

# 地形对“00.7”北京特大暴雨过程影响的数值研究\*

张朝林<sup>1</sup> 季崇萍<sup>1</sup> Ying-Hwa Kuo<sup>2</sup> 范水勇<sup>1</sup> 轩春怡<sup>3</sup> 陈敏<sup>1</sup>

1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089;

2. MMM Division, NCAR, P. O. Box 3000, Boulder, CO, 80307-3000, USA; 3. 北京市气象局, 北京 100089

**摘要** 针对2000年7月4—5日北京地区的一次特大暴雨过程(24 h降水量达240 mm), 利用MM5/WRF三维变分系统, 对地基GPS大气水汽监测资料、地面自动气象站和常规气象观测资料进行了同化分析; 然后以分析结果作为MM5v3.6模式初值对此过程进行了模拟. 分别以1, 5, 10和20 mm作为降水量客观检验阈值, 模拟区域内的测站24 h降水TS评分依次高达0.72, 0.76, 0.67和0.63. 基于以上对照试验, 在总体保持模式大气下边界地形与地理分布特征, 尽可能不改变初始时刻模式大气的动力和热力协调性的原则下, 进行了不同地形分辨率(分别约为110, 50和3.7 km)对降水影响的敏感性试验, 研究表明, 北京独特的地形特征和复杂的地势变化对此次降水的强度和落区有重要影响.

**关键词** 地形 暴雨 变分同化 地基GPS 数值试验

干旱缺水是北京市的主要自然灾害, 已成为制约北京影响群众生活和经济建设可持续发展的重要因素. 在北京地区, 暴雨直接影响水资源收支状况, 暴雨量在年降水量中占有显著地位, 暴雨日数的多寡直接影响到北京年降水量的丰枯与水库来水量的多少<sup>[1]</sup>. 研究影响北京空中水资源分布的各种主要因素, 无疑具有重要的现实意义.

北京面山背海, 地形复杂, 地处山地与平原的过渡带. 1978—2000年的降水资料分析表明, 北京地区年平均降水量与夏季降水量均具有西部山前迎风坡一带(密云、怀柔、房山)是多雨区, 山后背风区为少雨区的地理分布特征. 针对北京地形作用, 孙继松等开展了地形雨落区与气流垂直分布关系, 地形对夏季冰雹时空分布影响方面的天气学研究, 取得了初步成果<sup>1,2)</sup>.

基于数值变分初值分析结果开展地形对强降水

影响的数值研究, 存在两方面难点. 一是因初值对结果有非常重要的影响. 在研究地形对短期数值天气预报的作用时, 一方面需要在初始时刻针对模式地形进行的改变要足够大, 足以体现地形对模拟的真实影响; 另一方面也要求因初始地形改变而引入的初始虚假气象噪音要足够小, 不会明显改变初始时刻模式大气的动力和热力协调, 进而对模拟结果引入虚假的地形作用; 二是采用先进的初值变分同化方法, 地形对天气模拟或预报的影响一方面体现在背景场误差协方差矩阵的分析与计算结果中; 另一方面与传统分析方法一样, 作为模式大气的下边界条件, 对预报或模拟过程直接产生复杂的热力和动力影响. 基于较传统客观分析结果更优的三维变分数值同化初、边值, 如何设计合理的数值试验方案进行地形影响研究, 仍有待开展.

近年来, 虽然在大地形及其分布特征对短时强

2004-07-28 收稿, 2004-10-09 收修改稿

\* 北京市2001—2004年度科技新星计划(合同号: H013610330119), 北京市科委(合同号: H010510120119; H020620250330)和国家科技部(合同号: 2002BA904B05)联合资助项目

E-mail: c\_lzhang@yahoo.com

1) 孙继松, 地形雨落区与气流的垂直分布(待发表)

2) 孙继松, 石增云等, 地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究(待发表)

降水天气过程影响的数值研究方面,国内外都有所进展,并取得了一些有价值的成果<sup>[2,3]</sup>;但以前的工作一般是通过把一定研究范围内的模式地形降低(或去除),或增加到一个统一的取值,通过比较数值积分结果差异来研究地形影响,这种数值方案设计难于保持模式地形与真实地理与地形分布的协调,会对初始模式大气的动力和热力协调形成较大影响.如何设计在总体保持模式大气下边界地形与地理分布特征,尽可能不改变初始时刻模式大气的动力和热力协调性的数值试验,也仍是一个有待深入尝试与研究的问题.

本文利用 MM5/WRF 3DVAR 三维变分同化分析结果作为 MM5 模式初值,对北京地区 2000 年 7 月 4—5 日简称“00.7”特大暴雨过程进行了 24 h 模拟.基于此对照试验,在总体保持模式大气下边界地形与地理分布特征、尽可能不改变初始时刻模式大气的动力和热力协调性前提下,进行不同地形分辨率影响的敏感性试验,研究了地形对暴雨发生发展的影响.此研究对解决地形影响数值研究中的上述两方面难点提供了借鉴.对改进精细数值预报,作好北京奥运气象保障与服务具有参考价值.

## 1 三维变化同化系统与数值试验方案简介

### 1.1 MM5/WRF 3DVAR 同化系统

使用的 MM5/WRF 3DVAR 三维变分同化系统是 2003 年 6 月发布的最新版本(V1.3.0, Jun. 2003 UCAR)<sup>[4]</sup>.其框架针对 MM5(PSU/NCAR)中尺度数值预报系统和美国正在发展的新一代 WRF 模式系统开发,可直接应用于 MM5 和 WRF 模式的数值预报变化同化分析与研究.由于系统对计算机性能要求不高,计算时间远较四维变分同化系统小,因此其不仅可广泛应用于气象科学研究;而且还具有很好实用价值.在我国,张昕和王斌等曾对此系统的早期版本 MM5 3D-Var 1.0 系统进行过成功的改造移植,并对 1998 年 7 月 20 日发生在武汉的特大暴雨进行了数值模拟中的三维变分资料同化研究<sup>[5]</sup>.

针对北京地区应用和研究需要,主要进行了以下工作:(1)对北京及周边地区的地基 GPS 水汽监

测资料、无线电探空、高空测风、地面常规观测和地面自动气象站观测资料进行预处理开发,实现了各种观(遥)测数据格式对 MM5/WRF 3DVAR 系统的支持;(2)利用 2000 年 7 月期间,MM5V3.6 模式在每一模式日相同时刻的 24 h 预报与 12 h 预报输出,采用 NMC-method 方案<sup>[6]</sup>求气候意义上的背景场协方差矩阵,MM5 初始边界条件用同化分析结果作进一步的更新;(3)根据北京及周边地区测站的气候特征和实际观测,对 NMC-method 计算方案求出的背景场水平影响特征尺度作了适当调整.

### 1.2 模式

试验利用 MM5(V3.6, PSU/UCAR)中尺度模式进行.具体设计如下:采用非静力平衡动力框架,预报区域中心为(40°N, 116°E).水平格距 10 km,南北向取 67 个格点,东西向取 81 个格点,垂直方向为  $\sigma$  坐标,取 23 层.时间积分步长取 30 s.主要物理过程为:Dudhia 简单冰显式降水预报和 GRELL 积云对流参数化方案, MRF 行星边界层方案, Dudhia 云辐射方案,采用张弛流入流出侧边界和下垫面五层土壤参数化方案.侧边界条件由国家气象中心 T106 全球模式预报场提供,每 12 h 更新.有关模式的详细介绍可参看文献<sup>[7]</sup>.

### 1.3 数值试验设计

**1.3.1 试验个例** 在 2000 年 7 月 4 日 00 时—5 日 00 时(GMT)期间,北京地区发生当年夏季强度最大的特大暴雨降水过程.北京地区门头沟 24 h 累积降水量高达 240 mm(图 1(a)).对此个例,我们已深入进行过评估数值同化地基 GPS 大气水汽监测站、地面自动气象站和其他常规观测站网监测资料对降水模拟影响的研究,客观检验方法与分析结果均表明了三维变分同化方法与各种大气观(遥)测资料对改进降水模拟的贡献<sup>[8]</sup>;因此本文将着重研究地形对降水影响的热力和动力作用.

**1.3.2 试验方案设计** 根据在总体保持模式大气下边界地形与地理分布特征,尽可能不改变初始时刻模式大气的动力和热力协调性的原则,同时考虑 MM5/WRF 三维变分数值同化方法的特点和开展地形影响研究的需要,数值试验方案作如下设计:

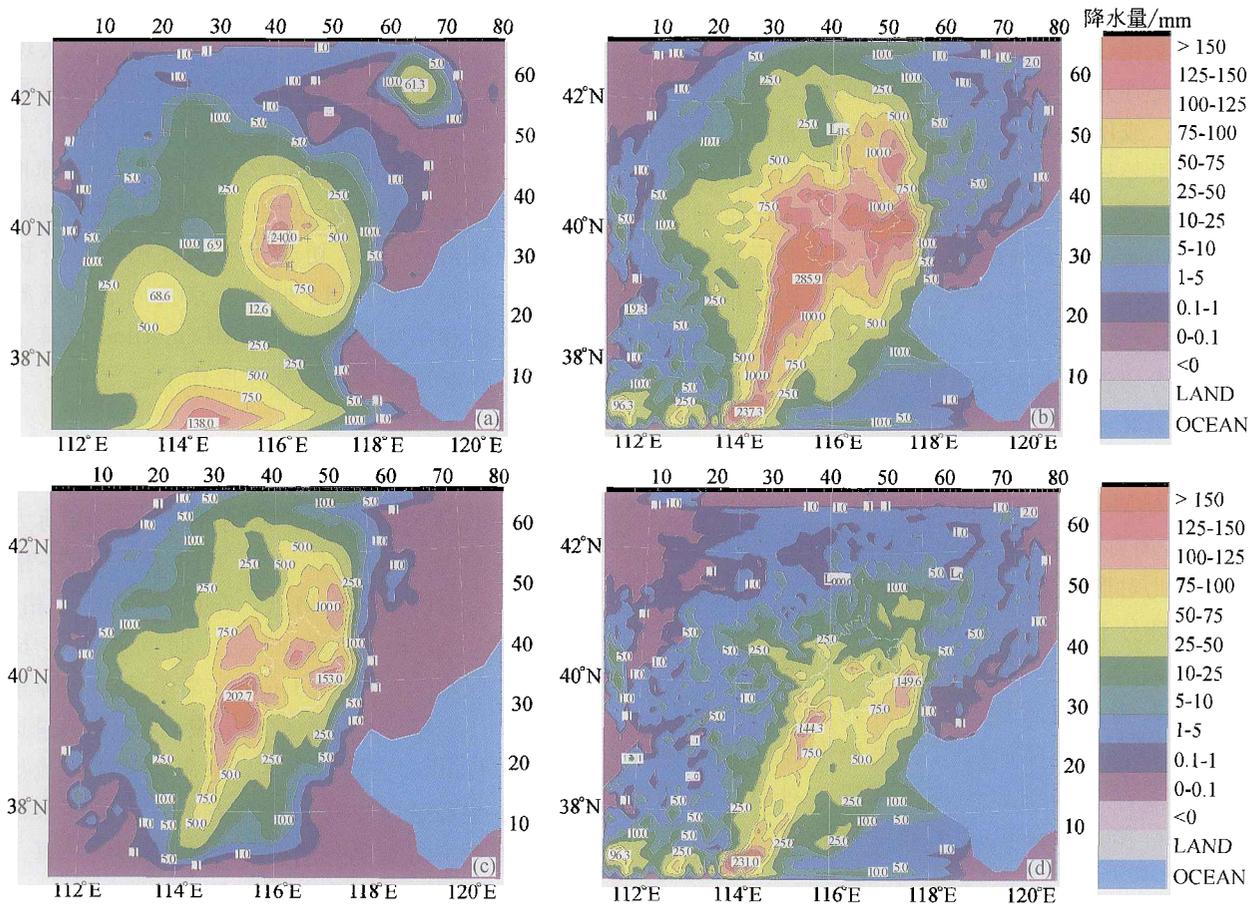


图1 2000年7月4日00时至5日00时(GMT)24h降水实况与试验A模拟分布(单位: mm)

(a) 实况; (b) 试验A总降水; (c) 试验A显式方案降水; (d) 试验A积云参数化降水

对照试验(试验A): 针对试验个例, 采用 $2'$ 经纬网格分辨率(约 $3.7\text{ km}$ 格距)的模式地形资料和 $10\text{ km}$ 水平网格分辨率, 利用MM5/WRF 3DVAR 三维变分系统, 对7月4日00时(GMT)北京及周边地区的地基GPS大气柱水汽含量监测资料(10个站)、无线电探空(6站)、高空测风(4站)、地面常规观测和地面自动气象站观测(308站)资料进行数值同化分析; 然后以同化分析结果作为MM5模式初值, 并用同化结果对初始边界条件进行更新, 由国家气象中心T106全球模式的12, 24和36h预报场提供每12h更新的侧边界条件, 对“00.7”暴雨进行24h模拟。

敏感性试验(试验B和试验C): 首先基于试验A的成功模拟, 用试验A在模式垂直 $\sigma$ 坐标系下的三维变分同化初值分析结果, 通过等 $\sigma$ 面向等 $P$ 面进行垂直插值, 获得新的等压面资料, 提供敏感性试验所

需的初值信息; 然后分别在模拟初始时刻引入 $30'$ (地形分辨率约 $55\text{ km}$ )和 $1'$ (地形分辨率约 $110\text{ km}$ 格距)的另外两种模式地形信息, 结合前面处理产生的初值资料, 通过等 $P$ 面向模式等 $\sigma$ 面垂直插值, 新生成两种不同的模式初、边值场, 再使用与试验A一致的每12h边界更新方法, 分别进行24h降水的模拟试验(其中, 简称引入 $30'$ 模式地形信息的前一试验为试验B, 引入 $1'$ 地形信息的后一试验为试验C)。

通过对比分析试验A、试验B和试验C下的模式地形差异与数值结果, 研究地形对北京暴雨发生发展的热力和动力影响。

## 2 分析与讨论

### 2.1 对照试验结果检验

在试验A下利用地面测报值与自动气象站降水

观测作为实况进行的测站降水 TS 评分, 分别以 1, 5, 10 和 20 mm 作为检验阈值, 模拟区域内的 24 h 降水 TS 评分依次高达 0.72, 0.76, 0.67 和 0.63; 1 和 5 mm 评分阈值下的各 6 h 模拟时段的 TS 值, 除最后 6 小时模拟时段相对略低外, 平均水平在 0.7 左右. 表明对“00.7”特大暴雨的降水量、落区和起始时段模拟, 试验 A 均取得了令人满意的结果.

图 1(a)–(d) 分别给出了 24 h 降水量实况、试验 A 模拟的总降水、显式方案降水和 Grell 积云参数化降水分布. 从图 1(a) 可见, 模拟区域内实况降水主要呈东北-西南带状分布, 其中主要有两个大暴雨中心, 一个位于北京, 24 h 降水最大值达 240 mm (北京西部门头沟区自动气象站观测); 另一个中心位于模拟区域的南边界附近, 中心值为 113 mm (河北邢台常规气象站观测). 对比图 1(a) 和 (b) 可见, 试验 A 对降水型态分布和以上两个最大暴雨中心的模拟都取得了令人满意的结果. 在北京西南方, 模拟的 24 h 降水达 285 mm, 位置与强度都与北京的实况观测 (240 mm) 相接近. 对河北邢台地区暴雨的位置模拟很成功, 但中心值达 237.3 mm, 与邢台观测 138 mm 相比相差较大. 这可能与北京有密集的自动气象站观测网, 而其他地区只有常规地面与高空观测有关. 即河北邢台的实况能表明了暴雨过程的客观发生, 但其量值却有可能没有代表此附近的最大降水. 比较图 1(b)–(d), 结合实况 (图 1(a)) 进一步说明, 北京地区模拟的暴雨分布与强度主要决定于 10 km 水平分辨率下的简单冰显式降水模拟, Grell 积云参数化物理方案贡献较小. 而在河北邢台邻近区域的暴雨模拟基本上是 Grell 参数化方案的贡献. 分析北京雷达观测和日本静止卫星 Tbb 图 (图略) 资料表明, 北京区域的暴雨过程主要受小尺度强对流活动影响, 同时受更大尺度范围内的较弱对流系统叠加而增强. 而河北邢台邻近区明显是一中尺度对流系统影响的结果. 这与试验 A 模拟结果是一致的.

## 2.2 地形分布特征

由图 2(a) 可见, 试验 A 下的模式地形细致反映出了北京西、北和东北群山环绕, 地势西北高、东南低, 在北京地区形成一个向东南展开的半圆形大山弯的地理特征 (“马蹄型”分布). 尤其是对北京

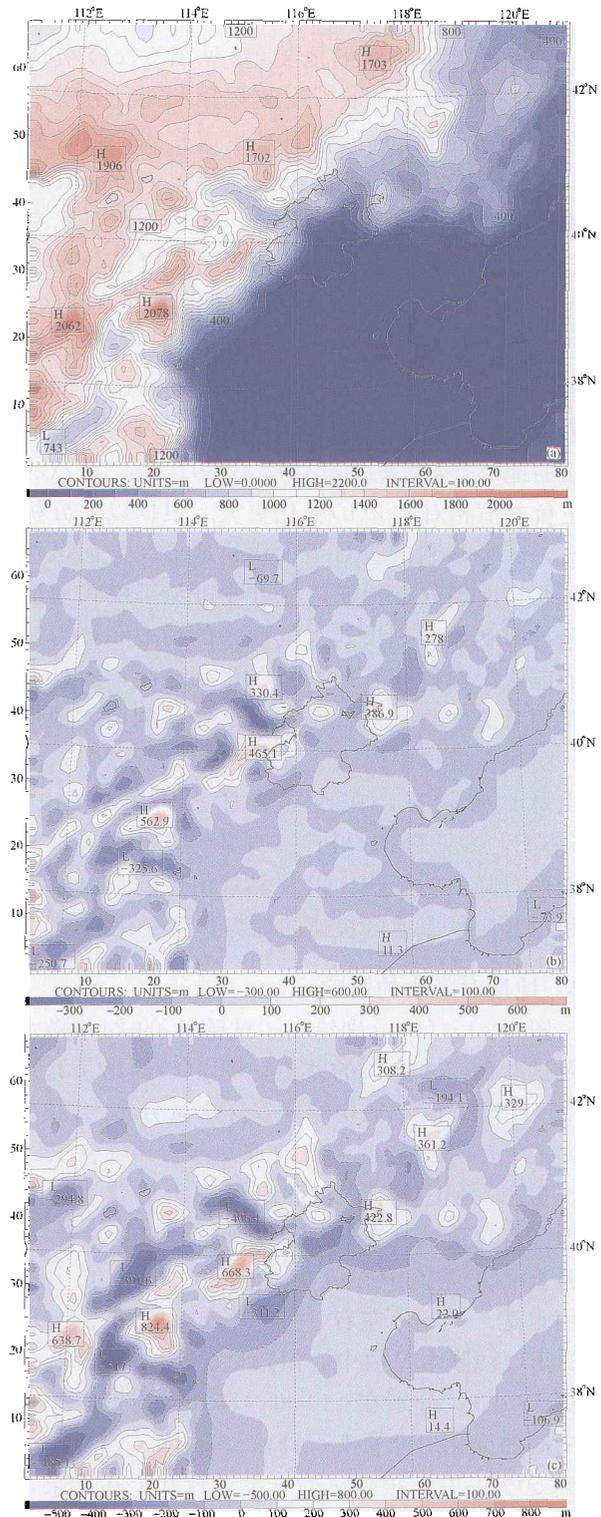


图 2 对照试验地形分布特征及其与敏感性试验的模式地形差值分布 (单位: m)

- (a) 试验 A 模式地形; (b) 模式地形差异 (试验 A-试验 B);
- (c) 模式地形差异 (试验 A-试验 C)

山区地形的起伏和山区向平原地区复杂的高低梯度变化,都与实际的地形地貌(参见图3(c))吻合较好。由于试验B和试验C分别采用和两种分辨率较粗的全球经纬等距地形资料来生成模式地形,所以试验A与试验B,C下的模式地形差值分布具有明显的共同特征(分别见图2(b),(c)),即在北京东南方向平原地区差值很小,主要的差值区分布在北京西南部的整个太行山脉和北部的燕山山脉区域,并且差值中心呈明显的小尺度多中心分布。在模拟区域内的正差值中心值平均在300—600m之间,负差值中心值平均在200—500m左右。只是因试验C采用的地形分辨率( $1^\circ$ )比试验B( $30'$ )粗,图2(c)中的正负差值相对图2(b)变化更大。根据以上分析可看出,试验B和试验C下的模式地形一方面虽然保持了北京地理分布特征,尽可能避免了模式地形方案差异对初始时刻模式大气原来的动力和热力协调性的虚假影响;但另一方面在北京地区,通过在初始时刻考虑试验A、试验B和试验C的模式地形差异,明显在模拟中引入了北京西南、西北和东北部的山脉地形较高,在西部官厅水库附近( $40^\circ\text{N}$ ,  $115.8^\circ\text{E}$ ,参见图3(c))有一明显的较低地势过渡区的地形对降水的影响,以及北京山区地形复杂的起伏和山区向平原地区快速的地势梯度变化的作用。

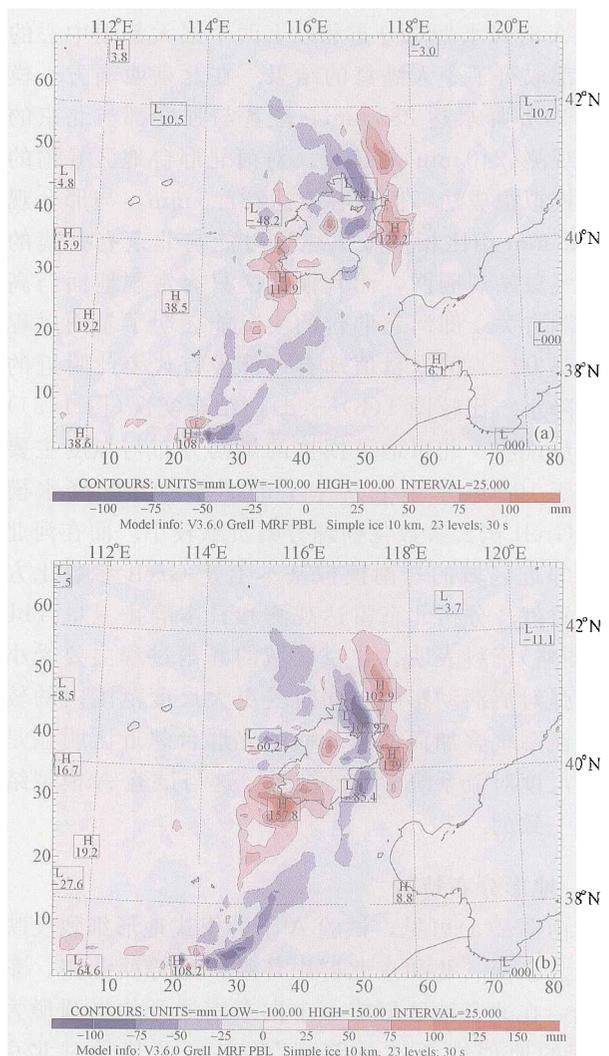
### 2.3 地形对降水的影响

图3(a),(b)分别给出了试验A的24h降水模拟及试验B、试验C的差值,图3(c)给出了北京地区1991至2000年平均的夏季降水量分布。图3(a),(b)一致表明,在北京山前迎风坡一带(密云、怀柔、房山)是正值带,在北京西部山后背风区和东部地区有负值区。在北京及其邻近地区,试验A与试验B的正差值中心值在120mm左右,负差值中心值也达-60mm左右(见图3(a))。试验A与试验C的正(负)降水差值中心值较试验A与试验B的结果更大(小),分别在140和-70mm附近。正负差值中心的变化对北京实况降水(参见图1(a))的影响达到50%左右。根据试验方案设计和上述结果,表明地形对北京地区暴雨有重要的影响,模式地形特征越细致真实,越有利于增大北京地区山前迎风坡一带(密云、怀柔、房山)降水模拟,减弱北京西部山后背风区和东部地区降水模拟。从图3(c)可看

出,在北京山前的迎风坡一带(密云、怀柔、房山)是多雨区,而山后的背风区为少雨区。所以上述试验结果清楚揭示了北京降水受地形地理分布特征影响的重要作用。

### 2.4 地形对大气的热力与动力作用

图4(a),(b)分别给出了试验A初始时刻大气柱水汽含量分布及其模拟的2000年7月4日06时(GMT)大气环流空间结构特征。从图4(a)可见,北京上空有一个呈南北向伸展的大范围的“Ω”型湿舌,在北京山前的迎风坡一带存在西北向梯度的水汽变化密集区,大气柱水汽含量高达6cm。表明在初始时刻的大气水汽场的特征,十分有利于强降水系统在未来的发生发展。逐时降水资料统计表明,4日06时(GMT)是这次暴雨发生发展的主要



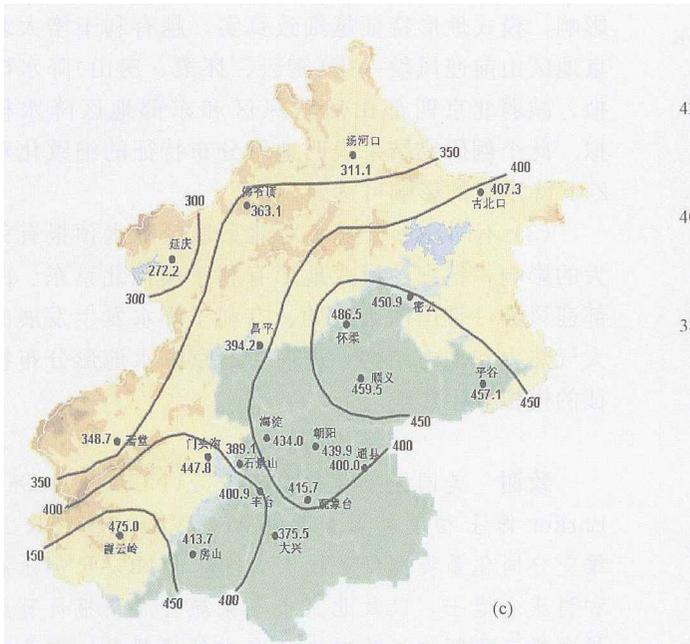


图 3 数值试验 24 h 降水差值分布与北京地区 1991—2000 年平均的夏季(6—8 月)降水量特征(单位: mm)  
(a) 24 h 降水差值(试验 A-试验 B); (b) 24 h 降水差值(试验 A-试验 C); (c) 北京地区 91—00 年平均的夏季降水量

时期。图 4(b)给出了试验 A 模拟的同时刻大气环流空间结构特征图。结合图 4(a)和(b)可看出,北京以南中低空两支西南和东南气流源源不断地把暖湿气团输送到北京上空,在北京地区受其独特地形分布特征的阻挡而抬升,与从南向北移过来的强上升运动中心相互叠加并加强,在北京上空形成深厚的强上升气流。中低空的暖湿气流一支沿北京西部地形向西部不断爬升流出,与高空冷气团在北京西侧高空形成一闭合的反气旋性纬向环流圈,另一支受垂直上升气流的影响而被带到高层,与北京东侧的下沉补偿气流相闭合,形成另一更为深厚的反气旋性纬向环流圈。北京东、西两侧的两个闭合环流圈显然对北京地区上空维持或加强上升运动具有正反馈作用。北京及邻近区域形成的这种大气水汽充沛、热力和动力结构有利的条件是形成北京这次强暴雨过程的主要原因。

图 5(a)和(b)分别为试验 A 与试验 B、试验 C 的预报要素差值场沿北纬 40°N 的垂直剖面。图 5(a)和(b)表明,试验 A 与试验 B、C 模拟的矢量风差值场总体上表现出一致的特点:即在北京地区

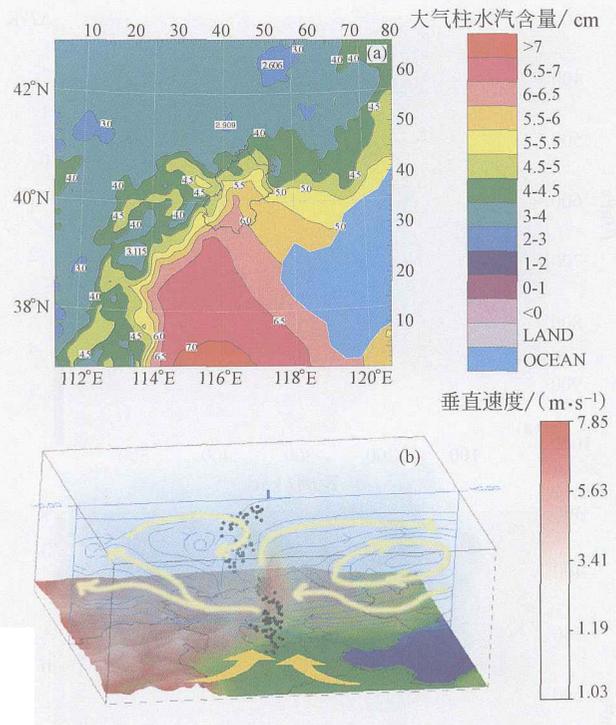


图 4 试验 A 初始时刻大气可降水量分布及其模拟的 2000 年 7 月 4 日 06 时(GMT)大气环流空间结构特征

(a) 试验 A 初始时刻大气大气柱水汽含量分布(单位: cm);  
(b) 试验 A 2000 年 7 月 4 日 06 时(GMT)大气环流结构特征模拟  
宽黄箭头表示气流流入方向,细黄箭头表示沿北纬 40°的纬向环流垂直结构(地面—15 km),蓝实线为北纬 40°纬向流场垂直剖面,黑色实心圆球表示前 6 h 模拟时效内过北京上空(40°北纬,116°东经,5.5 km)气块轨迹(由南向北),垂直速度的等值区空间分布由右侧彩色填图表示

中部,低空(850 hPa 以下)均表现为偏东气流,在东、西部上区之间主要为上升气流区,尤其在山前迎风坡地区更为明显。在北京东部和西部迎风坡有明显的风切变辐合。在北京西部山前有明显的东西向暖平流输送,在迎风坡地区上空存在东侧暖空气和西侧冷空气深厚的交汇区。显然以上模拟要素的差值分布有利于在北京地区的迎风坡一带(密云、怀柔、房山)形成有利于降水发生发展的热力和动力条件。图 5(a)和(b)的差异主要表现为后者各要素的差值较前者大,这是试验 B 地形较试验 C 精细的结果。上述结果表明精细的北京地形特征有利于模拟北京东、西部迎风坡一带山前细致的、有利于降水发生发展的大气热力和动力结构,进而反映出如图 3 所示的各试验降水差值分布特征。

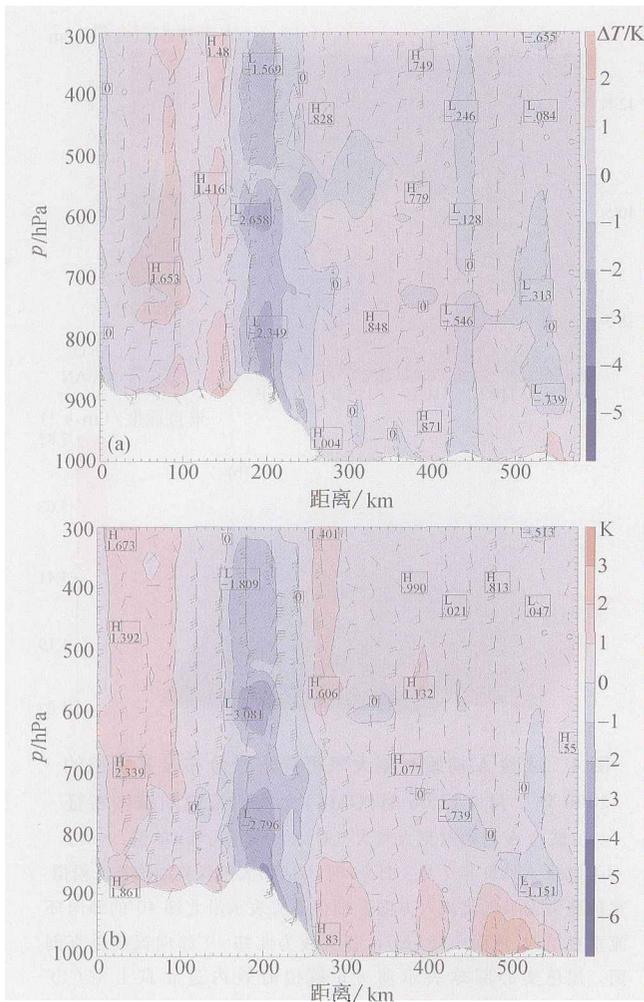


图5 第6小时模拟的温度和风矢量差值场内沿北纬 $40^{\circ}$  ( $113^{\circ}$ — $120^{\circ}$ 东经)的垂直剖面

(a) 试验 A-试验 B; (b) 试验 A-试验 C 图中地形由试验 A 的模式地形绘制, 风矢量场是纬向风场与垂直风场差值的合成, 温度场差值由彩色填图表示, 每一全长风羽代表  $5\text{ m/s}$  的矢量风差值, 温度差值等值线间隔为 1, 单位为 K

### 3 结论

主要取得以下结果:

(1) 数值试验成功对地基 GPS 大气柱水汽含量监测资料、无线电探空、高空测风、地面常规观测和地面自动气象站观测站网资料进行了三维变分同化, 降水模拟结果令人满意的;

(2) 北京特殊的地形分布特征对暴雨有重要的

影响, 模式地形特征越细致真实, 越有利于增大北京地区山前迎风坡一带(密云、怀柔、房山)降水模拟, 减弱北京西部山后背风区和东部地区降水模拟. 此个例研究结果表明地形分布特征的细致化对 24 h 降水量的影响可达到 50%;

(3) 不同地形分辨率对北京地区降水预报有很大的影响, 精细的模式地形有利于模拟北京东、西部迎风坡一带山前细致的、有利于降水发生发展的大气热力和动力结构, 进而对北京降水地形分布特征的模拟发生影响.

**致谢** 美国国家大气研究中心(NCAR)的 Dale Barker 博士和黄伟对使用 MM5/WRF 3DVAR 三维变分同化系统提供了技术支持, 与 NCAR 郭永润和肖庆农博士, 以及北京市气象局首席预报员孙继松高级工程师的讨论对本研究有很好帮助, 在此一并深表谢忱.

### 参 考 文 献

- 1 吴正华, 储锁龙, 李海盛. 北京相当暴雨日数的气候特征. 大气科学. 2000, 24(1): 58—66
- 2 Wu C C, Yen T H, Kuo Y H, et al. Rainfall simulation associated with typhoon herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect. Weather and Forecasting, 2002, 17: 1001—1015
- 3 郑庆林, 王必正, 宋青丽. 青藏高原背风坡地形对西南涡过程影响的数值试验. 高原气象, 1997, 16(3): 225—234
- 4 Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. A Three-Dimensional Variational Data Assimilation System For MM5; Implementation And Initial Results, 2003 (Submitted To Mon. Wea. Rev. Available from MM5 3DVAR web-site <http://www.mmm.ucar.edu/3dvar>)
- 5 张 昕, 王 斌, 季仲贞, 等. “98.7” 武汉暴雨模拟中的三维变分资料同化研究. 自然科学进展, 2002, 12(2): 156—159
- 6 Parrish D F, Derber J C. The national meteorological center's spectral statistical interpolation analysis system. Mon Wea Rev, 1992, 120: 1747—1763
- 7 Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model; Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon Wea Rev, 121, 1493—1513
- 8 张朝林, 陈 敏, Kuo Y H, 等. MM5/WRF 三维变分系统在北京地区大气(遥)测资料同化中的初步应用. 见: 新世纪气象科技创新与大气科学发展—①城市气象与科技奥运. 北京: 气象出版社, 2003, 23—26