

# 高分辨率WRF 快速循环同化预报系统对北京强降水个例的数值试验

范水勇<sup>1</sup> 郭永润<sup>2</sup> 王薇<sup>2</sup> 陈敏<sup>1</sup> 仲跻芹<sup>1</sup> 黄向宇<sup>2</sup>

1, 北京城市气象研究所; 2, 美国国家大气研究中心 (NCAR)

在高分辨率 (3km甚至更高) 模式区域里应用三维变分同化方法同化局地中小尺度观测资料, 如自动站(AWS)/GPS总水汽 (GPSPW) 等, 目前来说还是一个挑战。为迎接2008年北京奥运会, 改进北京地区的天气预报, 一个基于WRF三维变分同化 (WRFVar) 和WRF模式的3km分辨率3小时快速更新循环同化预报系统 (3h rapid update cycle) 已经被建立, 并用于06年8月1日北京局地暴雨个例的研究。此外, 1小时周期的更新循环同化也进行了初步的试验。

## 1 暴雨过程简介

06年8月1日下午北京发生一场短时局地暴雨过程 (图1), 海淀观测站过程降雨43.8mm, 17至18时 (BJT) 1小时雨强达32.4mm, 海淀箭亭桥自动站过程降雨55mm, 主要集中在17至19时 (BJT)。从北京南郊雷达反射率图 (图2) 上可以看到这是一次明显的飚线过程, 午后2点生成于北京西北部河北境内, 在向东南方向快速移动中于下午5点影响北京城区, 在城区形成短时强降水。

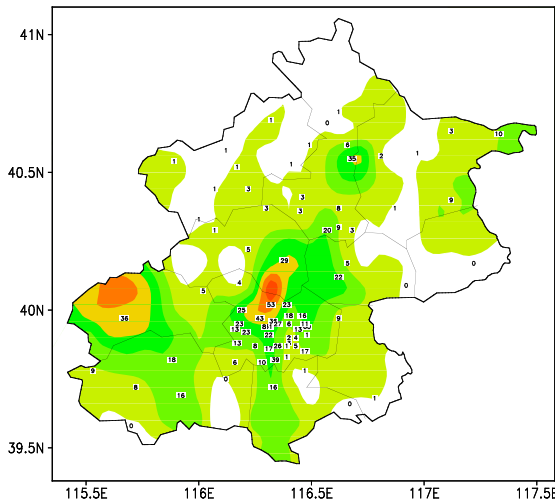


图1北京地区自动站观测6小时累积降水  
(8月1日06~12UTC)

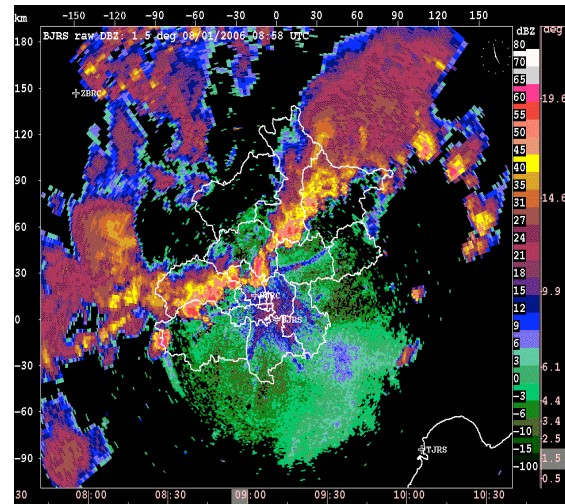


图2 北京南郊雷达反射率图 (8月1日08:58UTC)

## 2 Cycle系统介绍

建立的3小时快速更新循环同化预报系统 (简称cycle) 设置如下: 06年8月1日00Z冷启动, 以后03Z/06Z/09Z每3小时进行暖启动, 采用前一时次的3h预报场为初猜场, 同化包括GTS全球观测资料、自动站 (AWS) 和地基GPS水汽 (GPSPW) 在内的常规和非常规观测资料, 同化时间窗 $\pm 1h$ , 并进行12h预报。WRF模式采用三重嵌套 (27-9-3km), 最内区覆盖北京、河北、天津等省市, 分辨率达到3km, 物理过程如下: WSM6或Thompson云物理方案, 外两层采用旧的KF对流方案, 最内层关闭对流方案, YSU PBL边界层方案, 5层土壤方案, RRTM长波和Dudhia短波辐射方案, 关闭反馈作用。三维变分同化分析在3个区域中分别进行, 各区域的背景场误差协方差 (BES) 采用NMC方法统计一段时间模式在同一时刻的12h和24h预报差得出。1小时的更

新循环同化在01~09Z每1小时进行暖启动，采用前一时次的1h预报场为初猜场，同化时间窗±0.5h，其余同化和模式设置与3小时更新循环同化相同。

### 3 数值试验设计

为了得到更接近真实的背景场误差BES，一般采用一个月甚至一个季度的模式预报差计算BES。本文为节省计算资源，仅采用半个月的模式预报场差值计算变分同化所需要的背景场误差，并在个例研究中尝试通过调整背景场误差来达到更好的预报效果。同时，对9km区域背景场误差插值出3km区域背景场误差的方法进行了尝试。如果此方法可行，将不必积累高分辨率的预报场去计算背景场误差，从而节省大量计算资源。调节观测误差是误差调节的另一个重要方面，观测误差的自适应调整方法（Desroziers and Ivanov 2001）也在3km分辨率的WRF三维变分同化中进行了试验。为了评估同化GPSPW水汽观测对局地短时暴雨的预报作用，需要试验同化GPSPW资料前后模式的降水预报。同时，进行1小时cycle的初步试验以了解其性能。针对以上目的，设计了12个数值试验，如表1所示。

表1 数值试验列表

exp5	3h cycle, 27-9-3km domains, AVN FCST as BC(3h interval), WSM6, var_scaling=1
exp6	1h cycle, WSM6, var_scaling=1
exp7	3h cycle, Thompson (mp=8), var_scaling=1
exp8	The same as exp7, except var_scaling=0.75
exp9	The same as exp7, except var_scaling=0.5
exp10	The same as exp7, except var_scaling=0.25
exp11	The same as exp7, except var_scaling=0
exp12	1h cycle, Thompson, var_scaling=0.5
exp13	1h cycle, WSM6, var_scaling=0.5
exp14	1h cycle, WSM6, var_scaling=1, OBS error tuning
exp15	3h cycle, Thompson (mp=8), var_scaling=0.5, NOGPS
exp16	3h cycle, Thompson (mp=8), Interpolated-BE, var_scaling=0.5, len_scaling=1.732

本文将着重对以下几个试验进行对比分析，它们是：

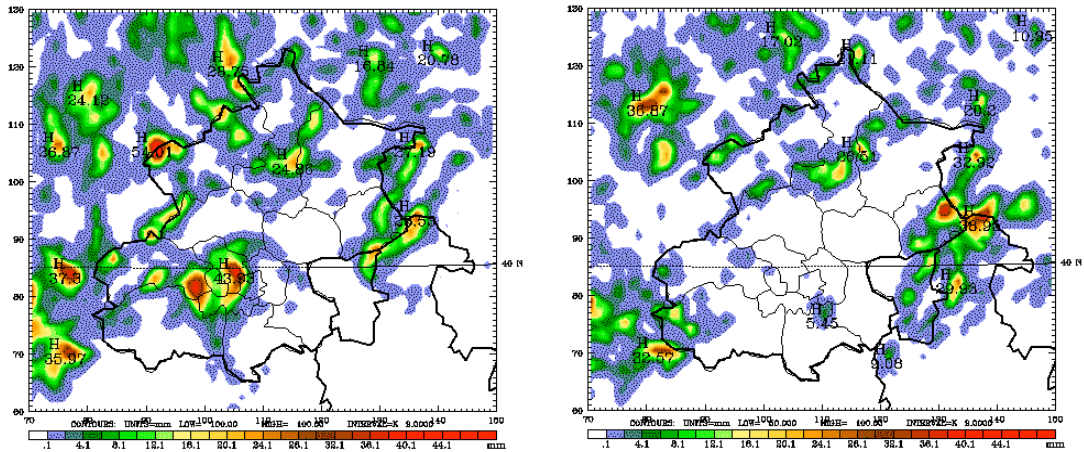
- (1) exp5 vs. exp6----3h cycle和1h cycle
- (2) exp7-11----3km分辨率的背景场误差因子var\_scaling=1和0.5
- (3) exp9 vs. exp16----计算出的3km BES和插值生成的3km BES
- (4) exp6 vs. exp14----观测误差调节
- (5) exp9 vs. exp15----有无GPSPW资料同化

其中, exp5和6讨论cycle更新频率的增加是否能在多大程度上提高预报。exp7-11通过改变3km分辨率的背景场误差因子var\_scaling的值来调节背景场误差,研究背景场误差对模式预报的影响。exp9和16比较采用直接计算的3km区背景场误差和采用9km区背景场误差插值成3km区背景场误差的预报差别,exp6和14试验观测误差的调节对分析和预报的影响。需要说明的,各试验中27和9km两区保持不变,所做的调整主要在3km区进行。

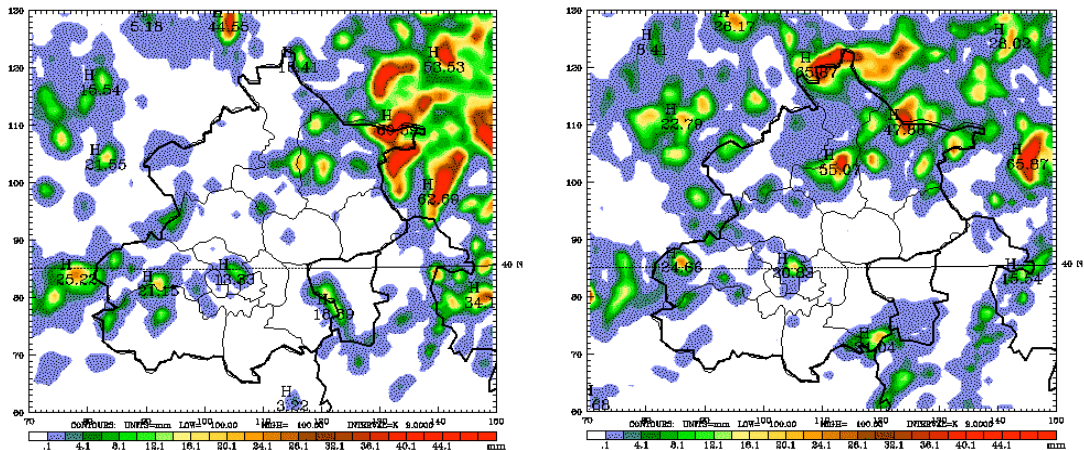
#### 4 试验结果分析

(1) exp5 vs. exp6: exp5的同化更新周期3h,exp6的同化更新周期提高到1h,可以提供每小时滚动更新的预报,当然相应的资源花费也增加到三倍。图3是03和06Z两个试验的0~6h预报累积降水量,对于北京城区的强降水,1h cycle并没有表现出很大的优势,06Z的预报略好于3h cycle,03Z的预报甚至差于3h cycle。从exp6每1hcycle的结果看,它从第5个cycle(05Z起始)起才很好地预报出城区强降水(参见图6),给出有效预报信息的时间较3hcycle滞后2小时。说明在目前的系统配置和观测数据环境以及计算资源条件下,3h cycle仍是一个合适的选择。是否采用1h高频次的cycle,我们将进行更多的试验研究。

3km WRF Init: 0300 UTC Tue 01 Aug 06 3km WRF Init: 0300 UTC Tue 01 Aug 06  
 Fcst: 6.00 h Valid: 0900 UTC Tue 01 Aug 06 (1700 LDT Tue 01 Aug 06) Fcst: 6.00 h Valid: 0900 UTC Tue 01 Aug 06 (1700 LDT Tue 01 Aug 06)  
 Total precip. in past 6 h Total precip. in past 6 h Total precip. in past 6 h



3km WRF Init: 0600 UTC Tue 01 Aug 06 3km WRF Init: 0600 UTC Tue 01 Aug 06  
 Fcst: 6.00 h Valid: 1200 UTC Tue 01 Aug 06 (2000 LDT Tue 01 Aug 06) Fcst: 6.00 h Valid: 1200 UTC Tue 01 Aug 06 (2000 LDT Tue 01 Aug 06)  
 Total precip. in past 6 h Total precip. in past 6 h Total precip. in past 6 h

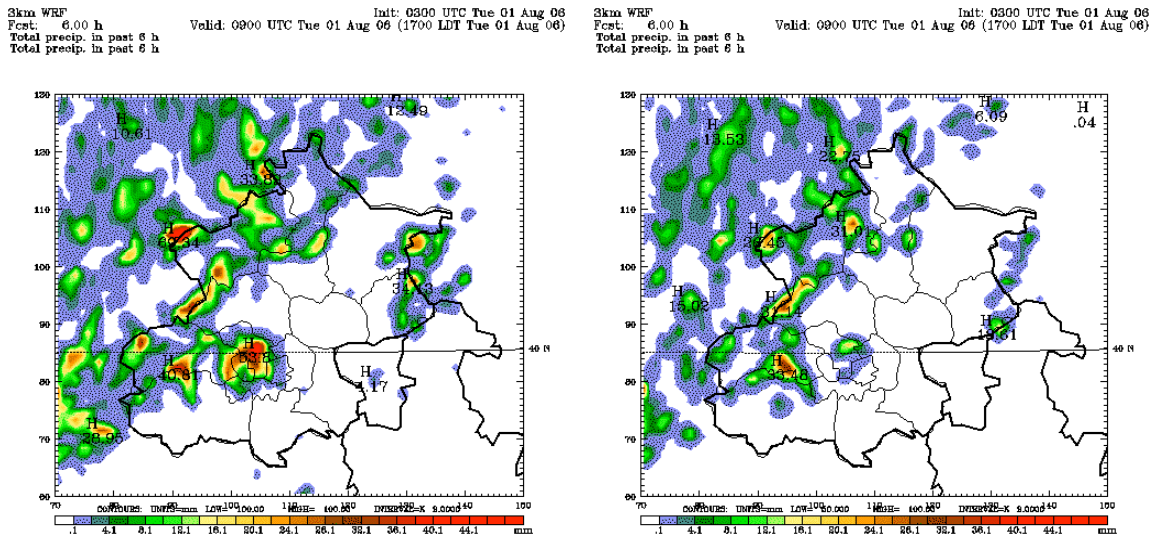






通过比较，明显看出当 $\text{var\_scaling}=0.5$ 时北京城区暴雨的6小时累积降水预报达到53.8mm，降水中心仅比实况略偏南，得到了最好的预报效果。 $\text{var\_scaling}=0.75$ 时预报效果次之，也预报出40mm以上的降水。表明通过调整计算出的3km分辨率区域背景场误差的调节因子 $\text{var\_scaling}$ 可以提高模式降水预报，当调整到0.5即减少背景场误差标准差 $\delta_b$ 为一半，预报效果最好。另一方面也说明在高分辨率区域里过分地引入中小尺度观测信息反而会增加模式初始场的噪声，破坏模式初始场的平衡，导致预报变差。必须进行适当的调节，在引进气象要素变化信息的同时又能保留模式初猜场的动力平衡，反而有利于模式的预报。当然0.5并不一定是最优的参数，需要进行更多的试验来确定。当 $\text{var\_scaling}=0$ 时，同化增量减为0，其实际效果相当于不同化任何观测资料，模式预报对城区的降水没有反映，预报失败。说明在观测信息缺乏的情况下，仅仅依靠背景场的信息是无法对这种尺度小、变化快的中尺度系统作出准确预报的。

(3)  $\text{exp9 vs. exp16}$ : WRF三维变分系统提供插值背景场误差的开关，在没有与模式区域相匹配的BES的情况下打开此开关，通过插值另一区域甚至全球的BES至本区域，进行三维变分分析。其基本做法是在水平方向特征尺度直接除以BES分辨率的倍数关系，回归系数是根据模式的纬向格点数进行线性插值，垂直方向的特征模根据模式垂直层进行线性插值。本文 $\text{exp16}$ 利用9km分辨率的BES插值成3km分辨率BES，水平特征尺度直接除以3，水平回归系数线性插值，垂直模不插值（垂直层数相同），根据单点观测试验，我们发现水平特征尺度除以3导致观测的影响范围过小，因此调整特征尺度因子 $\text{len\_scaling}$ 为 $\sqrt{3}$ ，使插值后特征尺度与计算出的3km分辨率特征尺度基本相同。图5是03和06Z两个试验的0~6h预报累积降水量。两个试验预报的雨区位置基本一致，都预报出城区的降水，但采用插值BES后降雨量级明显变小（仅20mm左右），雨区的范围也明显缩小，预报效果差于采用直接计算的BES。因此建议在计算资源允许的条件下，应计算适合高分辨率的背景场误差。



3km WRF  
Fcst. 6.00 h  
Total precip. in past 6 h  
Total precip. in past 6 h

Valid: 1200 UTC Tue 01 Aug 06 (2000 LDT Tue 01 Aug 06)  
Init: 0600 UTC Tue 01 Aug 06

3km WRF  
Fcst. 6.00 h  
Total precip. in past 6 h  
Total precip. in past 6 h

Valid: 1200 UTC Tue 01 Aug 06 (2000 LDT Tue 01 Aug 06)  
Init: 0600 UTC Tue 01 Aug 06

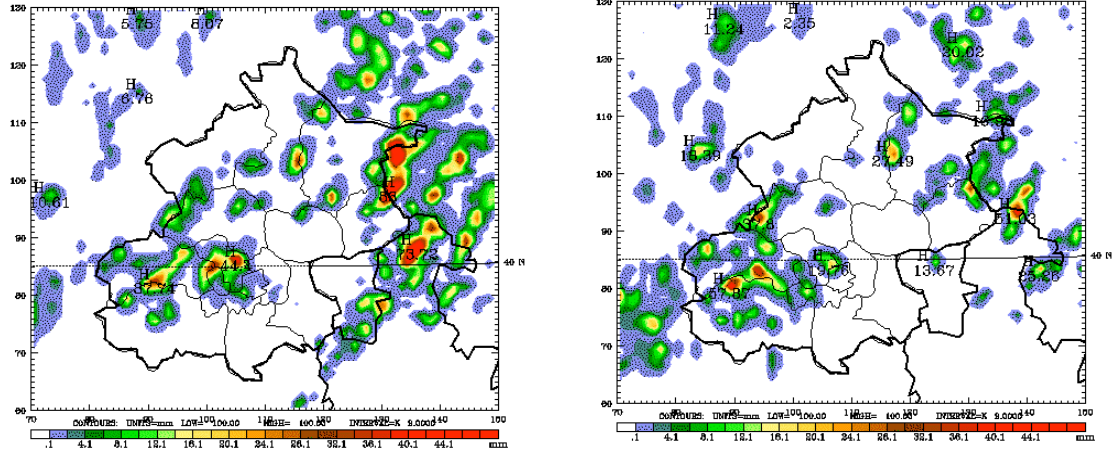


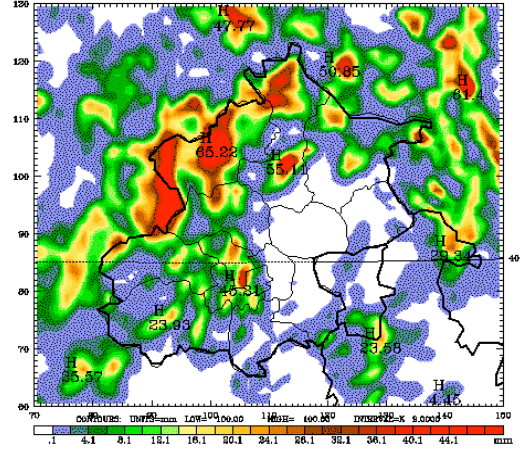
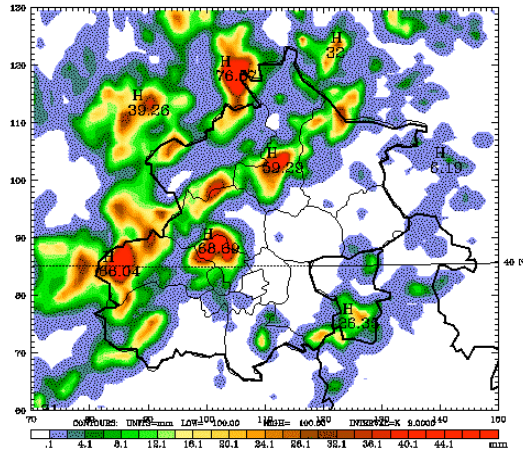
图5 03和06Z两个时次exp9和exp16的0-6h降水预报

(上: 03Z, 下: 06Z, 左: exp9, 右: exp16)

(4) exp6 vs. exp14: Desroziers and Ivanov 于2001年提出一种观测误差自适应调节方法, 基于目标函数观测部分的实际值和期望值来计算观测误差调整参数 ( $\text{Factor} = (\text{actual } J_o / \text{expected } J_o)^{1/2}$ ), 参加统计的样本数越多, 得出的误差调整参数就越可信。本文exp13采用了8月1日01~09Z共9次cycle (1h cycle) 的样本计算出观测误差调整参数1.26, 即增大观测误差标准差  $\delta_o$  为原来的1.26倍, WRFvar自动读取该参数在同化中使用, 作用类似于减少背景场误差。图6是05和06Z两次cycle两个试验的0~6h预报累积降水量。与实况相比, 05Z的预报exp16要略差, 06Z的预报exp16明显较优。从逐小时累积降水预报看(图略), 调整观测误差后很好地改善了降水时间的预报, 预报降雨的时段与实况非常地吻合, 而观测误差调整之前的预报降水比实况提前了2个小时。从表2的05Z cycle的3h累积降水预报检验TS评分看(降水观测来源于北京地区自动站逐小时观测降水), exp16的得分大大超过了exp13, 这应该完全归功于其对降水时段的准确预报。但我们也注意到调整观测误差后的降雨范围变大了, 出现了许多强的降水中心, 尤其是在河北境内。由于目前无法取得相应的观测降水加以验证, 无法判断其是否是虚假降水。

3km WRF  
 Fcst: 6.00 h  
 Total precip. in past 6 h  
 Total precip. in past 6 h  
 Valid: 1100 UTC Tue 01 Aug 06 (1900 LDT Tue 01 Aug 06)  
 Init: 0500 UTC Tue 01 Aug 06

3km WRF  
 Fcst: 6.00 h  
 Total precip. in past 6 h  
 Total precip. in past 6 h  
 Valid: 1100 UTC Tue 01 Aug 06 (1900 LDT Tue 01 Aug 06)  
 Init: 0500 UTC Tue 01 Aug 06



3km WRF  
 Fcst: 6.00 h  
 Total precip. in past 6 h  
 Total precip. in past 6 h  
 Valid: 1200 UTC Tue 01 Aug 06 (2000 LDT Tue 01 Aug 06)  
 Init: 0600 UTC Tue 01 Aug 06

3km WRF  
 Fcst: 6.00 h  
 Total precip. in past 6 h  
 Total precip. in past 6 h  
 Valid: 1200 UTC Tue 01 Aug 06 (2000 LDT Tue 01 Aug 06)  
 Init: 0600 UTC Tue 01 Aug 06

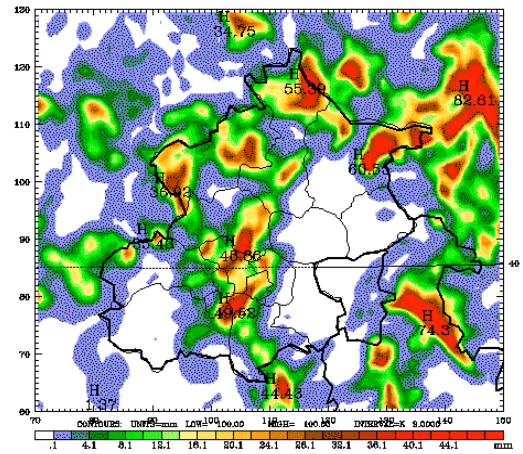
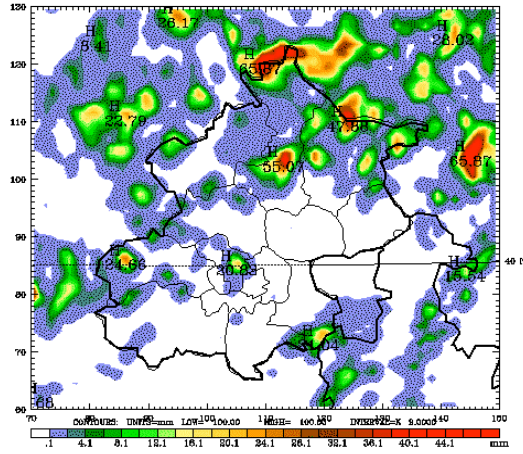


图6 05和06Z两个时次exp6和exp14的0-6h降水预报  
 (上: 05Z, 下: 06Z, 左: exp6, 右: exp14)

表2 3小时累积降水TS评分 (05Z cycle)

预报时间 阈值(mm)	3	6	9	12
0.1	0.12	0.21	0	0
	0.23	0.46	0.08	0
1	0.03	0.14	0	0
	0.08	0.35	0	0
5	0	0.09	0	-99.9
	0	0.25	0	-99.9
10	0	0	0	-99.9
	0	0.1	0	-99.9

25	0	0	0	-99.9
	0	0	0	-99.9
50	-99.9	0	-99.9	-99.9
	-99.9	0	-99.9	-99.9

(5) exp9 vs. exp15: 北京及周边地区目前建有43个地基GPS站(分布见图7), PW水汽观测频次30分钟。在经过质量控制后,进入同化的PW观测共有28个。图8是03和06Z两个试验的0~6h预报累积降水量,可以看出,同化PW资料之前,预报的城区降水不到15mm,且范围很小,同化GPSPW资料后,降水中心大值达到53.8mm,雨区范围明显增大,雨量和雨区都非常接近实况。说明高频次的GPS水汽观测能迅速反映降水发生前大气中水汽的累积,同化以后明显增加了模式含水量,使模式能够预报出城区的强降水。

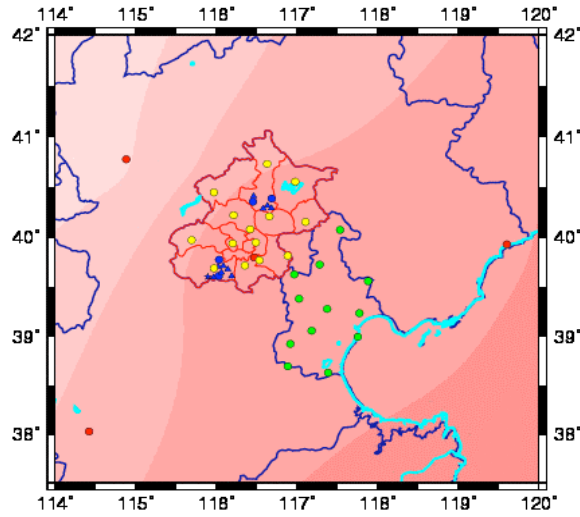
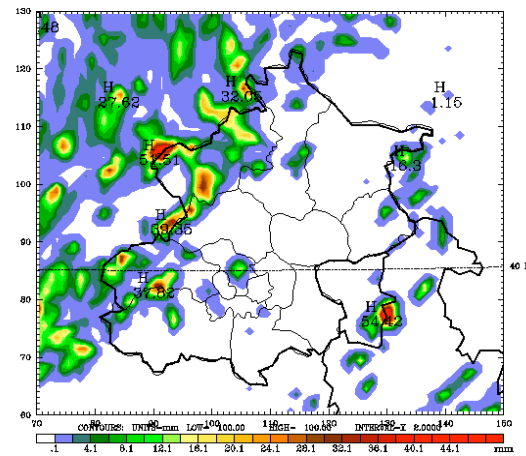
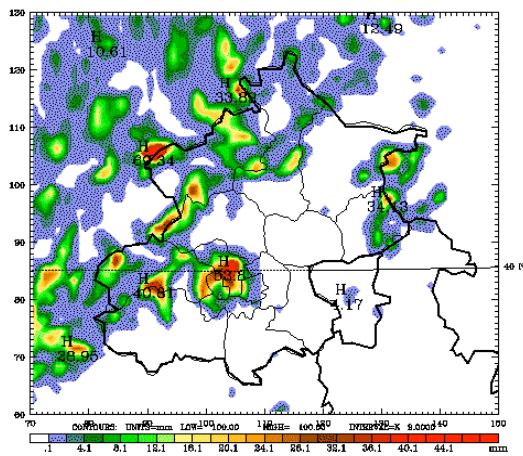


图7 北京及周边地区地基GPS站分布(颜色点代表站的位置)

3km WRF Init: 0300 UTC Tue 01 Aug 06 3km WRF Init: 0300 UTC Tue 01 Aug 06  
 Fcst: 6.00 h Valid: 0900 UTC Tue 01 Aug 06 (1700 LDT Tue 01 Aug 06) Fcst: 6.00 h Valid: 0900 UTC Tue 01 Aug 06 (1700 LDT Tue 01 Aug 06)  
 Total precip. in past 6 h Total precip. in past 6 h Total precip. in past 6 h Total precip. in past 6 h



3km WRF      Init: 0600 UTC Tue 01 Aug 06      3km WRF      Init: 0600 UTC Tue 01 Aug 06  
 Fcst: 6.00 h      Valid: 1200 UTC Tue 01 Aug 06 (2000 LDT Tue 01 Aug 06)      Fcst: 6.00 h      Valid: 1200 UTC Tue 01 Aug 06 (2000 LDT Tue 01 Aug 06)  
 Total precip. in past 6 h      Total precip. in past 6 h      Total precip. in past 6 h      Total precip. in past 6 h

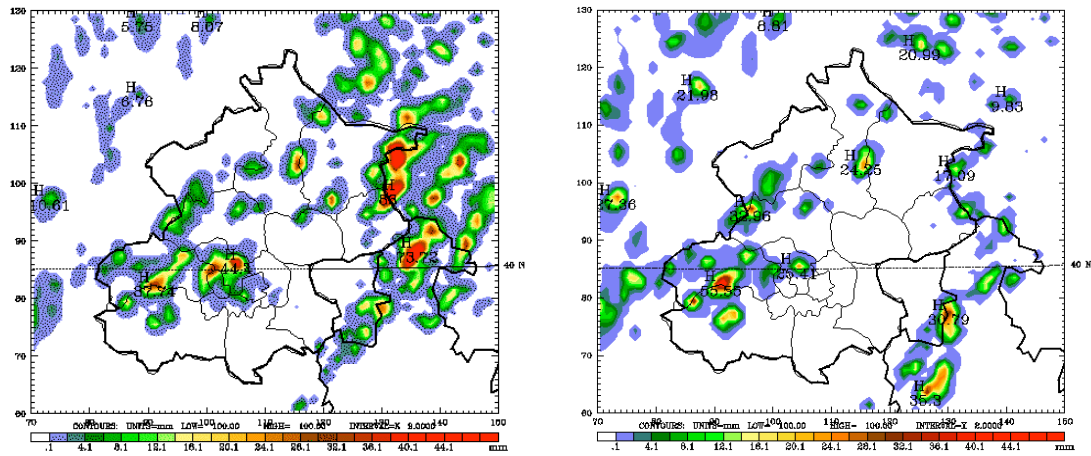


图8 03和06Z两个时次exp9和exp15的0-6h降水预报  
 (上: 03Z, 下: 06Z, 左: exp9, 右: exp15)

## 5 小结

本文采用高分辨率的快速更新循环同化系统对2006年8月1日导致北京城区局地短时暴雨的一次飊线过程进行了模拟试验，得到了以下几点结论：

- (1) 应用高分辨率的快速更新循环同化系统能更加有效地同化多时次的本地中小尺度观测资料，抓住快速变化的中小尺度系统。在对本次飊线过程的研究中，03和06Z的两次cycle就很好地抓住系统发生前气象要素的变化，对飊线过程及其产生的城区短时暴雨进行了较好地预报。
- (2) 同化GPSPW前后的模拟试验对比说明了高观测频次的水汽资料同化对短时强降水过程预报的重要性。高频次的GPS水汽观测资料能迅速反映降水发生前大气中水汽的累积，同化以后明显增加了模式含水量，使模式能够预报出城区的强降水。
- (3) 在高分辨率区域里过分地引入中小尺度观测信息反而会增加模式初始场的噪声，破坏模式初始场的平衡，导致预报变差。必须进行适当的调节，在引进气象要素变化信息的同时又能保留模式初猜场的动力平衡，反而有利于模式的预报。
- (4) 应用观测误差的自调节方法计算出观测误差的调节参数并在WRFvar中使用，虽然在降雨的量级和落区的预报上与实况还有偏差，但是很好的改善了降雨时间的预报，预报降雨的时段与实况非常地吻合。在累积了足够的样本得到更准确的观测误差调节参数，有望进一步提高模式的分析和预报效果。
- (5) 插值出的高分辨率背景场误差需要进一步的调节才能达到更好的预报效果。在计算条件允许的情况下，建议积累高分辨率的预报场计算背景场误差，插值只是一种暂时的替代方式。

## 参考文献

Desroziers G., and S. Ivanov, 2001: Diagnosis and adaptive tuning of observation-error parameters in a variational assimilation. *Q. J. R. Meteorol.* **127**, 1433-1452