

1997年7月19日影响北京地区的暴雨个例分析^①

毕宝贵^{1,2} 李晓莉¹ 李泽椿²

(1. 南京气象学院 大气科学系, 210044; 2. 国家气象中心)

提 要

针对在实际业务预报中经常遇到的北京地区降水的两种特殊性(明显天气系统移来时,北京地区降水明显比周围偏多或偏少),选取一个实例利用中尺度非静力模式(MM5)对降水比周围偏多情况进行了高分辨率数值模拟和敏感性试验。结果表明,该模式比较成功地模拟了此次天气过程及其相关的中尺度系统的发生发展,凝结潜热对天气过程的发生发展有重要作用,而地形在天气过程中也起着主要作用,低层潜在不稳定能量的储备和输送是暴雨发生不可缺少的条件。

关键词: 暴雨 中尺度系统 数值模拟 物理机制

引 言

暴雨和强对流天气是北京地区夏季(6~8月)主要的灾害性天气。由于它们的发生发展具有突发性,来势猛、移动快、强度大及局地性强,往往使人们来不及做好充分的应急准备,而在兴利的同时可给人民的生命、财产造成严重的损失。因此,如何有效地做好北京地区夏季灾害性天气预报,是一件有关国计民生的大事。

许多年来,气象工作者为提高暴雨和强对流天气的预报水平做了大量的工作,王笑芳等^[1]研究北京地区强对流天气短时预报方法,分析了北京地区冰雹落区与中尺度天气系统、散度场、涡度场、地面总能量及相对湿度分布的关系。何齐强等^[2]的研究表明,北京平原地区对流天气出现前地面中尺度流场有两种类型(偏南风型和偏东风型),不同类型下对流天气的分布特征明显不同。孙明生等^[3]研究了北京地区强对流天气的形成条件及其展望预报方法。此外,王迎春对北京地形对强对流降水天气影响进行了数值模拟。

前人所做的工作无疑对我们认识强天气提供了重要基础。然而,强对流天气是中小尺度现象,不仅其生成发展受到大气中各种尺度天气系统的制约和相互影响,而且,对强天气系统的识别还受到观测能力和资料分辨率的限制,因此,探索强天气系统的活动规律及提高强天气的预报能力,仍然是气象工作者面临的艰巨任务。

本文目的是:(1)用双向嵌套MM5中尺度模式对1997年7月19日暴雨个例进行高分辨率模拟,并与实况进行对比分析;(2)通过敏感性试验分析凝结潜热、地形、地表特征对降水及其相关的中尺度系统的影响和作用;(3)探讨北京地区降水发生发展的物理机制。

1 方案选择及试验设计

1.1 方案选择

本试验采用如下方案:(1)动力过程利用了非静力平衡方案;(2)显式水汽方案对模式可分辨降水进行模拟,即云水、雨水(含冰相物理过程)也作为预报量,模式不可分辨降水

^① 本文由973(国家重点基础研究发展规划)项目:首都北京及周边地区大气、水、土壤污染机理与调控原理(项目编号:G1999045700)资助。

的模拟则选用 Kain-Fritsch 对流参数化方案,行星边界层过程的模拟选择了 Blackadar 高分辨率方案,大气辐射方案采用 Dudhia 的云辐射方案,考虑长波、短波与云及晴空水汽的相互作用。模式层顶利用海绵边界条件,侧边界利用时间流入流出方案。

1.2 试验设计

表 1 汇总了所进行的 4 项试验。

表 1 4 项试验方案

试验名称	同化	城市效应	地形	凝结释热
CTRL	有	有	真实	有
DRY	有	有	真实	无
NOLAND	有	有	削平	有
NOCITY	有	无	真实	有

试验 CTRL 是一个控制试验,使用真实初始场并包含“全”物理过程,试验 DRY 与 CTRL 的唯一差别在于前者没有降水凝结释热的作用,NOLAND 与 CTRL 的唯一差别在于前者将北京附近地形削平;NOCITY 与 CTRL 的唯一差别在于前者将北京附近的城市下垫面改为耕地下垫面(在此称为城市效应)。试验 DRY 试图发现凝结释热对造成降水的作用;试验 NOLAND 试图考察降水对地形的敏感程度;试验 NOCITY 试图考察城市效应对降水造成的影响。

模式水平方向采用双向嵌套方式,外区 101×101 个格点,格距为 45km,内区 103×103 个格点,格距为 15km,垂直方向分为不等距的 25 个 σ 层,模式积分 36h。

2 大尺度分析

1997 年 7 月 19 日 08~20 时,华北地区出现了 1997 年夏季仅有的一次暴雨过程,雨量分布很不均匀,暴雨主要集中在北京和承德两地,这与它们所处的地理位置有关。图 1a 是华北地区 19 日 08~20 时的总雨量,雨带呈东北—西南走向,暴雨中心位于北京和承德地区,雨量分别为 65mm 和 53mm,这次过程是发生在 1997 年盛夏东亚大气环流反常并持续稳定的形势下。6 月下旬以来,位于乌拉尔山脉和华北地区的高压脊稳定少动,甚至有时华北高压与副高叠加,冷空气势力相当弱,致使我国北方地区长时间闷热少

雨,由于来自西西伯利亚冷空气的影响,西太平洋副高开始缓慢向东南撤。在这一过程中,中低纬度的暖湿空气在整个对流层范围内,沿副热带高压边缘的弱垂直运动区 ($|\omega| < 2 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) 向中纬度推进。西西伯利亚高压脊前有弱冷空气不断从贝加尔湖经蒙古国南下,沿副高边缘北上的暖湿空气 ($\theta_e = 90^\circ\text{C}$),在西风带弱冷空气和副高的共同作用下,在副高西北侧形成一深厚的位势不稳定的暖湿舌。500hPa 冷槽两侧的辐合和正涡度区与暖湿舌大体重合,因此,19 日 08~20 时在北京和河北造成局地暴雨。

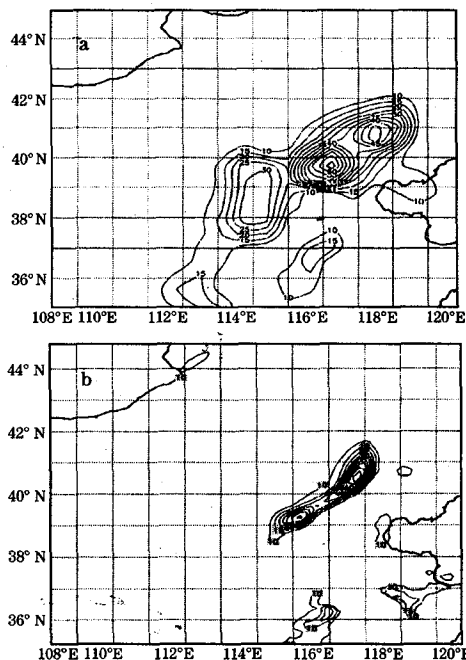


图 1 1997 年 7 月 19 日 08~20 时的 12h 实况降水量图(a)和控制试验累计降水量图(b)(单位: mm)

3 模拟结果分析

3.1 控制试验模拟结果与实况的对比检验

图 2 是控制实验 850hPa 高度场,从图 2 可以看出,这次降水的出现主要与 850hPa 中尺度低压和切变线、地面气旋的活动有关。因此,本文着重对模拟的 850hPa 环流场及地面降水进行与实况的对比检验。

3.1.1 850hPa 环流系统

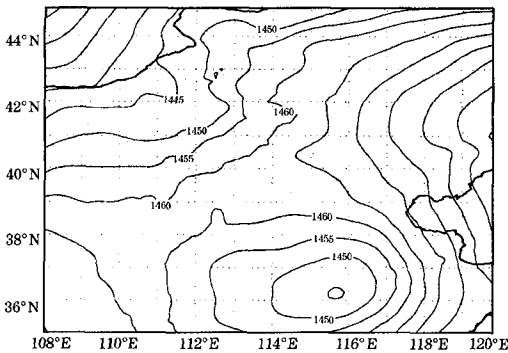


图2 控制试验 1997年7月19日08时
850hPa高度分析

从850hPa环流系统随时间演变图(图略)可以看到,在黄河中下游地区上空有一中尺度低压存在,很明显,模拟的中尺度低压同实况一样是随时间连续的向东北方向移动,并且中尺度低压不断加深,低压位置与实况也比较吻合。7月19日08时,低压中心强度1445gpm,位于河南安阳附近,19日14时,中心强度1440gpm,位于山东德州,而19日20时,低压中心北跳到北京附近,中尺度低压发展到鼎盛时期,强度为1435gpm。地面气旋也与850hPa的中尺度低压一样,随时间不断加深,并沿偏北路径向北京移动,气旋北部的偏东风,将黄海、渤海的水汽输送到降水区,到19日20时气旋移到北京附近,北京已不再吹偏东风,切断了水汽来源,宣告北京降水结束。这说明850hPa中尺度低压可能在这次降水过程中起着比较重要作用,它不仅将渤海的水汽输送到降水区,而且在降水区的低层造成强烈的辐合。MM5模式比较准确地模拟出切变线北侧东南风的明显增强,它是切变线加强的主要标志,同时嵌于切变线上的中尺度低压环流及低压中心模拟也比较清楚。另外,对切变线北侧冷空气向南扩散(冷平流)的描述与实际情况比较符合。

3.1.2 地面降水

对比降水实况(图1a)与12h模拟结果(图1b)不难看出,MM5比较成功地模拟了降水落区和落点在雨区中的相对位置以及暴雨的强度,模式不仅给出了与实况相近的大于50mm降水的分布,还模拟出60mm的

12h最大降水量(实况值为65mm)。同时,也报出了河南北部、山东南部以及河北北部的5~20mm的弱降水。模拟的暴雨区出现在模拟的850hPa层中尺度低压和切变线附近,特别是模拟的暴雨位置与中尺度低压环流相对应,这说明850hPa层中尺度低压和切变线的活动与暴雨的发生发展是相联系的,但是模拟降水大于10mm的区域比实况小,实况有大于30mm的三个雨量中心,模拟结果只有两个,北边两个中心合并成一个,尽管雨量与实况很接近。如果模式的水平分辨率再高些,可能会将北边的两个雨量中心模拟出来。

3.2 敏感性试验结果及分析

3.2.1 凝结释热的作用

凝结释热不仅在热带系统而且在中纬度系统的发展过程中起一定的作用。本次暴雨过程所释放的凝结潜热对暴雨的产生和低层中尺度低压及其环流的演变产生的影响可以通过“干”、湿模拟结果的差异来反映,比较试验CTRL和DRY可以发现,在没有凝结释热作用时,850hPa的中尺度低压和切变线很弱,并且不能得到发展,相应的地面降水也明显减弱(图略),不仅雨区的中尺度结构特征以及暴雨没有被模拟出来,而且雨带的走向也与实况相差较大。由此可见,凝结释热在这次暴雨过程中可能起重要作用,没有凝结潜热的参与,低层中尺度低压及其环流将不能发展,暴雨也不可能产生。

图3给出控制试验模拟的温度、风与“干”模式的温度、风之差的垂直分布,从图3可以看出,附加的垂直环流在850hPa层中尺度低压中心南侧上升,而在离中尺度低压约200km处下沉,增加了暴雨区的低层辐合和高层辐散,加大了上升运动。增强的低层辐合一方面加大了边界层水汽辐合,另一方面加强了中尺度低压环流和促进低压南部西南气流的加强,更迅速地向暴雨区补充水汽。而加速辐合上升的水汽凝结又导致进一步的加热作用。如此循环形成了一个正反馈发展机制。

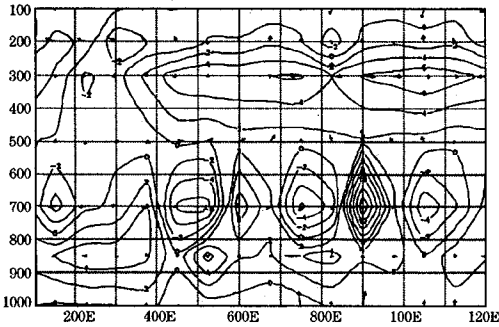


图3 控制试验模拟的温度(°C)、风与“干”模式的温度、风之差的垂直分布图

3.2.2 地形的作用

北京所处的地理环境很特殊,东南是平缓地向渤海倾斜的平原,西靠太行山余脉,北有燕山和军都山,从西向东,地形分布依次为山地、丘陵和平原,海拔高度从二千多米降到几十米,山地和平原之间过渡急剧,界限清晰。地形的复杂多变造成了北京地区天气状况的多样性,特别是暴雨等强对流天气,由于其尺度小,生命史较短,形成的物理机制复杂,对他们的准确预报难度很大。在不考虑地形影响时(北京附近高度取为100m),低层偏南气流减弱,北京南边的辐合线已不复存在,取而代之的是北京西面和北面的迎风坡有弱辐合线,并出现了弱降水,而北京没有出现任何降雨(图略)。模式加入地形后,诊断区内的偏北气流减弱,偏南偏东气流加大,在平原与山脉交界的地方出现一条由地形造成的沿山脉走向的辐合线。这说明,地形可能在这次降雨过程中起主要作用。

3.2.3 地表特征的作用

近年来,北京地区经济发展很快,城区不断扩大,试验 NOCITY 就是试图检验地表特征的改变(将北京附近的城市地表特征改为耕地的地表特征)对这次降水的影响。从19日08~20时的无城市效应的降水量图(图略)可以看出,雨区与控制试验几乎一致,雨强略有减小,但幅度不大,这说明这次降水可能主要以动力抬升为主,地表热力作用并不敏感。

4 控制试验诊断分析

4.1 能量分析

4.1.1 低层次天气尺度的能量系统

通过等压面湿静力总温度场的分析发现,在19日08时850hPa的 T_e 形势图上(图略),从安康经延安到东胜一线,有西南—东北向的高能舌,其两侧各有一自北向南伸展的低能舌相配置,形成了一次天气尺度的“Ω”形高能舌,北京的总温度随时间增加。到19日20时,本区处于高能舌内,南北两侧各有一能量锋区。能量锋同时具有位势不稳定和斜压不稳定属性,是大气中湿斜压不稳定能量集中的区域,夏季强天气常与这种湿斜压扰动的“Ω”形高能区有关。19日本区正是受此高能舌南压的影响而发生了暴雨天气。图4是19日08时总温度沿116°E的纬度—高度剖面图,由图可看出,低层的总温度形势分布特点是北低南高,在保定附近的低层有一上拱高能舌,高层有一下垂高能舌与之对应,中层为相对低能区。

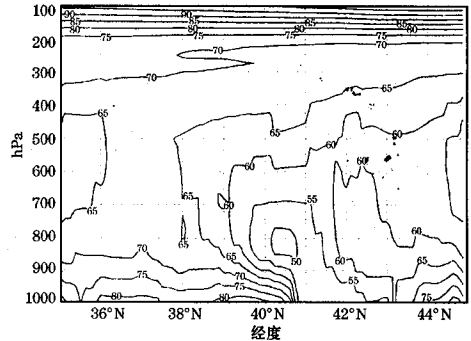


图4 1997年7月19日08时总温度沿116°E的纬度-高度剖面图(°C)

4.1.2 低层能量的输送和积聚

①总温度平流:采用公式 $\nabla \cdot \mathbf{V} \cdot T_e$ 计算了19日08时850hPa的湿静力总温度平流场,北京附近强度约为 $15 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这反映了本区在暴雨发生之前低层有较强的水平能量输送。

②总温度通量散度:有无不稳定能量向本区输送固然重要,而输送来的能量能否在本地区积聚则显得更为重要。只有当低层既有不稳定能量的输送,同时有不稳定能量的积聚时,才对发生强对流天气更为有利。总

温度通量散度可以反映能量的频散与积聚。故此采用公式 $\nabla \cdot (\nabla T_e)$ 计算了19日08时的湿静力总温度通量散度场,结果表明:08时本区 $\nabla \cdot (\nabla T_e)_{850}$ 为 $-50.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,这说明本区低层在暴雨发生前有较强的能量积聚。

4.2 涡度、散度、垂直速度和水汽通量散度的配置

4.2.1 水汽条件分析

19日08时,850hPa图上有两支气流,一支来自西南,另一支来自东南。它们分别把孟加拉湾和渤海、黄海的水汽带到华北。在西南风和东南风的共同输送下,10g/(cm·hPa·s)的水汽通量等值线伸展到冀鲁及京津一带,最大水汽通量值为16.8g/(cm·hPa·s);19日14时,随着850hPa的中尺度低压的北移,东南风向北推进,此时,这股低空东南急流已成为这次暴雨的主要水汽输送通道。水汽输送虽然是降水的重要条件,但这种源源不断的水汽输送能否在某个区域集中起来是更为值得注意的,为了考虑暴雨期间水汽的集中情况,计算了暴雨区上空的水汽通量散度。结果得到,19日08时和14时,该区850hPa等压面上水汽通量散度值分别为 -5.0×10^{-8} 和 $-80.0 \times 10^{-8} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,并与地面的饱和水汽区相对应。这说明不但有水汽向暴雨区上空输送,而且有水汽在该区辐合,为暴雨的产生提供了必要的水汽条件。

4.2.2 热力条件分析

本文采用 θ_{se} 分布来探讨这次暴雨的热力条件。从7月19日08时 θ_{se} 沿116°E的纬度-高度分布图(图略)可见,从东南向西北的暖湿空气与从西北方南下的干冷空气交汇于华北一带,形成一条东北—西南向的等 θ_{se} 密集带,此即能量锋区,该处蕴藏着可供中尺度对流活动所必需的不稳定能量,暴雨区处于 θ_{se} 等值线密集带南侧的高 θ_{se} 区中。

4.2.3 动力条件分析

从北京单站散度时间—高度剖面图(图略)可以看出,暴雨发生时,北京上空700hPa

以下低层为正涡度,最大值为 $19.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,出现在850hPa层,700hPa以上为负涡度;与之相对应,散度从地面到600hPa为辐合,无辐散层在600hPa,上层为辐散,最大辐散层在200hPa高度上,散度值为 $7.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$;对应400hPa以下为上升运动,其上为下沉运动,最大上升运动出现在700hPa层, w 值为 $0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由控制试验850hPa垂直速度沿40°N的经度-时间剖面图(图5)和涡度、散度时间变化图(图略)可以看出北京地区19日08~20时具有正涡度和水汽辐合,最大值出现在大约14时,与实际出现降水的雨强相当一致,19日20时以后,虽然具有正涡度,但水汽是辐散状态,上升运动减弱,本次降水过程结束。这次过程中,暴雨区上空涡度、散度和垂直速度与通常暴雨发生时三个物理量的分布特征不同,各物理量的水平分布十分不均,深厚的湿层、低层较强的辐合和上升运动在北京上空最大。而北京以外的地区都较小,由此不难理解,在北京的有限地区发生了暴雨天气。

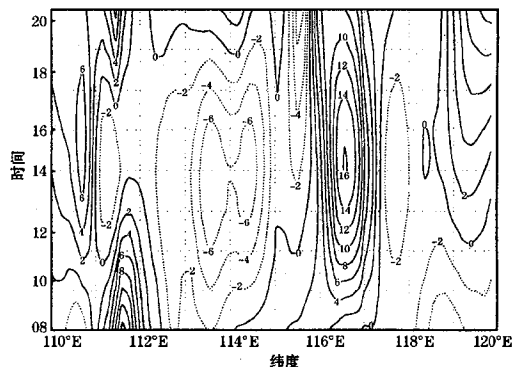


图5 控制试验850hPa垂直速度沿40°N的经度-时间(1997年7月19日08~20时)剖面图
单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,作图时放大 10^2 倍

4.3 稳定度分析

位势不稳定判据用 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} < 0$ 表示,取 $\Delta \theta_{se} = (\theta_{se})_{500} - (\theta_{se})_{850}$ 作为位势不稳定的量度。在暴雨临近和暴雨期间,北京 $\Delta \theta_{se}$ 均为负值(图略),这说明暴雨区低层暖而潮湿,

上层则较冷而干燥,为对流不稳定。也就是说,低层暖湿空气向北输送和中层干冷空气的入侵是形成暴雨区位势不稳定层结的主要原因。

5 预报着眼点

综合上述,可得到北京地区暴雨和强对流天气预报的主要着眼点:

(1)熟悉北京地区的特征地形,了解北京地区与影响天气系统的相对位置,是处于槽前西南气流还是槽后西北气流以及其垂直结构是否有利于北京地区强对流天气发生。

(2)分析各种物理量场的分布特征、量级及其组合是否有利于北京地区强对流天气发生。

(3)分析北京上游地区物理量场特征及其垂直分布和影响系统的移动路径,特别注意在低层暖湿平流的上方是否叠加中层干冷平流,注意它们和北京的相对位置,是否正面侵袭北京地区。

(4)分析高、低层散度特征及其垂直配置,注意高空急流的位置及其动力特性,考察是否能建立低层辐合和高层辐散的机制,以利于强对流天气的形成发展。

6 主要结论

通过对1997年7月19日北京地区暴雨天气过程的数值模拟以及敏感性试验,检验

了MM5中尺度模式的预报能力,并探讨了这次暴雨发生发展的物理机制,可以归纳以下几点结论:

(1)这次暴雨过程是在迎风波的影响下,动力抬升和对流凝结潜热释放形成正反馈来促成北京地区出现暴雨。

(2)地形在该天气过程中起着主要作用,没有地形的作用,就没有迎风波和背风波的产生,也就没有北京地区降水的特殊性之存在。

(3)地表特征在天气过程中起着一定的作用,有利于低层能量的积累和降水的增加。

以上结论只是通过对个例数值模拟分析得到的,它对我们进一步理解和认识北京地区降水发展机制及特殊性有一定启发作用,也为改进和作好北京地区降水的数值预报提供了一些有意义的线索。然而,这些结论是否具有普遍性,还需要作理论研究和更多的实例来证实。

参考文献

- 1 王笑芳,丁一汇.北京地区强对流天气短时预报方法的研究.大气科学,1994,18(2):173~183.
- 2 何齐强,舒懿勋.北京地区飊线和强雷雨过程分析.空军气象学报,1996,17(4):311~319.
- 3 孙明生,汪细明,罗阳等.北京地区强对流天气展望预报方法研究.应用气象学报,1996,7(3):336~343.

Heavy Rain Affected Beijing Area: A Case Study

Bi Baogui^{1,2} Li Xiaoli¹ Li Zechun²

(1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044;

2. National Meteorological Centre)

Abstract

A special weather event over Beijing is simulated, and a series of sensitivity experiments are carried out using a nested grid version of PSU/NCAR's mesoscale model(MM5) with a fine mesh grid size of 15km. It is shown that the MM5 model reproduces successfully the development of the weather process and its relevant mesoscale systems, that latent heat release acts a vital role in the development of the windward waves weather case, that responses to topographic forcing is rather sensitive; and that the store and transportation of the low-level potential unstable energy over Beijing are crucial conditions for the formation and intensification of convection.

Key Words: heavy rain mesoscale system numerical simulation physical mechanism