

“00.7”北京特大暴雨模拟中气象资料 同化作用的评估^{*}

张朝林 陈 敏

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京, 100089)

Kuo Ying-Hwa

(MMM Division, NCAR, P. O. Box 3000, Boulder, CO, 80307-3000, U S A)

范水勇 仲跻芹

(中国气象局北京城市气象研究所, 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), 文中利用 MM5/WRF 三维变分系统和 MM5 非静力模式, 对此次特大暴雨过程中的各种气象监测资料(地基 GPS 大气柱水汽含量、常规探空、高空测风、地面常规观测和地面自动气象站)的同化作用通过观测系统数值试验进行了评估。结果表明: 与传统的客观分析方案相比较, MM5/WRF 三维变分同化系统可直接引入非常规地基 GPS 大气柱水汽含量监测资料, 提供更好的大气初始分析场。在三维变分同化方案下, 各种大气监测资料均对改进此次特大暴雨模拟有不同程度的贡献, 其中, 常规探空和高空测风监测资料对改进预报结果的影响最大, 地面常规观测和地面自动气象站观测资料作用次之, 地基 GPS 大气柱水汽含量资料在与其他大气监测资料相互优势互补后, 可很好地改善模式大气的分析质量, 通过三维变分同化技术在区域数值天气预报模式初始场中引入地基 GPS 大气水汽监测网资料, 使此次强降水个例的 6 h 和 24 h 测站降水预报的 TS 评分值在 1, 5, 10 和 20 mm 预报检验阈值下分别提高了 1%~8%。研究结果对利用三维变分数值系统, 评估气象监测网资料在改进高影响天气事件预报中的作用有借鉴意义。

关键词: 三维变分资料同化, 全球定位系统, 暴雨, 观测系统试验, 数值预报。

1 引 言

与传统的客观分析数值预报初值形成方法相比, 数值预报变分同化系统具有很多优点。由于其无需对大气监测资料进行预先反演, 就能容易地实现对资料的直接同化。因此, 伴随着卫星、雷达等大气非常规监测技术的飞速发展, 在非常规气象监测资料成为人们全面了解和准确预测未来大气运动必不可少的信息源情况下, 数值预报变分同化技术已

成为国际上主要发展的新一代数值天气预报初值形成方法。在 20 世纪 90 年代, 美国和欧洲等发达国家首先在数值预报业务中实现了三维变分同化系统的应用^[1], 近年来, 欧洲中心、法国和日本等少数国家, 实现了四维变分同化系统在全球和区域天气预报的业务中应用, 丹麦和美国等业务部门, 也正在发展自己的四维变分同化业务系统。目前, 中国集中优势资源, 开始在数值天气预报变分同化方法这一领域开展系统性的研发工作, 也取得了许多可喜的

^{*} 初稿时间: 2004 年 7 月 29 日; 修改稿时间: 2005 年 5 月 13 日。

资助项目: 北京市科委项目(H010510120119, H020620250330, H013610330119)、国家科技部项目(2002BA904B05)和国家科技部与北京市科委“全球定位系统单双频地基水汽遥测技术研究”国际合作项目。

作者简介: 张朝林, 男, 1972 年生。博士, 副研究员。主要从事数值预报模式开发应用和地基 GPS 气象研究。Email: clzhang@ium. cn 或 clzhang@yahoo. com

成果,为中国在数值预报业务中实现变分同化方法应用提供了科学基础和技术支持。但是,与欧、美等先进国家相比,在变分同化系统的应用水平(尤其是业务应用)方面还存在一定的差距。应用变分同化技术,可以通过大气监测系统数值试验(OSEs),对已有大气监测网中各种类型的气象资料进行影响评估,国外在这一方面的研究已有较大的发展^[2],为开展大气监测网络建设提供了非常有实际意义的科学参考。在中国,近年来开展过利用美国 PSU/NCAR 的 MM5V2 中尺度非静力模式,通过进行多个例数值对比试验,分析北京地区重要天气系统发生发展对站点大气风场垂直分布特征的敏感度,进而评估北京地区风廓线仪观测网布设方案的数值研究^[3]。但是,目前利用变分同化技术,分析现有大气监测网中各种类型的资料对强天气过程影响的研究仍有待进一步深入。北京申办 2008 年奥运会成功后,北京地区将对大气监测网进行全面的更新或升级,为北京大气监测网络建设提供科学合理的研究成果,已成为一项亟待解决的问题。本文针对北京地区 2000 年夏季降水强度最大的一次特大暴雨过程,利用 MM5/WRF 三维变分系统和 MM5 中尺度非静力数值预报模式,对此次降水过程中的各种大气监测资料的影响和作用进行了研究,取得了一些初步成果,为开展北京及周边地区的大气监测网络建设提供了科学参考。

2 MM5/WRF 3DVAR 同化系统简介与数值试验方案设计

2.1 MM5/WRF 3DVAR 同化系统简介

本研究使用 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),较早期版本做了大量改进^[4,5]。此三维变分同化系统不仅可广泛应用于气象科学研究;而且还具有很好的实际应用价值。张昕和王斌等^[6]曾对此系统的早期版本 MM5 3DVAR 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成功进行了数值模拟。

本研究针对北京地区应用和研究需要,实现了 MM5/WRF 3DVAR 三维变分同化系统的应用移植。并主要进行了以下方面的工作:(1)对北京及周边地区的地基 GPS 大气柱水汽含量资料、常规探空、高空测风、地面常规观测和地面自动气象站观测进行资料预处理开发,实现了各种大气监测数据格

式对 MM5/WRF 3DVAR 系统的支持;(2)利用 2000 年 7 月 1~31 日 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,采用美国 NMC-method 计算方案^[7]求气候意义上的 3DVAR 背景场协方差矩阵,MM5 初始边界条件用三维变分的同化分析结果作进一步的更新;(3)根据北京及周边地区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。

2.2 模式简介

数值试验利用 MM5(V3.6, PSU/UCAR)中尺度非静力数值预报模式^[8,9]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 σ 坐标,取 23 层。时间积分步长 30 s。主要物理过程为:Dudhia simple ice 显式降水方案和 Grell 积云对流参数化方案, MRF PBL 行星边界层方案, Dudhia 云辐射方案、采用松弛流入流出侧边界,下垫面采用 5 层土壤参数化方案。

2.3 数值试验设计

2.3.1 试验个例

2000 年 7 月 4 日 00 时~5 日 00 时(GMT),受小尺度强对流活动和地形影响^[10],同时与较大尺度范围内的较弱对流系统叠加而增强,北京地区发生了一次特大暴雨过程(简称“00.7”北京特大暴雨),北京门头沟自动气象站 24 h 降水量高达 240 mm,资料统计表明这是 2000 年夏季北京最大的一次降水过程。

2.3.2 北京及周边区域内的大气监测网空间分布

图 1 分别给出了模拟区域中常规探空、高空测风、地面常规观测与自动气象站,地基 GPS 大气水汽监测网的空间分布情况。图 1a 和图 1b 表明,虽然常规探空和高空测风大气监测站较少,站距约为 100~200 km,但其空间分布均匀,能较好地监测模拟区域中高空大中尺度天气系统的变化。从图 1c 可见,地面常规观测与自动气象站监测网在陆地上站距约为 20~50 km,具有很高的空间分布密度(尤其是在有自动气象站监测网的北京地区),其可监测并提供小尺度天气系统的生消变化信息。同期进行的北京地区地基 GPS 大气水汽监测试验网(图 1d)由 10 个约 20~30 km 站距的地基站组成,集中分布在北京市地区,可有效监测北京上空柱水汽含量变化。

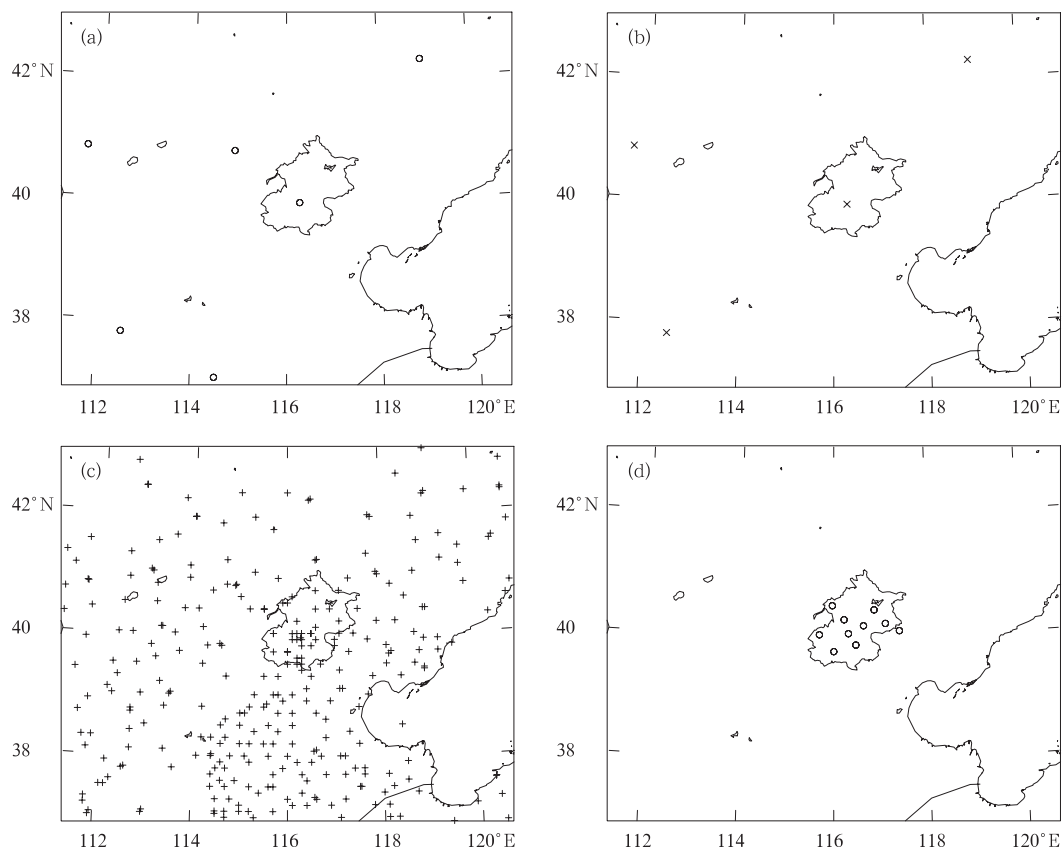


图1 模拟区域内大气监测网空间分布

(a. 常规探空, b. 高空测风, c. 地面常规观测与自动气象站, d. 地基 GPS 大气水汽监测站)

Fig. 1 Distribution of the individual components of atmospheric observation network within the simulation domain

(a. conventional radiosone(sound), b. pilot, c. automatic and conventional surface observations, d. ground-base GPS-MET)

2.3.3 试验方案设计

根据北京及周边区域内大气监测网空间分布情况(图1),为评估各气象监测资料(地基 GPS 大气柱水汽含量、常规探空、高空测风、地面常规观测和地面自动气象站)对此次暴雨过程的影响,本文设计了7个数值试验方案(表1)。以7月4日00时(GMT)三维变分分析场或客观分析方法形成模式初值,利用MM5模式系统进行24 h数值积分。通过比较分析各数值试验方案(试验1~7,表1)下降水等预报要素的客观检验与预报结果,以及各数值试验的初始场分析差异,研究北京及周边地区各种大气监测资料对“00.7”北京特大暴雨预报的改进作用。这里另需补充说明以下几点:

(1) 在采用MM5 Litter_R客观分析方法生成模式初值的方案中,包括了模式预报区域内的所有常规地面、自动站、探空、测风观测,以及北京地区12个县站地面观测实时资料。

(2) 在采用MM5/WRF 3DVAR 三维变分方

法生成模式初值的各方案中,除可同化分析了上一方案的各种资料外,还可同化北京地区10个地基GPS水汽监测试验的大气柱水汽含量资料。

(3) 每一数值试验,时间积分均为24 h。MM5模式的初估背景场信息由T106全球模式的第12小时预报场提供。模式边界每12 h更新,由国家气象中心(北京,中国)的T106全球模式的第12,24和36小时预报场提供。对于采用MM5/WRF 3DVAR分析同化结果作为模式初始边界条件的数值试验,初始边界条件用三维变分的同化分析结果进行了进一步的更新。

(4) 针对各数值试验方案结果,对模式预报要素进行了客观检验,其中,降水实况资料来源于地面测报和地面自动气象站降水观测资料,而其余检验资料实况来源于以国家气象中心(北京,中国)T106全球谱模式相应时次分析场(或预报场)作为背景信息,对常规地面与高空测报资料分别进行客观分析后的结果。

表 1 数值试验方案设计

Table 1. The scheme illustration of numerical experiments

试验	初值分析方法	背景场处理方法	监测资料类型 (括号内为各监测资料数量)	模式区域监测 资料总数(个)
试验 1	MM5/WRF 3DVAR 三维变分	利用 2000 年 7 月 1~31 日,模式在每一模式日相同时刻的 24 h 预报与 12 h 预报输出,采用美国 NMC-method 计算方案求 3DVAR 背景场协方差矩阵,MM5 初始边界条件用三维变分的同化分析结果作进一步的更新。	常规探空(6)、高空测风(4)、地面常规观测和地面自动气象站观测资料(308)、地基 GPS 大气柱水汽含量遥测资料(10)	328
试验 2	MM5 Litter_R 客观 分析方案	MM5 模式边界和背景场由国家气象中心(北京,中国)的 T106 全球中期预报业务模式 12,24 和 36 h 预报场提供。每 12 h 更新。	常规探空(6)、高空测风(4)、地面常规观测和地面自动气象站观测资料(308)	318
试验 3	同试验 1	同试验 1	同试验 2	318
试验 4	同试验 1	同试验 1	常规探空(6)、高空测风(4)	10
试验 5	同试验 1	同试验 1	地面常规观测和地面自动气象站观测资料(308)	308
试验 6	同试验 1	同试验 1	地基 GPS 大气柱水汽含量遥测资料(10)	10
试验 7	同试验 1	同试验 2	无	0

3 分析与讨论

3.1 大气监测资料对降水预报的影响

表 2 给出了试验 1~7 的测站降水预报的 TS 评分。从表 2 可见,各试验的 24 h 降水预报的 TS 评分,高值超过 0.8(对应于阈值取 1 mm 降水的多个试验结果),最低值也达 0.54(对应于阈值取 20 mm 降水的试验 6),各试验对应 1, 5, 10 和 20 mm 评分阈值的 24 h 降水预报 TS 评分,对应值大多在 0.7 以上。表明分别利用 MM5 3DVAR 三维变分同化系统和 MM5V3.6 模式,对“00.7”北京特大暴雨过程中降水量、落区和起始时段的模拟,均取得了令人满意的结果。对比试验 1 与试验 2 在各评分标准和评分时段下的 TS 值可见,试验 1 下的绝大多数的 TS 评分均高于试验 2(试验 1 仅在阈值取 1 和 5 mm 降水的一个 6 h 降水检验时段(070418~070500)和阈值取 1 mm 的 24 h 检验,对应的 TS 值略低于试验 2),这除表明采用 MM5/WRF 3DVAR 三维变分方法形成的模式初值可行、可信外,也说明由于采用 3DVAR 方法,具有直接同化北京地区 10 个地基 GPS 水汽监测试验的大气柱水汽含量遥测资料信息的能力,较采用 MM5 Litter_R 客观分析方法有更好的降水模拟结果。比较表 2 中试验 1 和试验 3 下的 6 h 降水 TS 评分可见,仅在 5 mm 阈值,070400~070406 和 070418~070500

两个 6 h 降水检验时段内,试验 1 下 TS 评分比试验 3 略为偏低外(试验 1 分别为 0.55, 0.30, 试验 3 分别为 0.56 和 0.31),试验 1 下其余的 TS 评分均高于试验 3,偏高值为 1%~8%,24 h TS 评分也有类似特点。结合上面试验 1, 2 和 3 的 TS 评分对比分析,一致表明在用三维变分方法同化北京地区地基 GPS 水汽监测试验的资料信息后,试验 1 的模式初值与采用客观分析方法(即试验 2)和仅包含常规高空和地面观测的同化方案(即试验 3)相比,提高了分析质量,改进了降水预报的准确率。根据表 2 分别比较试验 4, 5, 6 与 7 的 TS 评分值,以及相互间的差异,可见各评分标准和评分时段下的 TS 评分值,按总体上从大到小的顺序,表现为试验 5 最大,试验 4 次之,试验 7 再次之,试验 6 的 6 和 24 h TS 评分,除在少数评分阈值或评分时段较试验 7 略有偏高,其余基本上较试验 7 偏低或相当。由于试验 7 代表了背景场信息对此次降水预报的贡献,所以上述结果表明,在此次强降水预报中,常规地面观测和地面自动气象站资料对改进此次降水预报的模式初值同化质量的影响最大,这应是其远比其他监测资料丰富的结果(测报资料高达 318 个,参见表 1 和图 1)。尽管探空、测风观测影响次之,但必须注意这是仅由 10 个具有三维大气探测信息站点的影响结果,说明发展具有空间探测能力的大气观测仪器,丰富三维大气信息对改进短期数值预报具有重要的意义。试验 6 下的 TS 值总体上低于试验 7,表明若

仅同化地基 GPS 水汽遥测资料,而不同时综合同化北京及周边地区高空、地面常规大气观测资料时,其对此过程的降水预报呈负面或中性的影响。结合前面对试验 1 和 3 降水预报 TS 评分的分析,表明对地基 GPS 水汽遥测试验的大气柱水汽含量遥测资料的同化工作,应与其他大气监测资料相互补充,

优势互补后才能很好地改善同化与分析质量,进而改进模式初值,提高短期数值预报的降水预报准确率。试验 7 也取得了较高的 TS 降水评分检验,则表明国家气象中心(北京,中国)的 T106 全球中期预报业务模式具有较高的预报水平,为此次过程提供了较高质量的模式背景场和边界信息。

表 2 数值试验降水测站 TS 评分

Table 2 Precipitation threat scores (TS) of numerical experiments vs. observations

TS 评分阈值	检验要素	时段(依次用两	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	试验 6	试验 7
		位数表示月、日和时)							
1 mm	6 h 降水预报	070400~070406	0.65	0.61	0.57	0.46	0.63	0.52	0.60
		070406~070412	0.88	0.81	0.80	0.85	0.80	0.79	0.83
	24 h 降水预报	070412~070418	0.68	0.63	0.63	0.66	0.68	0.66	0.67
		070418~070500	0.36	0.40	0.35	0.35	0.42	0.38	0.37
		070400~070500	0.72	0.78	0.72	0.84	0.74	0.83	0.80
5 mm	6 h 降水预报	070400~070406	0.55	0.48	0.56	0.35	0.51	0.44	0.50
		070406~070412	0.70	0.53	0.67	0.65	0.59	0.51	0.59
	24 h 降水预报	070412~070418	0.41	0.37	0.41	0.37	0.38	0.34	0.37
		070418~070500	0.30	0.31	0.31	0.29	0.31	0.33	0.31
		070400~070500	0.76	0.73	0.71	0.76	0.75	0.70	0.75
10 mm	24 h 降水预报	070400~070500	0.67	0.62	0.67	0.68	0.67	0.65	0.64
20 mm	24 h 降水预报	070400~070500	0.63	0.59	0.69	0.60	0.64	0.54	0.61

3.2 大气观(遥)测资料对模式预报要素评分技巧的影响

分别对数值试验 1~7 方案中 300,500,700 和 850 hPa 层预报风场、温度场和比湿场进行 0,12 和 24 h 预报均方根误差检验(针对各数值试验在预报格点上的分析场),得到各数值试验方案下预报均方根误差(RMSE)的时空变化(表略)。分析 RMSE 结果,总体表明,在预报的初始时刻(0 h 预报),试验 2 的预报风场、温度场和比湿场在大气高层(300 hPa)、中层(500 hPa)和中低层(700 和 850 hPa)等代表性高度的 RMSE 值在所有数值试验方案中最小,试验 7 最大,其余试验方案中则又以试验 4 下的结果与试验 2 最为接近。以 850 hPa 水汽比湿场在 0 h 的 RMSE 值为例,试验 1~7 下的相应 RMSE 值依次为 1.1,1.0,1.1,1.0,1.5,1.4 和 1.6 g/kg。以上结果一方面与试验 2 采用 MM5 Litter_R 客观分析方案进行模式初值分析,认为在分析过程中,经一定质量控制后的测站监测资料是完全可信的(即不考虑监测资料代表性误差和仪器误差的客观存在),从而试验 2 初值分析结果与检验方法中所取的大气实况最接近有关(参见 2.3.2 试验方案小节中的检验方法设计);另一方面则是试验 7 仅考虑大尺

度背景场信息,而忽略在检验方法中认为完全可信的测站监测资料的反映;试验 4 的 RMSE 值与试验 2 最接近,说明了高空探测对给出大气三维空间信息的重要性。其余数值试验的结果,是 3DVAR 三维变分方法综合考虑大气监测资料和背景场信息相互影响的直接体现。试验 1~7 各方案中 12 和 24 h 预报均方根误差差异很小。说明用 MM5/WRF 3DVAR 变分方法进行模式初值分析不会引进模式短期预报误差出现异常增长情况,在实际应用中是可行可信的。以上结果还说明,应用传统的资料分析方法来表征大气实况,进而进行数值预报要素检验的方法,与变分分析认为监测资料客观上也有误差存在的理论基础不一致,需要在今后开展更客观、有效的数值预报检验方法研究,为变分方法在数值预报应用中的客观检验提供新方法。

3.3 “00.7”北京特大暴雨模拟

图 2 给出了 24 h 降水量实况和试验 1 模拟的总降水分布。从图 2a 可见,2000 年 7 月 4 日 00 时~5 日 00 时(GMT),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(北京门头沟自动气象站);另一个中心位于模拟区域的南边

界附近,中心值为 113 mm(河北邢台气象站)。对比图 2a 和 2b 明显可见,试验 1 对降水形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。在北京西南地区,模拟的 24 h 降水达 285 mm,位置与强度都与门头沟实况观测(240 mm)非常接近。对河北邢台地区暴雨的位置模拟一致,但中心值达 237.3 mm,与邢台观测 138 mm 相比差别较大。注意到在模拟范围内,北京地区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,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地附近的最大降水。肯定的是,试验 1 对河北邢台邻近区域的暴雨模拟是成功的。从试验 1 模拟的显式方案降水和 Grell 积云参数化降水分布图(图略)上可以进一步看出,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过程基本上是 Grell 积云参数化物理方案的模拟结果,表明该范围内的降水受较大天气尺度对流系统的影响。分析北京地区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是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 1 的模拟结果是一致的。

3.4 气象资料同化对模式初始分析场的影响

3.4.1 初始大气水汽场

图 3a 给出了试验 1 在模拟初始时刻的大气柱水汽含量分布。由图 3a 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 6 cm。试验 1 在初始时刻的这种大气水汽场的分布特征十分有利于强降水系统在未来的北京的发生发展。表明采用三维变分技术综合同化模拟区域内的各种大气观(遥)测资料,模式初始水汽场可合理反映出降水发生前大气水汽的输送与充沛情况。图 3b 给出了试验 1 与试验 3 在初始大气柱水汽含量的同化分析差值分布。其表明了引入背景场和常规气象观测资料基础上,进一步引入非常规地基 GPS 大气柱水汽含量监测资料对初始模式大气水汽场的改进作用。从图 3b 清楚可见,试验 1 与试验 3 模式初始大气水汽含量存在大范围的正负区,最大(最小)差值达到 +5.6(−3.3) mm,

位于北京以外的西南(东)部。正负差值区正好在北京上方呈一东南—西北向的密集过渡带,表明地基 GPS 大气水汽监测资料的三维变分同化对模式大气场的分布及强度均有十分重要的影响。GPS 大气水汽资料同化有利于增大(减少)北京西南(东北)部的水汽含量,进而有利于增强北京西南部(特别是北京门头沟区)上空的西南—东北向水汽梯度变化。显然同化地基 GPS 大气水汽监测资料对初值的这种影响,有利于在试验 1 模式初值分析中增加对未来北京发生暴雨的有利水汽条件,形成如图 3a 所示有利北京暴雨发展的水汽分布。注意到地基 GPS 大气水汽监测站位于北京及毗邻地区(图 1d),但图 3b 中正负差值的范围却较为广泛。这表明通过三维变分技术中代价函数对模式分析变量间的总体约束,以及模式物理上的热力和动力相互约束条件,地基 GPS 大气水汽柱含量监测资料的量值影响范围可以作用到远较监测网本身远得多的北京以外广阔区域,在局地(北京及毗邻区域)监测网上空,地基 GPS 大气水汽柱含量监测资料同化的作用主要是合理增强了北京上空的大气水汽柱含量梯度分布,进而使试验 1 取得了较试验 3 更好的降水模拟结果。图 3c 表明了试验 6 与 7 在初始大气柱水汽含量的同化分析差值分布。其表明了模式背景场基础上仅引入非常规地基 GPS 大气柱水汽含量监测资料的作用。对比图 3b 和 3c 可见,两者的正负差值区具有类似的水平分布特征,进一步证实了上面图 3b 中地基 GPS 大气水汽柱含量监测资料同化作用的分析结论。但也应注意到,试验 1—试验 3(图 3b)正负中心的差值分布和强度与试验 6—试验 7(图 3c)相比,图 3c 中位于北京以外东北(西南)方的负(正)差值区范围更大(小)、强度更强(弱)。这表明在变分同化系统中,地基 GPS 水汽监测资料与常规气象观测资料和背景场的约束是一个相互影响的复杂过程,每一种类的观测资料都会对模式初始水汽场产生独特的贡献;初始时刻常规高空与地面气象观测网资料对提高大气初始水汽场的同化分析场也是有约束和改进作用的。在模式初值的变分同化分析中,通过不同类型观测资料间存在的直接和间接物理约束,可以使模式初值分析结果更好地反映真实的大气状况。这也是在试验 7 基础上,试验 1 与试验 6 相比能更好提高降水模拟测站 TS 评分的原因。

3.4.2 初始大气热力与动力场

图 4 给出了初始时刻在模式 0.825 σ 层的大气水平风、温度场分析差值分布。从试验 1 与 2 的差值(图 4a)可清楚看到,虽然试验 1 只比试验 2 多考虑了 10 个地基 GPS 大气水汽监测站的数据,但反映在两试验初始低层大气热力与动力场的初值差异上,表现为试验 1 初值分析更有利于在北京东南(西北)部形成东南暖湿(西北干冷)气流区域,在北京低空有利于形成一呈东北—西南的风切变区域。这显然有利于未来 24 h 北京暴雨发生的模拟。这表明试验 1 较试验 2 降水预报的改进不仅在于前者在初始分析场中考虑了更丰富的地基 GPS 水汽监测资料信息,进而更好地表征了降水发生前的大气水分分布与结构状况;另一方面,由于采用三维变分模式初值分析方法,试验 1 综合考虑了观测系统,模式系统,背景大气以及以上各信息的误差影响与相互约束,特别是其不再简单地把观测直接作为大气“真值”的实际反映;因此与把观测直接作为大气实况,采用 MM5 中 Litter-R 客观分析方案形成模式初始场的试验 2 相比,试验 1 中地基 GPS 水汽监测信息的引入也明显较试验 2 改善了大气热力与动力场的初值分析质量,进而提高降水模拟水平。图 4b 表明了同样采用三维变分方法下,试验 1 和试验 3 同化地基 GPS 大气水汽柱含量监测信息是否对模式温度和风场的可能影响。可以看到,图 4b 中温度场和风场的初始分析差值很少,与图 4a 中试验 1 和试验 2 的差值相比,甚至可忽略不计。其合理地反映了 MM5/WRF 3DVAR 系统中将水汽变量作为独立的物理属性保守的分析变量,地基 GPS 大气水汽信息的引入将主要是改善模式水汽场的分析质量,对大气风场、温度场影响很小的事实。图 4c 和 4d 分别为试验 4—试验 7 和试验 5—试验 7 在对流层低层的差值分布,分别表明了常规高空观测和地面观测对改善模式初始场分析的作用。从图 4c 可见常规高空气象观测网信息的引入,对此次降水模拟改进的贡献主要是有利于增强北京地区低空气流的偏东暖平流输送;而常规地面气象观测网信息则主要有利于增强北京西(东)侧的偏北冷气流(偏南暖气流)向北京低空的输送汇合(图 4d)。图 4c 中的温度场差值较图 4d 小,说明在此次降水过程中,常规地面气象监测与常规高空气象监测相比,前者的资料同化对客观反映对流层低层的大气的热力场分布状况的影响更为显著,这在一定程度上揭示了同

化常规地面气象观测要素取得较同化常规高层气象观测要素信息后更好降水 TS 评分的原因。

4 结 论

利用 MM5 三维变分同化系统和 MM5V3.6 非静力中尺度模式,本文成功地进行了北京及周边地区的地基 GPS 大气柱水汽含量遥测资料、常规探空、高空测风、地面常规观测和地面自动气象站观测资料的同化分析和数值预报应用试验。并分析了北京及周边地区各种大气监测资料对改进北京“00.7”特大暴雨过程数值模拟的作用,主要取得以下结论:

(1) 应用 MM5/WRF 三维变分系统,在分析过程中可直接引入更多的非常规大气监测信息(如地基 GPS 大气柱水汽含量遥测资料)。可广泛应用于北京及周边地区现有的各种大气观(遥)测资料的数值分析与预报。与客观分析方法相比,该系统给出的大气资料分析场包含了更为丰富与合理的大气水汽、热力与动力场监测信息,作为中尺度数值模式初值,提高了短期强降水数值天气预报水平。

(2) 分析北京及周边地区各种大气监测资料对此次降水过程的作用表明,常规地面气象观测(包括地面自动气象站)、常规高空气象观测和非常规的地基 GPS 大气水汽柱含量监测网资料对此次暴雨模拟各自均具有独特的重要贡献。地基 GPS 大气柱水汽含量能提供与强对流天气紧密联系的水汽信息,此研究表明地基 GPS 水汽监测资料与其他大气监测资料共同进行变分同化。可很好地改善模式大气水汽、温度和风场的初值同化与分析质量,对提高短期数值预报的强降水预报准确率有明显作用。

(3) 应用传统的资料分析方法来表征大气实况,进而进行数值预报要素检验的方法,与变分分析认为监测资料客观上也有误差存在的理论基础不一致,今后需要开展更客观、有效的数值预报检验方法研究,为变分方法在数值预报应用中的检验提供新方法。

(4) 本文仅是针对强降水个例的研究,为利用三维变分资料同化方法评估各种大气监测资料对天气过程和气候变化的影响提供了借鉴。今后需要开展更深入和广泛的工作。

致 谢: 美国国家大气研究中心(NCAR)的 Dale Barker 博士、YongRun Guo 教授和 Wei Huang 教授,丹麦气象研究院(DMI)的 HansXiang—YuHuang 博士对三维变分及其应

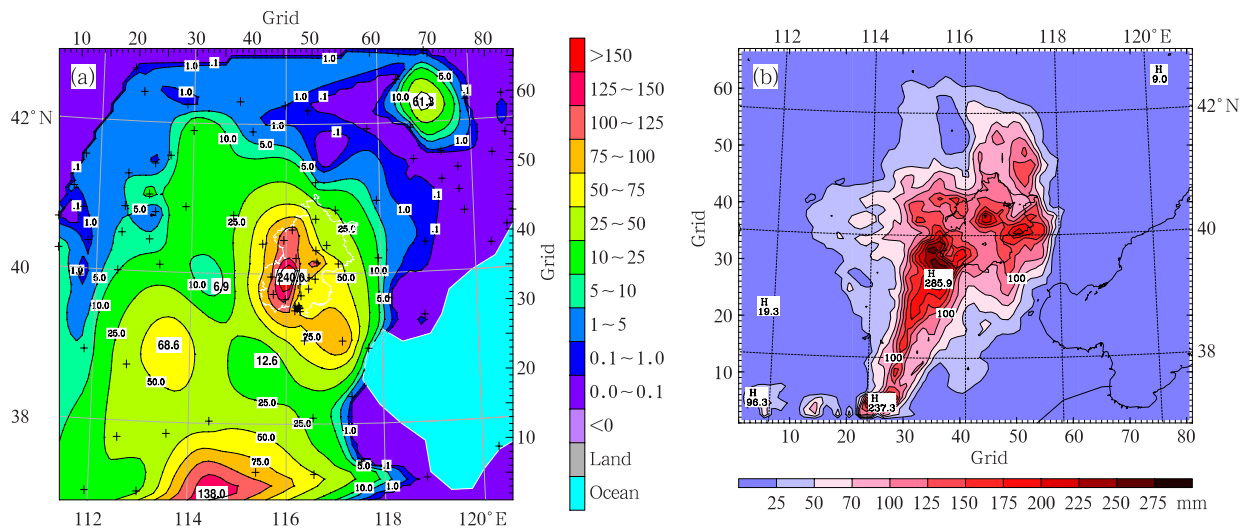


图2 2000年7月4日00时~5日00时 (GMT) 24 h降水实况与试验1降水模拟

(a. 实况, b. 试验1总降水; 单位: mm)

Fig.2. The 24 h precipitation of 04:00–05:00(GMT) July 2000 (unit:mm)

(a. real observations, b. total precipitation of Exp.1)

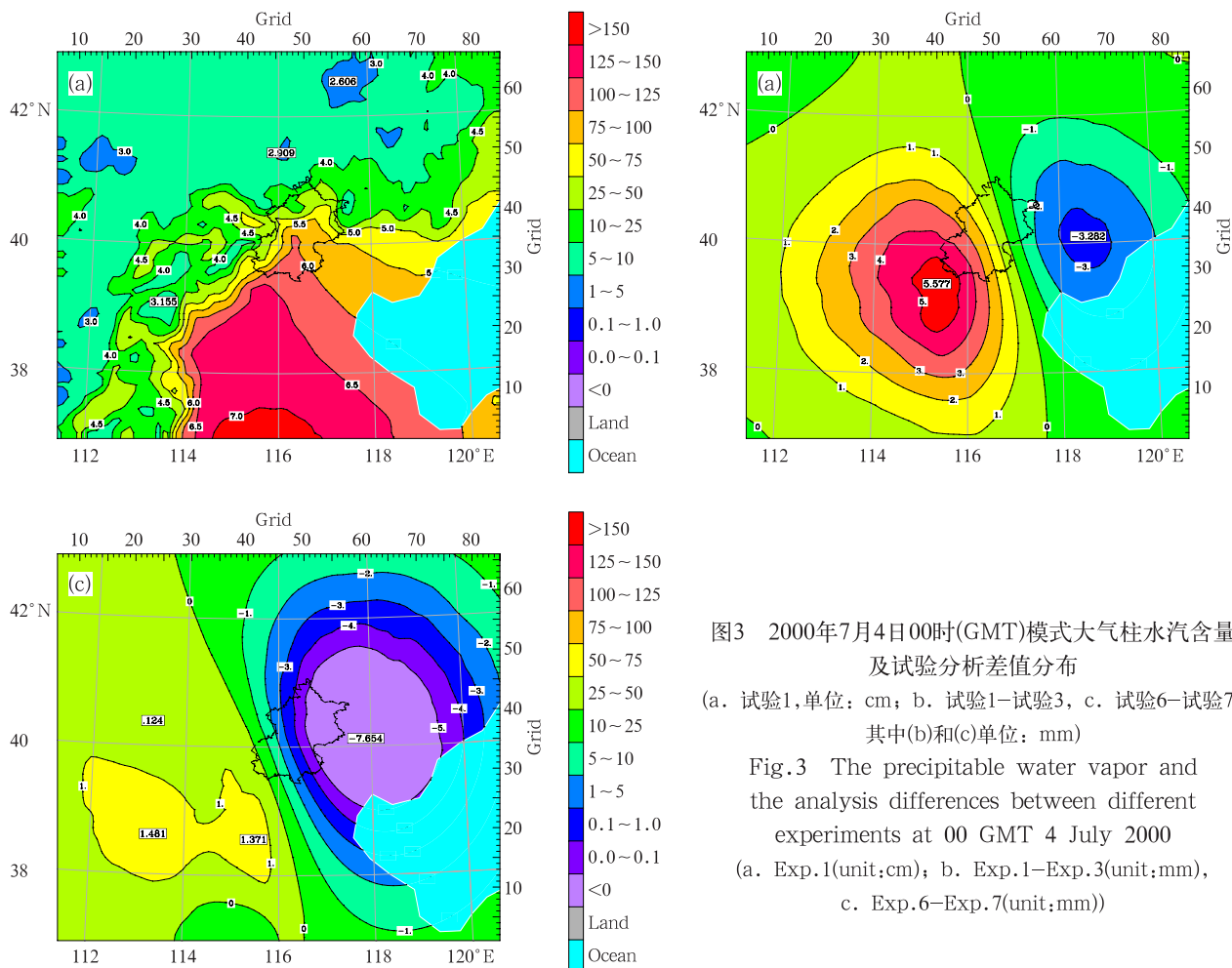


图3 2000年7月4日00时(GMT)模式大气柱水汽含量及试验分析差值分布

(a. 试验1,单位: cm; b. 试验1–试验3, c. 试验6–试验7, 其中(b)和(c)单位: mm)

Fig.3 The precipitable water vapor and the analysis differences between different experiments at 00 GMT 4 July 2000

(a. Exp.1(unit:cm); b. Exp.1–Exp.3(unit:mm), c. Exp.6–Exp.7(unit:mm))

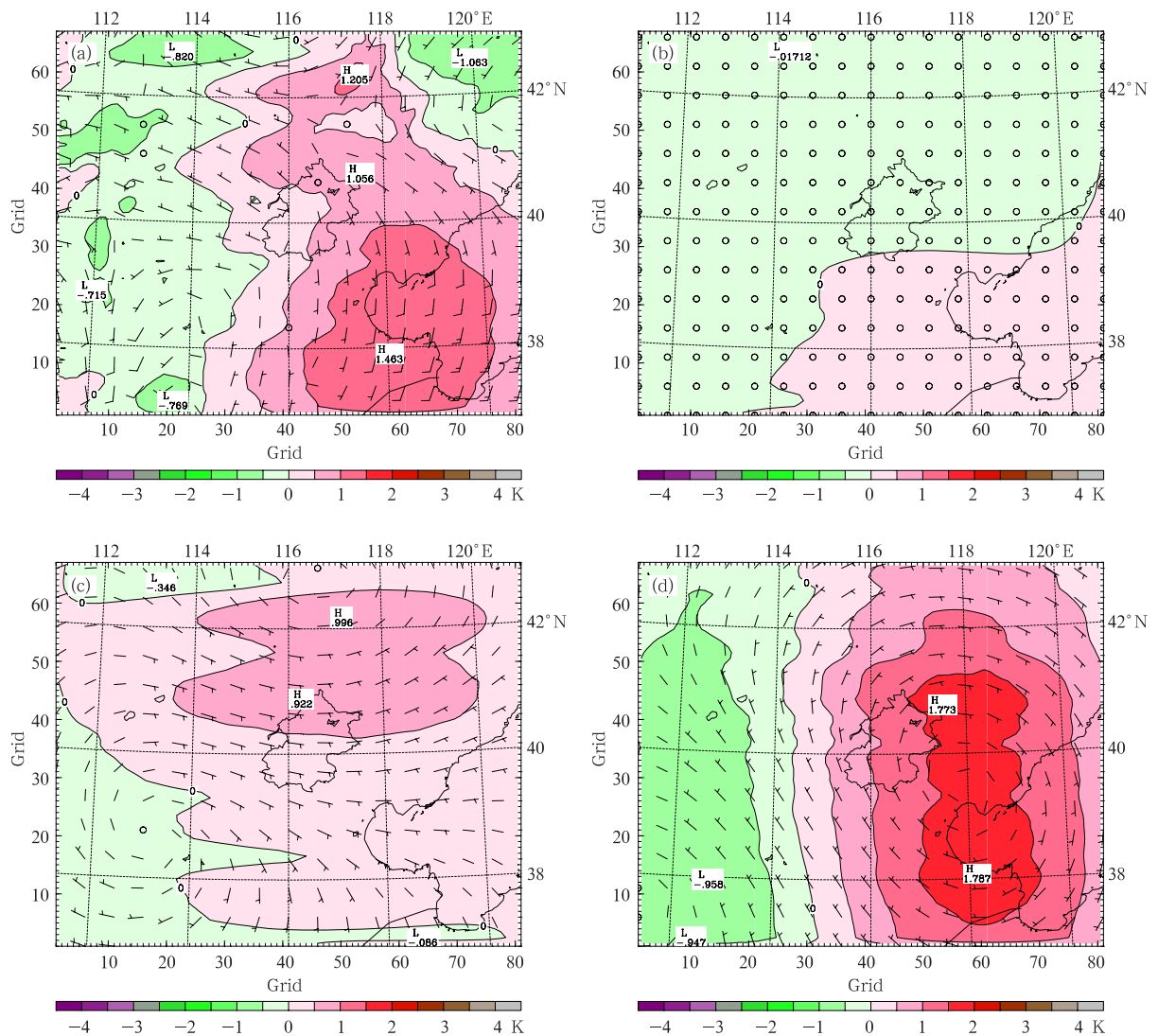


图4 2000年7月4日00时(GMT)模式0.825 σ 层大气水平风、温度场的试验分析差值分布

(a. 试验1-试验2, b. 试验1-试验3, c. 试验4-试验7, d. 试验5-试验7;

等值线间隔为0.5 K, 全长风羽表示 5 m/s)

Fig.4 The difference distribution for temperature and wind fields at the sigma 0.825 level at 00 GMT of 4 July 2000

(a. Exp.1-Exp.2, b. Exp.1-Exp.3, c. Exp.4-Exp.7, d. Exp.5-Exp.7;

interval of 0.5 K, full barb vector denotes 5 m/s)

用提供了技术指导;北京大学毛节泰教授、李成才副教授,国家卫星中心方宗义研究员、夏青研究员和曹云昌博士参与了此次过程中的地基 GPS 观测试验,中国气象局北京城市气象研究所的楚艳丽工程师、张京江高级工程师、王京丽高级工程师参与了地基 GPS 资料的处理与解算,在此一并深表谢忱。

参考文献

- [1] Lorenc A C, Ballard S P, Bell R S, et al. The Meteorological Office global three-dimensional variational data assimilation scheme. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000; 126, 2991—3012
- [2] Guo Y R, Kuo Y H, Dudhia J, et al. Four-dimensional variational data assimilation of Heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case. *Mon Wea Rev*, 2000, 128; 619—643
- [3] 张朝林,王迎春. 北京地区风廓线仪布网方案的数值研究. *气象学报*, 2002, 60(6): 786—791
Zhang Chaolin, Wang Yingchun. Numerical study on weather influences of location design of wind-profiler network for Beijing Area. *Acta Meteor Sinica(in Chinese)*, 2002, 60(6): 786—791
- [4] Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. A Three-Dimensional Variational Data Assimilation System For MM5: Implementation And Initial Results. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 897—914
- [5] Barker Dale, Huang Wei, Guo YongRun, et al. A Three-Dimensional Variational (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5. Available from MM5 3DVAR web-site, <http://www.mmm.ucar.edu/3dvar>
- [6] 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
Zhang Xin, Wang Bin, Ji Zhongzheng, et al. Three-dimensional variational data assimilation implemented in numerical modeling for Wuhan torrential rain in July 1998. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 2002, 12(2): 156—159
- [7] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 1747—1763
- [8] 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*, 1993, 121: 1493—1513
- [9] Dudhia J, Gill D, Manning K, et al. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3, 2003
- [10] 张朝林,季崇萍, Kuo YingHwa 等. 地形对“00.7”北京特大暴雨过程影响的数值研究. *自然科学进展*, 2005, 15(5): 572—578
Zhang Chaolin, Ji Chongping, Kuo Ying Hwa, et al. Numerical simulations of topography impacts on “00.7” heavy rainfall in Beijing. *Progress in Nature Science*, 2005, 15(9): 818—826

NUMERICAL ASSESSING EXPERIMENTS ON THE INDIVIDUAL
COMPONENTS IMPACT OF THE METEOROLOGICAL OBSERVATION
NETWORK ON THE “00.7” TORRENTIAL RAIN IN BEIJING

Zhang Chaolin Chen Min

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089)

Ying-Hwa Kuo

(National Center for Atmospheric Research, P O Box 3000, Boulder, CO, 80307-3000, USA)

Fan Suiyong Zhong Jiqin

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089)

Abstract

In an effort to assess the impact of the individual components of meteorological observations (ground-based GPS precipitable water vapor, automatic and conventional meteorological observations) on the torrential rain event of 4–5 July 2000 in Beijing (with 24 h accumulated precipitation reaching 240 mm), 24 hour observation system experiments are conducted numerically by using the MM5/WRF 3DVAR system and the non-hydrostatic MM5 model. Results indicate that, because the non-conventional GPS observations are directly assimilated into the initial analyses by 3DVAR system, better initial fields and 24h-simulation for the severe precipitation event are achieved than those under the MM5/Litter objective analysis scheme. Further analysis also shows that each of the individual components of meteorological observation network plays its special positive role on the improvement of initial-field analysis and forecasting skills. With or without radiosonde and pilot observation in 3DVAR scheme has the most significant influence on numerical simulation, automatic and conventional surface meteorological observations ranks into the second place. After ingested the supplement information from the other meteorological observations, the ground-based GPS precipitable water vapor data can play more obvious roles on initial-field assimilation and precipitation forecast. By incorporating the ground-based GPS precipitable water vapor data into the 3DVAR analyses at the initial time, the threat scores (TS) with thresholds of 1, 5, 10 and 20 mm are increased around 1%–8% for 6 and 24 hours accumulated precipitation observations. This work gives one helpful example that assesses the impact of individual components of the existing Meteorological Observation Network on high-influence weather event using 3DVAR numerical system.

Key words: Three-dimensional variational data assimilation, Global position system, Severe rainfall, Observation system experiment, Numerical weather prediction.