且与EX1相比较700hPa图上急流核风速减弱 $5\text{m/s}$ 左右,而且急流轴也未移过暴雨中心(图略)。这说明潜热的反馈作用对流场的影响也是十分明显

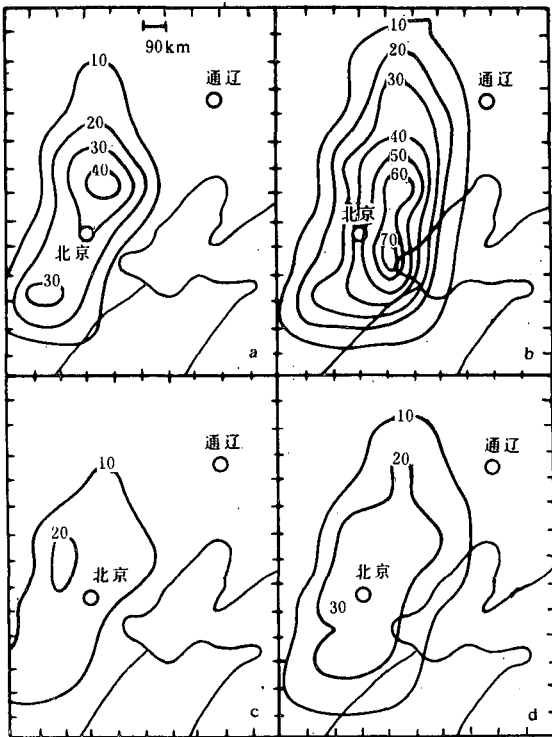


图4 凝结潜热对雨量的影响(mm)

的。

### 3. 下垫面性质对暴雨形成的影响

(EX3、4、5)

图 5 给出了无地面水汽、热量通量试验(EX3)、干燥地面试验(EX4)和无沿海海面水汽供给试验(EX5)中累积降水量随时间的变化。EX3 中前 6 小时地面通量对降水量就有明显的影响,使降水量减小约 1/3,从 6 小时直到 24 小时雨量几乎没有增加。这说明地面水汽和热量通量对这次暴雨形成也是相当重要的。EX4 中的 24 小时累积雨量比控制试验也有所减少。EX5 中的雨量与控制试验几乎完全相同,说明在这次降水过程中海面提供的水汽影响不明显

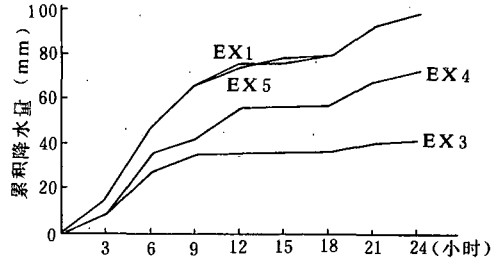
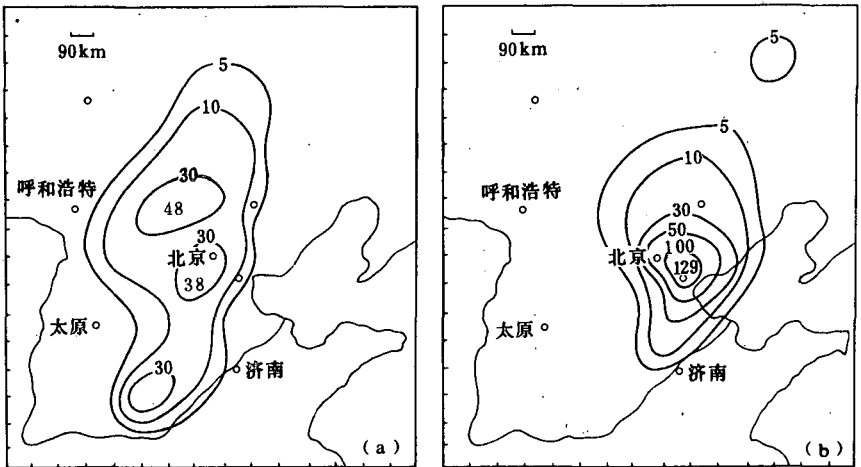


图5 EX1,EX3,EX4 和 EX5 试验中各时段累积雨量比较

### 4. 显式降水方案的效果以及云雨过程(EX6,EX7)

模式格距为 90km(EX6)预报的 26 日 20 时—27 日 08 时 12 小时的雨区范围及中心位置与实况颇为一致。但中心量值明显偏大,前 6 小时最大值为 112mm,后 6 小时达 393mm,约为实况雨量的 3 倍(图 6c,6d)。当网格距减小至 45km 时,前 6 小时预报的降水如图 6e,为 3 个降水中心:A、B 和 C,与实况(图 6a)相比,中心 A 的位置偏北,范围过大;B 和 C 分别对应于实况中的北京西北和河北南部的雨量中心。中心 B 与北京西北的雨量中心位置相近,量值比实况 48mm 只大 5mm。后 6 小时预报的降水有二个中心,南面的主中心为 154mm,稍大于实况的 129mm,中心位置偏北约 100km。北面 100mm 的次中心系为虚报(图 6f)。



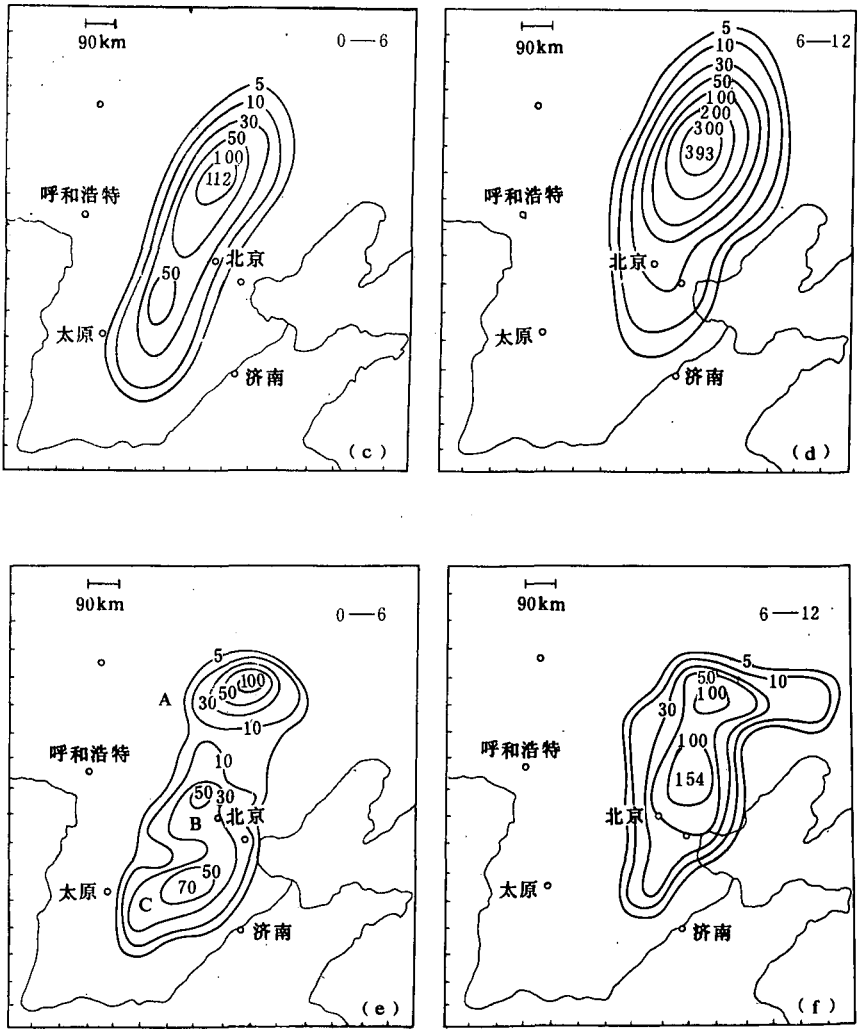


图6 EX6、EX7 预报的 6 小时雨量(mm)和实况

- (a) 26 日 20 时—27 日 02 时实况
- (b) 27 日 02—08 时实况
- (c) 26 日 20 时—27 日 02 时 EX6 预报
- (d) 27 日 02—08 时 EX6 预报
- (e) 26 日 20 时—27 日 02 时 EX7 预报
- (f) 27 日 02 时—08 时 EX7 预报

比较 EX6, EX7 和 EX1 的结果, 可以看出当格距为 90km 时, 显式方案预报的效果不如参数化方案好, (EX6、EX7 中的垂直  $\sigma$  分层与其余试验略有差别, 但影响不大) 当格距缩小到 45km 时, 显式方案的效果显著提高, 并且比参数化方案好 (45km 参数化方案的结果省略)。

显式方案可模拟云中微物理过程。图 7 给出了 EX7 积分 6 小时, 即 27 日 02 时云水、雨水、水汽凝结率、云水自动转化为雨水、雨水碰并云水和雨水蒸发的垂直剖面。可见水汽



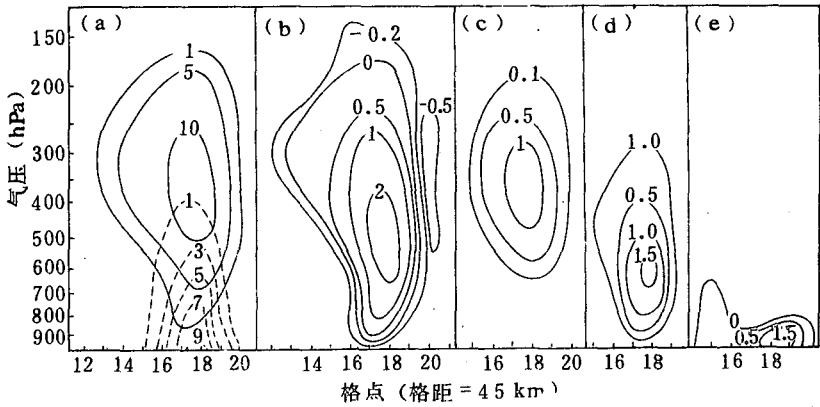


图7 EX7 预报的 27 日 02 时沿图 6e 中 A—B 垂直剖面  
 (a)云水(实线)、雨水(虚线)( $10^{-4} \text{kg/kg}$ )  
 (b)水汽凝结率( $10^{-4} \text{kg/kg/s}$ )  
 (c)云、雨水自动转化( $10^{-4} \text{kg/kg/s}$ )  
 (d)雨水碰并云水( $10^{-4} \text{kg/kg/s}$ )  
 (e)雨水蒸发( $10^{-5} \text{kg/kg/s}$ )

主要在 500hPa 附近凝结,然后由强上升气流带至 300—400hPa,在那里云水逐渐积累并通过云雨自动转化成为雨水下落,途中在云体下部由重力碰并、收集云水、雨水进一步增长而降落至地面,其中在云底以下雨水稍有蒸发。由图可见水汽凝结、自动转化和重力碰并最大值达  $1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{kg/kg/s}$ ,而雨水蒸发仅达  $10^{-5} \text{kg/kg/s}$ 。除积分刚开始 1—2 小时和云体消散后外,云内云水和雨水之间基本处于动态平衡,在云体中部最大云水含量维持在  $0.5 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{kg/kg}$ ,雨水最大为  $0.5 \sim 5 \times 10^{-4} \text{kg/kg}$ (云体下部达  $10^{-3} \text{kg/kg}$ )。

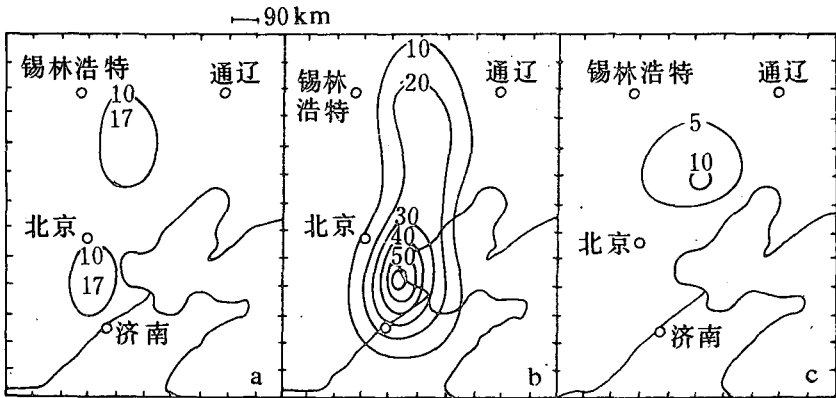


图8 EX8(a)、EX1(b)和EX9(c)计算的 6—12 小时降水量(mm)

EX7 计算的云雨结构与 27 日 00:30 观测到的雷达回波很接近(图略)。回波顶超过 10km,较强回波(20—30dbZ)顶在 5—10km 之间,预报的 27 日 00 时云顶高为 8—11km,云水最大值在 4—7km 之间。二者的分布和走向也较一致。

### 5. 低空气流、高空急流和西北涡对暴雨的影响试验(EX8, 9, 10, 11)

上述的控制试验(EX1)结果已表明:在这次暴雨过程中,低空急流加强并移过暴雨中心。在高空,与地面强降水区相对应的地区风速显著减小。为进一步试验这二个因素对暴雨的影响而设计了EX8和EX9。

EX8中的6—12小时时段雨量中心为17mm(图8a),而同一时段内控制试验的雨量中心为65mm(图8b)。EX9中的6—12小时最大雨量中心值为10mm,位于北京东北方300km处(图8c),与EX1计算所得的65mm雨量中心相对应地区雨量仅为5mm。可见高空对流区风速减少造成的强辐散对这次暴雨起了很大作用。因此,没有低空急流的加强以及高空急流在雨区附近的减弱,这次暴雨是难以形成的。低空急流在暴雨中的作用是公认的。致于高空对流区风速的减小能增大暴雨可能还因为:高空风速小,释放的潜热容易累积,形成高层暖中心,有利于第二类条件不稳定(CISK)的发展,这一点有待于进一步研究。

EX10和EX11为一组对比试验。在EX11中,西北涡的风场环流被平直的西北气流所代替,计算得到的27日02—08时的降水量分布与EX10非常近似,中心雨量达70mm,比控制试验EX10还大几毫米。说明这次暴雨中西北涡并不象人们想象的那样,对暴雨起主要作用,甚至基本上没有起什么直接作用。另外,由EX11计算的涡度场(图略)表明,从27日02时开始在850和700hPa上的西北涡的正涡度中心分裂成2个,一个向东北方向移动至二连浩特附近,另一个东移到京津地区(中心涡度达 $12 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ )。实况为26日20时之前,西北涡路径及其所产生的降水比较连续;之后,700hPa涡中心向东北移动,850hPa折向东行。在1000m高度上26日20时之前分析不出低涡系统,之后,低涡环流相当清楚。卫星云图上也是27日08时才明显地出现低涡云系特征。这说明后期的低涡可能不是前期低涡直接移过来的,而是在原来的西北涡的基础上,在700hPa以下重新发展起来的新系统。EX11的结果与文献[1,4]关于西北涡可能不是这次暴雨的主要影响系统的推想是一致的。

## 四、结 论

用移植到DPS-7机上的美国中尺度模式MM4对1986年6月26—27日京津冀大暴雨进行的数值试验表明,本次暴雨形成有以下三个重要原因:(1)低空急流核前方的辐合区与低涡合并引起垂直环流加强,500hPa上 $\omega$ 达 $-26 \times 10^{-3} \text{hPa s}^{-1}$ ;(2)低空急流核从暴雨中心附近通过,加大水平风速梯度,造成低层辐合加强;(3)高空对流区风速明显减小,以致急流轴断开,使暴雨区处于次急流核的右后方。另外,高空风速减小有利于热量积累,形成暖中心,加强高层辐散,低层辐合。

显式降水方案只有当格距较小时,预报效果才比参数化方案好,网格粗时反而不如参数化方案预报的好,使中心雨量明显偏大。

凝结加热对暴雨的形成有相当重要的作用,略去后降水量将减小约一半,低空急流减弱3—5m/s,高空对流区风速也不会显著减小。地面热量和水汽通量对降水的形成影响也

很大,由此而增加的降水约为1/3。但是曾被认为是主要影响系统的西北涡对这次暴雨的影响并不明显,初始场中无西北涡风场环流存在,对预报的降水量及其分布都没有明显变化。

致谢:余志敏提供部分降水资料。

### 参 考 文 献

- [1] 李延香,初夏罕见的暴雨,气象,第7期1987年。
- [2] Anthes, R. A., Y. H. Kou, and E. Y. Hsie, Description of the Penn. State NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4), NCAR Technical Note, NCAR/TN-282-STR, 66 pp, 1987.
- [3] Guo, Y. H. and Y. H. Kou, Testing of Newtonian nudging technique for mesoscale dynamic initialization, Workshop on Limited-Area Modeling Intercomparison, Mesoscale and Micro Meteorology Division, NCAR, 155-164.
- [4] 吴正华,华北一次双低涡暴雨的分析,气象科学研究院院刊,4,3,1989。

## NUMERICAL SIMULATION OF THE 26—27 JUNE 1986 HEAVY RAINFALL IN BEIJING-TIANJIN-HEBEI AREA

Pan Zaitao Wang Pengyun

(Academy of Meteorological Science, SMA)

### Abstract

By use of the transplanted mesoscale model (MM4) from PSU/NCAR, a strong rainfall event during 26—27 June 1986 in Beijing-Tianjin-Hebei area is simulated. The results show that the reduction in wind speed near the convective region in upper levels and passage through the rainfall center of the intensifying LLJ played crucial role in the event. The mergence of meso-low with convergence region ahead of the LLJ, feedback of latent heat release, and fluxes of heat and moisture from the underlying surface were also responsible for the event whereas the northwest low did not contribute much to precipitation.