

李玉焕, 张朝林, 仲跻芹, 等. 2013. 北京地区暴雨个例的观测敏感区研究 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 651–661, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12020.
Li Yuhuan, Zhang Chaolin, Zhong Jiqin, et al. 2013. Case study of observations and sensitive region of heavy rainfall in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 651–661.

北京地区暴雨个例的观测敏感区研究

李玉焕^{1,2} 张朝林³ 仲跻芹² 孟智勇⁴

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

3 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

4 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

摘要 利用基于集合预报的相关方法对 2009 年 7 月 23 日发生在北京及周边地区的暴雨过程的观测敏感区进行了分析。通过 WRF (Weather Research Forecast) 三维变分方法对初始场进行随机扰动, 形成 30 个初始集合样本, 做了预报时效为 12 h 的集合预报。利用该方法分析检验区 (北京及周边地区) 累积降水 [14:00 (北京时间, 下同) 至 20:00] 相对于初始时刻 (08:00) 各基本要素的敏感性, 确定感性要素及其对应的区域。研究发现初步确定的感性要素为水汽和温度, 对应的敏感区分别位于北京的西南侧和北京的东北侧, 且通过实况分析可知初步确定的感性要素和对应的敏感区具有明确的物理意义。还进一步通过观测系统模拟试验 (OSSE) 的资料同化验证所确定的敏感区, 结果表明在水汽对应的敏感区内同化水汽对降水的预报结果有明显的改进; 在温度对应的敏感区内同化温度, 降水的预报准确率有了明显的提高, 说明了初步确定的感性要素和敏感区的正确性。在水汽对应的敏感区内同化水汽的同时在温度对应的敏感区内同化温度, 使降水预报的技巧有大幅度的提高, 说明了温度和水汽的共同作用对提高降水预报准确率贡献最大。因此, 通过基于集合预报的相关方法能够快速的确定的敏感区。研究结果将为确定北京暴雨的观测敏感区提供参考。

关键词 暴雨 集合预报 感性要素 敏感区 观测系统模拟试验 (OSSE)

文章编号 1006-9585 (2013) 05-0651-11

中图分类号 P45

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12020

Case Study of Observations and Sensitive Region of Heavy Rainfall in Beijing Area

LI Yuhuan^{1,2}, ZHANG Chaolin³, ZHONG Jiqin², and MENG Zhiyong⁴

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

3 Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

4 Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract Using a statistical correlation based on an ensemble forecast, observations and the sensitive region of a heavy rainfall that occurred around Beijing on July 23 2009 are analyzed. An ensemble of 30 initial samples is constructed using WRFDA (Weather Research and Forecasting Data Assimilation) and then a 12-h forecast is produced on the basis of the initial samples. To determine the sensitive variables and their regions, the sensitivity of the accumulated precipitation in the verification region (Beijing area) to the basic variables of the initial conditions is studied using the method described

收稿日期 2012-02-07 收到, 2012-06-25 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2008BAC37B03, 国家自然科学基金青年科学基金项目 40905052, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200706042

作者简介 李玉焕, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值预报和数值模拟的研究。E-mail: yhli@ium.cn

above. A preliminary determination indicates that the sensitive variables are the water vapor and temperature, and their respective sensitive regions are southwest and northeast of Beijing. An analysis of the real atmosphere found that the sensitive variables and their sensitive areas have a clear physical meaning. Moreover, data assimilation of an observing system simulation experiment is used to verify the sensitive region. It is shown that assimilating the sensitive variable water vapor in its sensitive region can improve the precipitation forecast accuracy; assimilating the sensitive variable temperature in its sensitive region can also improve the forecast quality, indicating the correctness of the sensitive variables and sensitive areas. Assimilating the sensitive variable water vapor in its sensitive region while assimilating the sensitive variable temperature in its sensitive region can have a greater positive effect on the forecast quality, illustrating that the effects of temperature and water vapor yields the greatest improvement in the rainfall prediction accuracy. Therefore, the method of statistical correlation can effectively identify the sensitive variables and their sensitive regions. This study can help to identify the observed sensitive region of rainfall in the Beijing area.

Keywords Heavy rainfall, Ensemble forecast, Sensitive variable, Sensitive region, Observing System Simulation Experiment (OSSE)

1 引言

暴雨是影响我国的主要气象灾害之一,它具有突发性、局地性的特点,给人们的生命财产造成严重损害(陶诗言, 1980)。因此研究如何有效的做好暴雨预报,具有十分重要的意义。

数值预报是提高暴雨预报的重要途径之一(Epstein, 1969)。由于大气是一个高度非线性的系统,因此数值天气预报的结果对初始值的微小误差非常敏感(Lorenz, 1965),如果能够分析出初始误差增长最快并导致预报变坏的区域,改善该区域的初始场,则可提高预报的准确率。为此,前人(Rabier et al., 1996; Zhao et al., 1997; Bergot et al., 1999)提出了所谓适应性观测(目标观测)的概念,即对某一特别区域和时间的天气事件,事先通过数值方法,找到其对应的敏感区,敏感区内增加大气观测信息通过资料同化方案减小该区域数值预报模式的初值误差,从而减少可能快速增长的预报误差,进而提高模式预报准确率。因此首先要进行敏感性分析(胡英等, 2002),这种分析重点集中在分析初始场中与预报效果有密切相关的误差的特征和分布区域。

目前识别敏感区的方法可分为两类:其一是基于伴随模式法,包括奇异向量法(Palmer et al., 1998; Buizza and Montani, 1999; Gelaro et al., 1999)、梯度敏感法(Langland et al., 1999; Baker and Daley, 2000)和准线性拟近似法(Pu and Kalnay, 1999);其二是基于集合的方法:集合发散度法(Lorenz and Emanuel, 1998)、集合变换法(ENKF)(Szunyogh et al., 2000, 2002)和集合卡尔曼滤波法(ETKF)

(Bishop et al., 2001; Majumdar et al., 2001)。Mu et al. (2003)和(Mu and Zhang, 2006)提出一种新的目标观测方法——条件非线性最优扰动(CNOP)法。这些方法中ETKF和CNOP为目前寻找敏感区的主要方法。ETKF方法利用集合变换和无量纲的思想求解与观测有关的误差协方差矩阵,估计出不同观测造成的预报误差协方差的减少量,预报误差减少最多的观测所对应的区域为敏感区。但Bishop and Toth (1999)指出ETKF方法的应用也受到一些限制,比如分析误差协方差矩阵足够精确,以提供恰当的背景误差场。CNOP是指一类初始扰动,在一定的约束条件下,该类初始扰动的非线性发展在所有初始扰动中在验证时刻验证区域是最大的。但CNOP方法计算量大,编写维护困难,王斌和谭晓伟(2009)发展了快速计算CNOP的算法,将计算机时缩小。

集合预报不仅是提高数值天气预报的主要途径之一,而且被用来进行敏感性分析。Ancell and Hakim (2007)、Torn and Hakim (2008)通过分析集合预报的初始误差和预报变量误差,研究检验区的预报变量对初始时刻基本要素的敏感性。Hawblitzel and Zhang (2007)利用WRF (Weather Research Forecast) 三维变分方法WRF-3DVAR产生集合样本,并进行集合预报,在此基础上通过关心区域关心预报变量与初始时刻各基本要素的相关,对2003年6月10日的中尺度对流涡旋可预报性进行研究,结果表明预报误差与中层涡旋和上层扰动密切相关。Sippel and Zhang (2008)利用同样方法对热带气旋的可预报性进行研究,结果表明预报误差与初始时刻湿对流和能量密切相关。

这种基于集合预报的相关方法,能够较轻松、

简便地分析出对某一特定时间和区域预报变量敏感性最大的要素及其分布特征，并且能够通过清晰的物理机制来解释，它与 ETKF 方法和 CNOP 方法相比，更易于实现。

目前国内还没有开展利用集合预报的相关方法对我国北方暴雨敏感区方面的研究。因此本文通过该方法，寻找 2009 年 7 月 23 日北京地区暴雨的敏感区。旨在为有限区域内观测站的布设提供参考，同时也使我们对暴雨过程的影响因子有进一步的认识。

2 资料、模式和方法介绍

2.1 资料

本文的研究时段为 2009 年 7 月 23 日 08:00(北京时间，下同)至 20:00，所采用的资料主要为：(1) 美国 NCEP 每日 4 次的再分析资料，其水平分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)；(2) 我国新一代天气雷达观测到的逐 6 min 的反射率因子和径向速度资料；(3) 京、津、冀地面自动气象站逐小时的观测资料，主要包括海平面气压、温度、露点温度、降水、风向、风速、最大瞬时风速等气象要素。

2.2 模式

本文选用 WRF V3.1 模式，采用 NCEP 的 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 再分析资料作为初始场和边界条件。模拟采用三重嵌套，中心点所在位置为 (40°N , 116°E)，各区域的模式格点数分别为 151×151 、 184×142 、 199×172 ，网格距依次为 27 km、9 km、3 km，垂直方向 38 层。采用的物理参数化方案包括 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案 (Kain, 2004) (最内层不使用积云对流方案)，WDM6 (WRF Double-Moment 6-class) 微物理方案 (Lim and Hong, 2010)，YSU (Yonsei University) 边界层方案 (Noh et al., 2003)。

2.3 方法

集合预报初始场由 WRF 三维变分方法产生。首先遵从平均值为 0、标准差为 1 的正态分布随机产生一组控制变量，控制变量包括流函数、非平衡速度势、非平衡温度、相对湿度和非平衡气压，然后将随机控制变量通过经验正交函数和递归滤波转换为模式变量。由于三维变分采用的是增量的形式，产生的模式变量增量与基本场叠加就形成了扰动集合样本。控制变量是随机产生的，重复 n 次计

算过程可产生 n 个样本，这样产生的集合发散度是可调的。为了使集合预报具有可信度，扰动变量的标准偏差在 NCEP 资料的分析误差范围之内。风速 (U 、 V) 的标准偏差约为 2 m/s，比湿 (Q) 的标准偏差约为 1 g/kg，温度 (T) 的标准偏差约为 1 K。

目前，集合样本数没有一个固定的标准，国内外已实现业务化和准业务化的中短期集合预报系统的成员数为 10~50 个不等 (陈静等, 2002)，本文分别对 30 个成员和 50 个成员的集合预报系统的合理性进行比较。王晨稀等 (2007) 指出集合平均和观测场 (这里所用的是探空资料) 之间的均方根误差 (D) 和各个集合成员和集合平均之间的标准差 (D_s , 即发散度) 之间的比值越接近于 1 集合越合理。 D 和 D_s 的计算公式如下：

$$D = \sqrt{\frac{1}{a} \sum_{o=1}^a (x_o - \bar{x}_o)^2}, \quad (1)$$

$$D_s = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_{i,n} - \bar{x}_i)^2}, \quad (2)$$

其中， x 表示扰动的基本要素， a 表示由探空资料提供的要素 x 的观测个数 (层数 \times 站点数)， x_o 表示第 o 个探空数据， \bar{x}_o 表示插值到 x_o 位置的集合平均数据； m 表示每个成员的格点数， N 代表集合成员数， $x_{i,n}$ 和 \bar{x}_i 分别表示第 n 个集合成员的第 i 个格点的数据和该点数据的集合平均值。

图 1 为初始时刻即 7 月 23 日 08:00 各扰动要素的 D 与 D_s 的比值，分析可知 30 个成员和 50 个成员的集合预报系统都具有较好的预报性，而且差别并不明显。因此，综合集合的合理性和资源限制，本文利用上述方法产生 30 个集合初始样本，并在

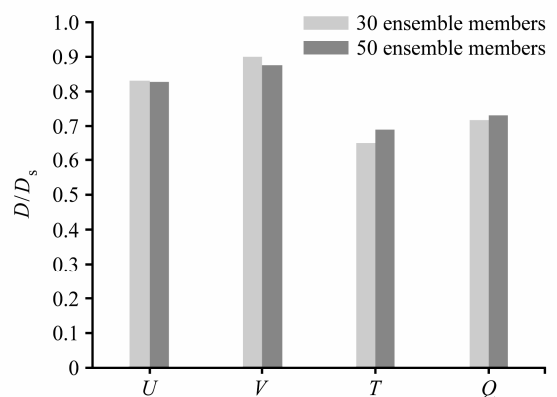


图 1 2009 年 7 月 23 日 08:00 (初始时刻) 扰动变量 (U 、 V 、 T 、 Q) 的 D/D_s 值 (浅色和深色柱状图分别代表 30 个和 50 个集合成员)

Fig. 1 D/D_s of the perturbation variables (U , V , T , Q) at 0800 LST 23 July 2009 (initial time). Light and dark histograms indicate 30 and 50 ensemble members, respectively

此基础上进行预报时效为 12 h 的集合预报。

在上述集合预报的基础上利用相关方法 (Hawblitzel and Zhang, 2007) 寻找本次个例的敏感区, 初始时刻各扰动要素偏差可表示为 U' 、 V' 、 T' 、 Q' , 它们与 14:00 到 20:00 之间的 6 h 累积降水总量偏差求相关。相关系数大说明了该要素为降水的敏感性要素所对应的区域为敏感区, 进一步通过观测系统模拟试验 (OSSE) 观测系统模拟试验对所求敏感性要素及其对应敏感区验证。相关系数计算方法:

$$r(x_{ijk}, y) = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_{ijkn} - \bar{x}_{ijk})(y_n - \bar{y})}{\left[\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_{ijkn} - \bar{x}_{ijk})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2 \right]^{1/2}}, \quad (3)$$

其中, i, j, k 为模式三维格点, x_{ijk} 表示初始时刻 (08:00) 该格点处基本要素的扰动偏差, 如 U' 、 V' 、 T' 、 Q' , y 表示检验区内预报的总降水量 (14:00 至 20:00 的 6 h 累积降水) 偏差, N 表示集合成员数。

3 天气分析

3.1 天气实况

本文研究的暴雨过程主要发生于 2009 年 7 月 23 日的 14:00 至 20:00, 由图 2a 可知, 此次降水为一次飚线过程所致, 飚线进入和离开北京的时间分别为 14:00 和 19:00。分析图 2b 可知, 降水分布很不均匀, 最大降水落区在北京东南部及北京和天津接壤处, 北京城区 6 h 累计最大降水为 74 mm。由于这场暴雨强度大, 降雨时间集中, 给北京市交通

带来极为严重的影响, 部分城区路段严重积水。

3.2 天气形势分析

2009 年 7 月 23 日北京的暴雨过程是发生在对流层高层高空急流和对流层中层一个东北冷涡的大尺度环流背景之下。从 500 hPa 的形势场看到 (图 3a), 在暴雨发生前的 6 h 即 7 月 23 日 08:00, 我国东北地区存在一个低涡, 冷中心位 45°N 内蒙境内, 最低值为 564 dagpm, 冷中心的低值为 -13.5 °C, 低涡后有冷空气补充, 冷空气南下影响北京地区。由 7 月 23 日 14:00 850 hPa (图 3b) 可知, 北京位于一个大的低压带内, 且位于低压中心的前部, 在北京的西北侧存在等温线密集带, 说明有锋区存在。

3.3 水汽条件

从 23 日 14:00 850 hPa 的水汽通量场 (图 3c) 可知, 北京地区的水汽主要来自北京的西南侧, 交汇于北京的西北侧。分析同一时刻地面的温度露点差分布图 (图 3d) 可知, 北京东南侧温度露点差很小, 水汽近于饱和; 北京的西北侧温度露点差很大, 最大差值为 27 °C, 空气很干, 形成明显的干线。

3.4 动力条件、热力条件

沿图 3b 蓝色粗实线做 7 月 23 日 14:00 的温度平流与垂直速度的剖面图 (图 3e), 在北京西北侧 700 hPa 存在最大垂直速度 0.8 Pa/s, 最大垂直速度附近, 有上冷下暖的对流不稳定层结。

强对流天气预报一般是在有利的天气形势下, 结合一些相关物理参数来预测, 常用的参数包括指标有 K 指数、沙氏指数 (SI) 和对流有效位能

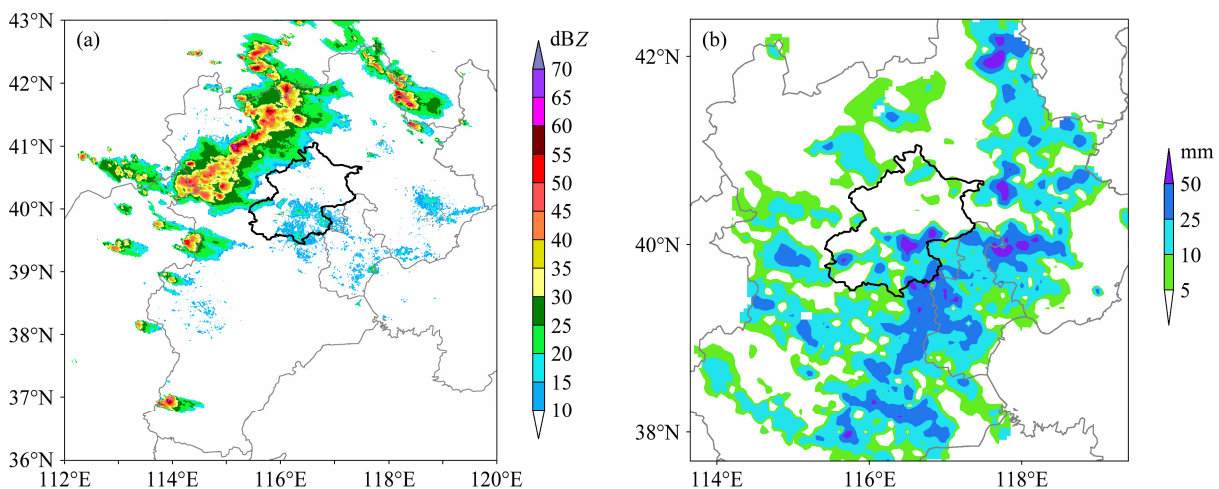


图 2 2009 年 7 月 23 日 (a) 14:00 雷达组合反射率和 (b) 14:00 至 20:00 自动站累积降水

Fig. 2 (a) Composite radar reflectivity at 1400 LST 23 Jul 2009; (b) accumulated precipitation distribution from 1400 LST to 2000 LST on 23 Jul 2009

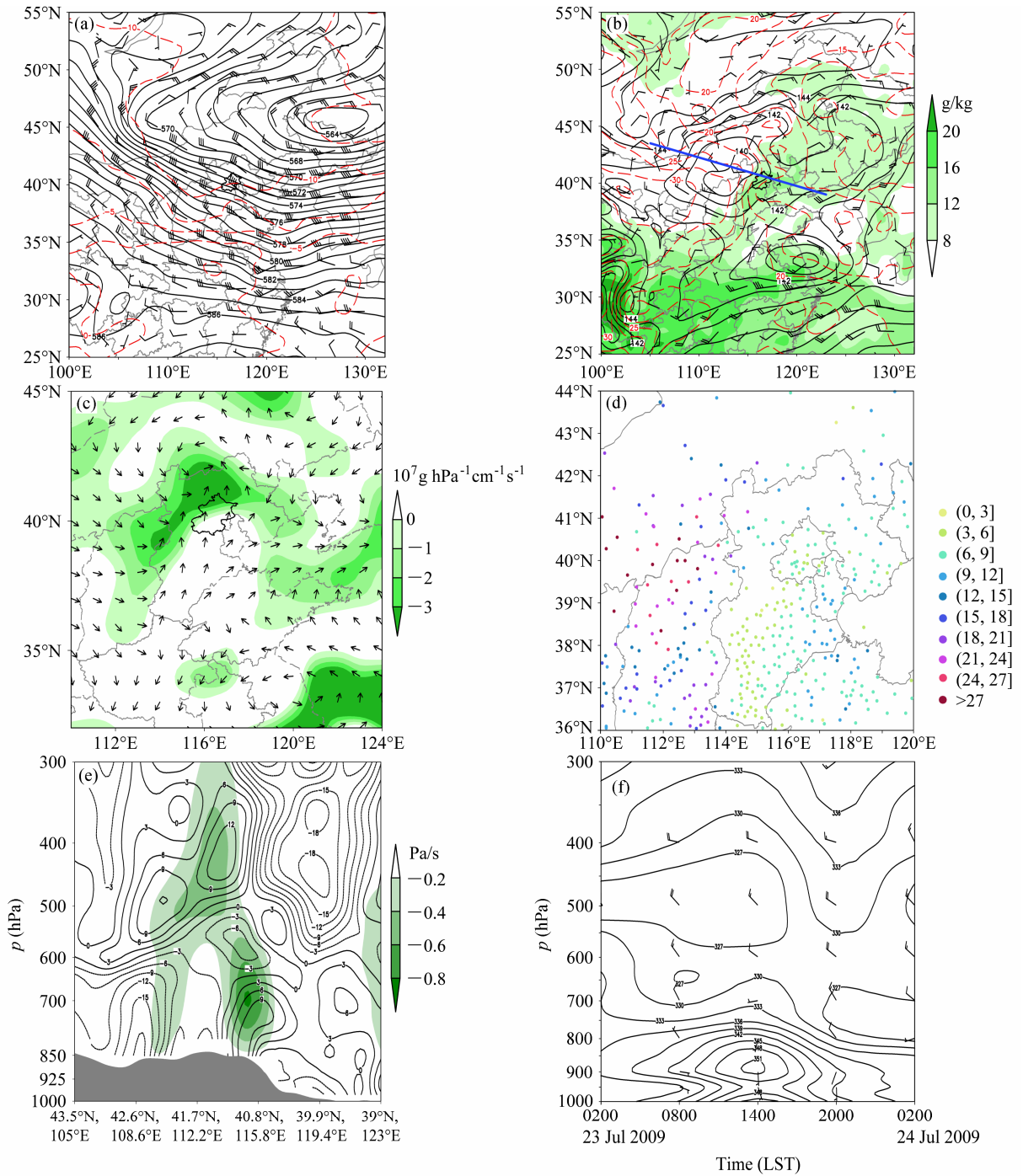


图3 (a) 2009年7月23日08:00 500 hPa 高度场(实线, 单位: dagpm)、温度场(虚线, 单位: °C)、风场(单位: m/s); (b) 2009年7月23日14:00的850 hPa 高度场(实线, 单位: dagpm)、温度场(虚线, 单位: °C)和比湿(填色)和风场的分布图; (c) 850 hPa 水汽通量矢量合成(箭头)和水汽通量散度(填色)的叠加图; (d) 地面温度露点差 $T - T_d$ (单位: °C) 水平分布图; (e) 沿图 3b 蓝色粗实线所做的温度平流(等值线, 单位: $10^{-5} \text{ °C s}^{-1}$) 和垂直速度(填色)的垂直剖面图; (f) 北京地区(40°N, 116°E)假相当位温(单位: K)和风速的时间—高度剖面图

Fig. 3 (a) 500-hPa geopotential height (solid line, unit: dagpm), temperature (dashed line, unit: °C), and wind (m/s) at 0800 LST 23 Jul 2009; (b) 850-hPa geopotential height (solid line, unit: dagpm), temperature (dashed line, unit: °C), specific humidity (shaded), and wind field at 1400 23 Jul 2009; (c) composite vector (arrow) and divergence (shaded) of 850-hPa moisture flux; (d) distribution of the difference between dew point temperature and temperature ($T - T_d$) (°C) at surface; (e) vertical section of thermal advection (contour, unit: $10^{-5} \text{ °C s}^{-1}$) and vertical velocity (shaded) along the blue line in Fig. 3b; (f) pseudo-equivalent potential temperature θ_{se} (K) and wind in Beijing (40°N, 116°E)

(CAPE)。一般来讲,出现强对流天气时 K 指数大于 35°C 、 SI 小于 -3°C 、 $CAPE$ 值大于 1500 J/kg 。对 54511 探空资料进行分析,7月23日 08:00 K 指数、 SI 和 $CAPE$ 值分别为 25°C 、 -0.32°C 和 593.6 J/kg ; 14:00 K 指数、 SI 和 $CAPE$ 值分别为 39°C 、 -7.09°C 和 2551 J/kg ,以上各个环境指数表明 14:00 大气处于强不稳定状态,在地面冷锋的抬升作用的触发下,不稳定能量迅速释放。图 3f 为北京地区 (40°N , 116°E) 假相当位温高度一时间序列的剖面图,可知在暴雨前即 7月23日 08:00,对流层中下层存在弱的对流不稳定,14:00 850 hPa 存在明显的暖中心,对流不稳定增强,20:00 层结趋近于稳定,说明不稳定能量在 08:00 到 14:00 积累,14:00 到 20:00 之间爆发,与降水时段相对应。

综上所述,这次暴雨为一次飑线过程所致,地面有冷锋与之相对应,暴雨所需要的持续性的水汽输送主要来自于北京的西南侧,交汇区域与上升运动处相对应,对流不稳定能量在 14:00 大量积累,随后释放,降水发生。

4 敏感区的诊断

图 4a 为初始时刻 08:00 水汽偏差和 6 h 累积降水偏差的相关分布图,可知相关性最大的区域位于北京的西南侧,相关系数达 0.7,这说明初始时刻的水汽为降水的敏感性要素所对应的区域位于北京的西南侧。图 4b 为初始时刻 08:00 地面的风场和比湿分布图,可知在北京的西南侧有大片的偏南风将水汽由高值区输送到低值区。所求的敏感区与水汽通道的位置基本一致,这说明了所求的敏感性要素水汽及其对应的敏感区有明确的物理意义。

图 5a 为初始时刻 08:00 温度偏差和 6 h 累积降水偏差的相关分布图,可知相关性最大的区域位于北京的东北侧,相关系数达 -0.8 ,这说明初始时刻基本要素温度是本次降水的敏感性要素,其对应的敏感区位于北京的东北侧。图 5b 为初始时刻 700 hPa 温度平流分布图,可知北京上空为冷平流,主要受东北冷涡后部冷空气的影响。敏感性要素温度对应的敏感区与冷平流所在的位置基本一致,这说明了所求的敏感性要素温度和其对应的敏感区有明确的物理意义。

5 OSSE 试验

科学布置观测网能够有效提高数值预报的准确率(张朝林和王迎春,2002)。观测系统模拟试验(OSSE)是通常用来评估新的观测系统配置是否合理、分析模拟观测资料效果的一种有效方式(Arnold and Dey, 1986)。它将一定设置下的数值模式预报的格点资料作为“真实大气”(nature run)或称为“参考大气”,并从该“真实大气”中提取模拟观测资料,在一个不同设置下的模式中同化该模拟观测资料,通过评估加入模拟观测资料的预报与“真实大气”预报的拟合程度,可以判断观测系统的效果。

本文通过分析集合预报中的各个成员的 14:00 至 20:00 6 h 累积降水分布图,选择一个与实况降水最接近的(good)成员作为真实大气,从中提取模拟探空资料,同化到一个与实况降水相差较远(bad)的成员的初始场中,在不同区域内同化模拟探空资料并进行预报,最后通过比较预报结果验证敏感区的有效性。

这里设计 exp1、exp2、exp3、exp4、exp5、exp6、exp7、exp8 和 exp9 试验如表 1 所示,这 9 个试验都是以较差成员的初始场为背景场,在所选择区域内(表 1)同化模拟探空资料,然后进行 12 h 预报,比较降水预报的改进程度。

表 1 exp1、exp2、exp3、exp4、exp5、exp6、exp7、exp8 和 exp9 试验所同化的模拟探空资料

Table 1 The simulation sounding data assimilated in exp1, exp2, exp3, exp4, exp5, exp6, exp7, exp8, and exp9

试验	探空站位置	同化要素
exp1 试验	图 4a 中 3 个实心圆的位置,垂直高度为模式的 1 到 9 层	水汽要素,其他要素缺测
exp2 试验	图 4a 中 3 个三角形的位置,垂直高度同上	水汽要素,其他要素缺测
exp3 试验	图 4a 中 3 个空心圆的位置,垂直高度同上	水汽要素,其他要素缺测
exp4 试验	图 4a 中 3 个叉号的位置,垂直高度同上	水汽要素,其他要素缺测
exp5 试验	图 5a 中 3 个空心圆的位置,垂直 1 到 20 层	温度要素,其他要素缺测
exp6 试验	图 5a 中 3 个三角形的位置,垂直 1 到 20 层	温度要素,其他要素缺测
exp7 试验	图 5a 中 3 个实心圆的位置,垂直 1 到 20 层	温度要素,其他要素缺测
exp8 试验	图 5a 中 3 个叉号的位置,垂直 1 到 20 层	温度要素,其他要素缺测
exp9 试验	图 5a 中 3 个空心圆的位置,垂直 1 到 20 层;图 4a 中 3 个实心圆的位置,垂直高度为模式的 1 到 9 层	温度和水汽要素,其他要素缺测

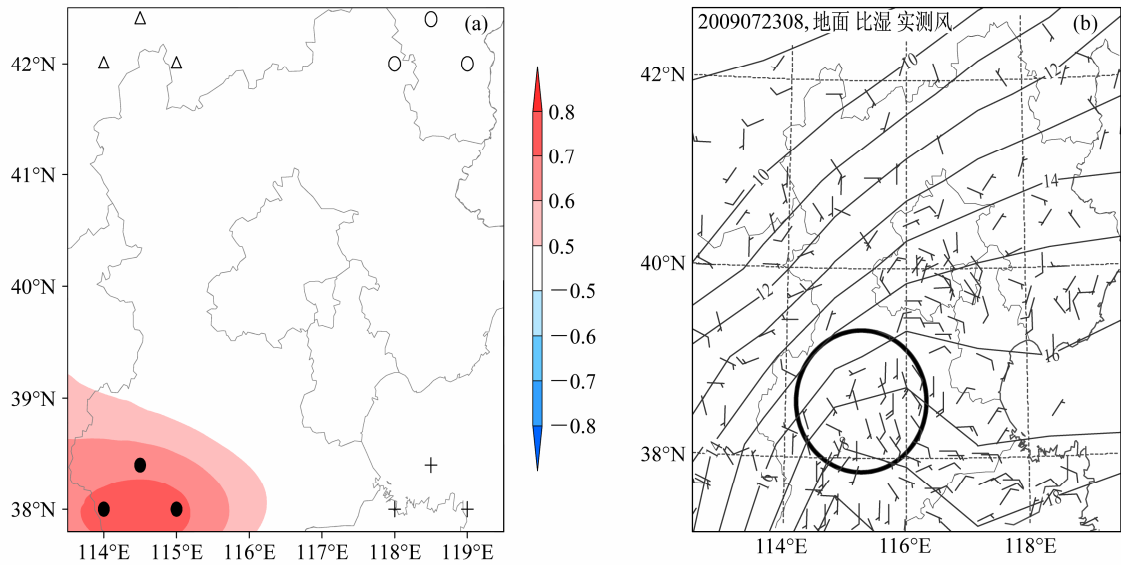


图 4 (a) 2009 年 7 月 23 日 08:00 模式第 8 层 (900 m 左右) 水汽扰动偏差和关心区域 (模式第三重区域, 详见第 2.2 节) 6 h 累积总降水偏差 (14:00 至 20:00) 的相关分布图 (实心圆、空心圆、三角形和叉号为模拟的探空站); (b) 2009 年 7 月 23 日 08:00 地面风场和比湿 (等值线, 单位: g/kg) 叠加图 (图中圆圈覆盖范围为北京西南侧的偏南风区域)

Fig. 4 (a) Correlation between the perturbation error of the initial water vapor and precipitation from 1400 LST to 2000 LST at the eighth level (about 900 m) in the model at 0800 LST 23 Jul 2009 (solid circle, hollow circle, triangle, and cross are the simulation sounding stations); (b) surface wind and specific humidity (contour, unit: g/kg) at 0800 LST 23 Jul 2009, the circle shows the south wind region in the southwest of Beijing

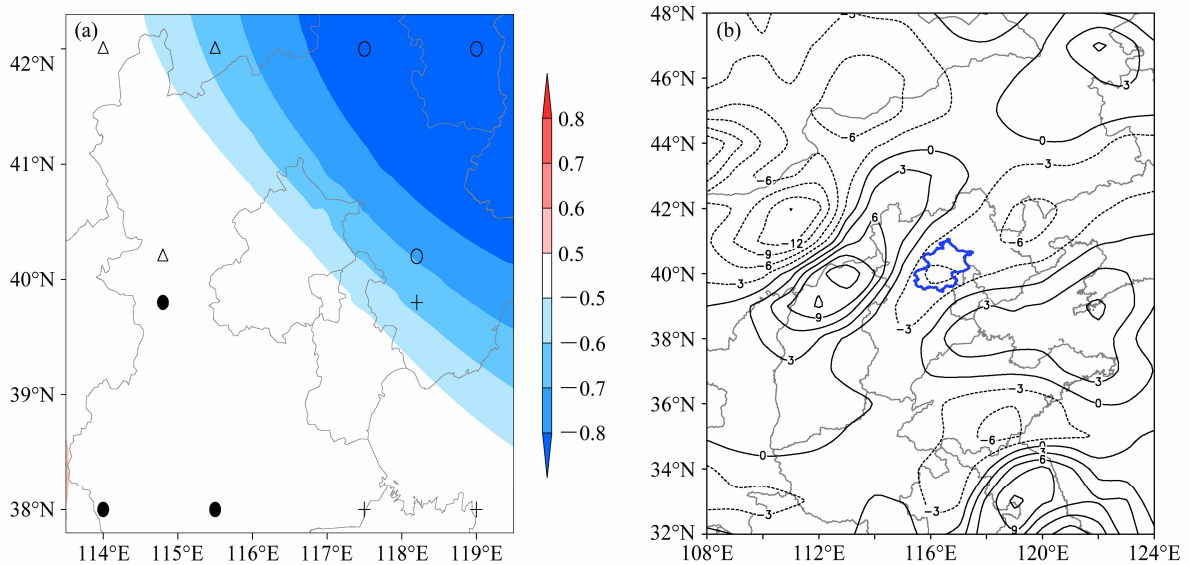


图 5 (a) 2009 年 7 月 23 日 08:00 模式第 14 层 (2000 m 左右) 温度扰动偏差和关心区域 6 h 累积总降水偏差 (14:00 至 20:00) 的相关分布图 (实心圆、空心圆、三角形和叉号为模拟的探空站); (b) 2009 年 7 月 23 日 08:00 700 hPa 温度平流 (等值线, 单位: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$)

Fig. 5 (a) Correlation between the perturbation error of the initial temperature and cumulative precipitation from 1400 LST to 2000 LST at the fourteenth level (about 2000 m) in the model at 0800 LST 23 Jul 2009 (solid circle, hollow circle, triangle, and cross are the simulation sounding stations); (b) 700-hPa thermal advection (contour, unit: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$) at 0800 LST 23 Jul 2009

由表 1 可知本文共设计了 9 个试验, 为了确定敏感性要素水汽和敏感性要素温度各自对应的敏感区的正确性, 分别设计了 exp1 到 exp4 试验 (第一组试验) 和 exp5 到 exp8 试验 (第二组试验) 两组试验。第一组试验中 exp2、exp3、exp4 试验为 exp1 试验的对照试验, 验证敏感性要素水汽及其对

应敏感区的正确性; 第二组试验中 exp6、exp7、exp8 试验为 exp5 试验的对照试验, 验证敏感性要素温度及其对应敏感区的正确性。

从定量的角度来讲, 定义 $A = |P_{\text{good}} - P| / P_{\text{good}}$, 其中 P_{good} 为真实大气的 6 h 累积降水总量 (14:00 至 20:00), P 分别为 bad 成员、exp1、exp2、exp3、

exp4、exp5、exp6、exp7、exp8 和 exp9 试验的 6 h 累积降水总量, 计算得出 $A_{\text{bad}}=63.7\%$ 、 $A_{\text{exp1}}=43\%$ 、 $A_{\text{exp2}}=54.6\%$ 、 $A_{\text{exp3}}=56.9\%$ 、 $A_{\text{exp4}}=56.6\%$ 、 $A_{\text{exp5}}=27\%$ 、 $A_{\text{exp6}}=41\%$ 、 $A_{\text{exp7}}=42\%$ 、 $A_{\text{exp8}}=61\%$ 、 $A_{\text{exp9}}=11\%$ 。由 exp1、exp2、exp3 和 exp4 试验的结果可知无论在水汽对应的敏感区内还是在其它位置同化水汽都能提高降水预报的准确率, 但是 exp1 试验降水的预报准确率明显高于 exp2、exp3、exp4 试验的预报准确率, 这说明水汽确实为本次暴雨的敏感性要素, 且对应的 6 h 敏感区于北京的西南侧。由 exp5、exp6、exp7 和 exp8 试验的结果可知无论在温度对

应的敏感区内还是在其它位置同化温度都能提高降水预报的准确率, 但是 exp5 试验降水的预报准确率明显高于 exp6、exp7、exp8 试验的预报准确率, 这说明温度确实为本次暴雨的敏感性要素, 且对应的 6 h 敏感区于北京的东北侧。同时可知, 第一组试验没有第二组试验对预报的改进的程度大, 这说明温度要素可能在此次暴雨过程更为敏感。exp9 试验的预报误差比 exp1 和 exp5 试验的预报误差还要低, 这说明了在各自的敏感区内同时同化水汽和温度对降水预报结果有最大的影响

比较同化前后各试验的 6 h 累积降水分布(图 6)

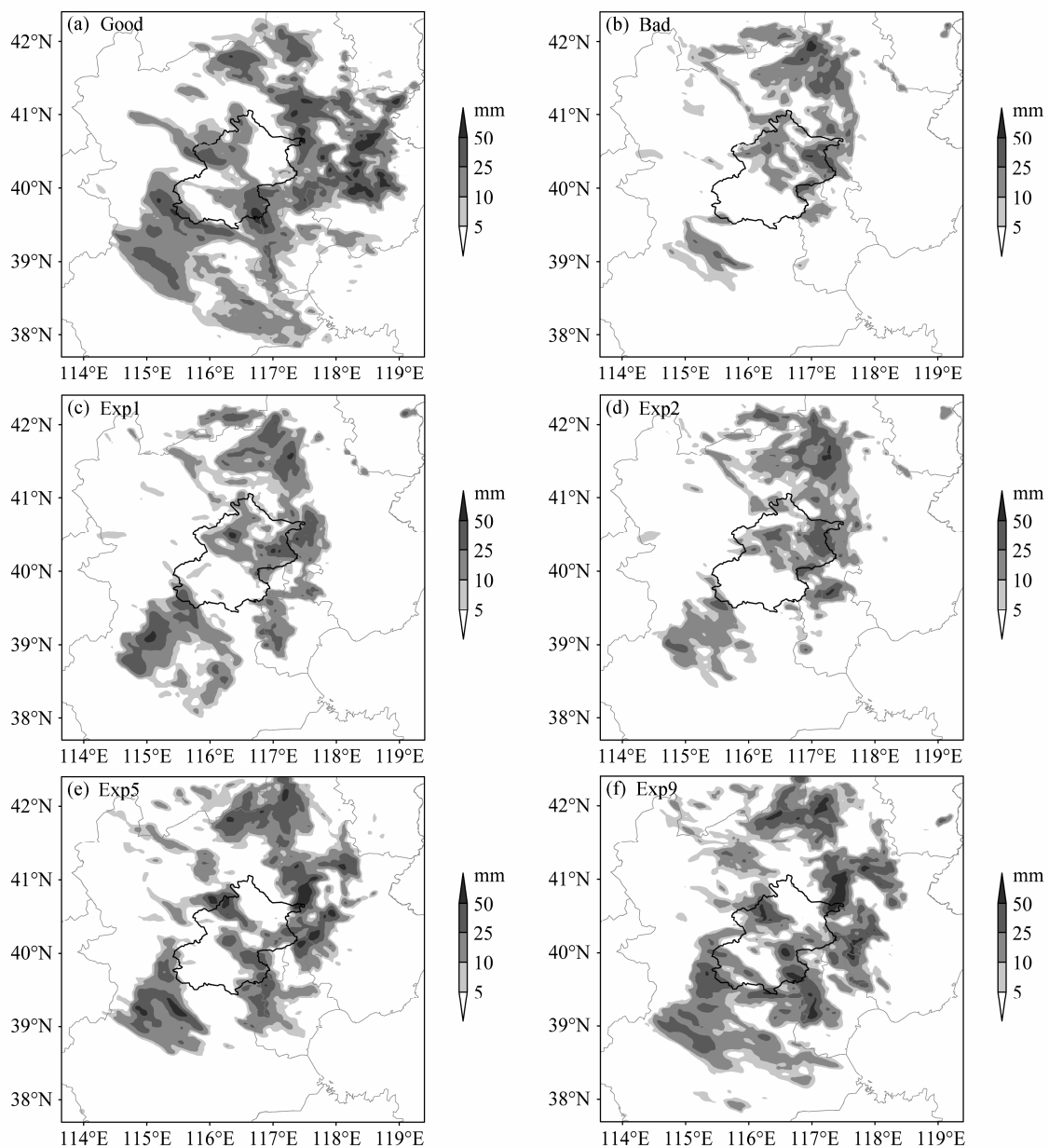


图 6 各验证试验 (good、bad、exp1、exp2、exp5、exp9) 的 6 h 累积降水分布图 (14:00 到 20:00)

Fig. 6 The accumulated precipitation distribution from 1400 LST to 2000 LST in each designed experiment (good, bad, exp1, exp2, exp3, exp4, exp5, and exp9)

可知, good 和 bad 试验分别为真实大气和集合预报中较差成员的 6 h 降水分布, exp2 试验相对于 bad 成员的预报准确率略有提高, 而 exp1 和 exp5 试验能够较好的模拟出北京东侧 (约 40.6°N, 117.5°E 区域附近) 大于 25 mm 的降水区域以及北京西南侧和天津西部的降水。exp9 试验虽然有些落区的降水量级偏大, 但是能够较准确的模拟出大部分降水量级及对应的降水落区。

为进一步定量比较各试验的降水预报准确率, 对 bad 成员、exp1、exp2、exp3、exp4、exp5、exp6、exp7、exp8 和 exp9 试验的 6 h 累积降水做 TS 评分。它是衡量某一降水量级预报准确率的标准, 定义如下:

$$TS = \frac{H}{H + F + M}, \quad (4)$$

其中, H 是预报正确的格点数, F 是空报的格点数, M 是漏报的格点数。TS 取值为 [0, 1], 0 表示对这一等级无的技巧, 1 表示对这一等级降水的预报准确率达 100%, 无空报和漏报。从表 2 可见, 与 bad 成员相比, exp1 和 exp5 试验的预报技巧有明显的提高, 尤其是对大于 25 mm 降水预报改进最多; 虽然 exp2、exp3 和 exp4 试验的预报技巧有所增加, 但是并没有 exp1 试验的预报技巧高, 在降水量级大于 25 mm 的预报上体现最为明显; 虽然 exp6、exp7 和 exp8 试验的预报技巧有不同程度的增加, 但是并没有 exp5 试验的预报技巧高; 同时可知, 第一组试验没有第二组试验的预报技巧高, 这说明温度要素可能对此暴雨过程更为敏感。exp9 试验相对于其它试验各个量级降水的预报技巧都有明显的提高, 对于大于 25 mm 的降水评分达 0.3; 其它任何试验对于大于 50 mm 的降水预评分几乎为 0, 而 exp6 试验对于这个量级的降水评分为 0.12。

综上所述, 在水汽对应的敏感区内同化水汽对降水的预报结果有明显的改进, 说明水汽确实为本次降水的敏感性要素, 对应的敏感区位于北京的西南侧, 且通过实况分析可知该敏感区有明确的物理意义; 在温度对应的敏感区内同化温度, 降水预报准确率明显的提高, 说明温度确实为本次暴雨个例的敏感性要素, 其对应的敏感区位于北京的东北侧, 且物理意义明确; 水汽和温度都为此次暴雨的敏感性要素, 但是温度要素对此暴雨过程更为敏感; 既在水汽的敏感区内同化水汽又在温度的敏感区内同化温度, 降水的预报结果有显著的提高, 说

表 2 bad 成员、exp1、exp2、exp3、exp4、exp5、exp6、exp7、exp8 和 exp9 试验 14:00 至 20:00 6 h 累积降水预报 TS 评分

Table 2 The threat score (TS) of the forecast precipitation from 1400 LST to 2000 LST in bad member, exp1, exp2, exp3, exp4, exp5, exp6, exp7, exp8, and exp9

试验	不同降水量级 TS 评分		
	>1 mm	>10 mm	>25 mm
bad 成员	0.170	0.153	0.028
exp1 试验	0.250	0.253	0.122
exp2 试验	0.2	0.22	0.04
exp3 试验	0.166	0.175	0.043
exp4 试验	0.18	0.21	0.04
exp5 试验	0.23	0.27	0.28
exp6 试验	0.23	0.19	0.17
exp7 试验	0.21	0.21	0.13
exp8 试验	0.19	0.16	0.062
exp9 试验	0.35	0.32	0.31

明敏感性要素水汽和温度的共同作用对提高降水预报准确率的贡献最大。

6 结论和讨论

目前国内还没有开展利用基于集合预报的相关方法对我国北方暴雨敏感区方面的研究。本文通过该方法, 分析确定 2009 年 7 月 23 日北京地区暴雨的敏感性要素及其对应的敏感区并利用 OSSE 试验进行了进一步的验证, 得到以下一些结论:

(1) 通过对本次个例的分析可知, 这次暴雨为一次爬线过程所致, 持续的水汽输送主要来自于北京的西南侧, 暴雨发生前对流不稳定能量大量积累, 地面冷锋的抬升作用触发对流不稳定能量释放, 降水发生。

(2) 利用基于集合预报的相关方法, 初步确定本次暴雨的 6 h 敏感性要素为水汽和温度, 相应的敏感区分别位于北京的西南侧和北京的东北侧。由实况分析敏感性要素对应的敏感区与初始时刻水汽通道位置基本一致, 敏感性要素温度对应的敏感区与初始时刻冷平流的位置基本一致, 因此所求的敏感性要素和其对应的敏感区都有明确的物理意义。

(3) 通过观测系统模拟试验 (OSSE) 的资料同化验证所确定的敏感区, 在水汽对应的敏感区内同化水汽对降水的预报结果有明显的改进; 在温度对应的敏感区内同化温度, 降水的预报技巧明显提

高。这进一步确定了所求的降水的 6 h 敏感性要素确实为水汽和温度，但是敏感性要素温度对此次暴雨过程更为敏感。在水汽对应的敏感区内同化水汽的同时也在温度对应的敏感区内同化温度，降水的各个量级的预报技巧都有大幅度的提高，这说明了敏感性要素水汽和温度的共同作用对降水预报准确率的提高有最大的贡献。

(4) 本文实际上利用基于集合预报的相关方法分析了 U 、 V 、 T 、 Q 的扰动偏差与降水总量偏差的相关，同时通过 OSSE 试验对其进行了进一步的验证。虽然以上各要素都有各自对应的相关性较大的区域存在，但是数值模式试验（即 OSSE）表明 U 、 V 对应试验的降水预报结果几乎没有改进，这说明 U 、 V 并不是降水的敏感性要素。因此基于集合预报的相关方法，只能初步分析出对某一区域关心预报变量影响较大的要素及其分布，只有进一步通过 OSSE 试验的验证才能最终确定敏感性要素及其对应的区域。因此在以后的研究中，建议将基于集合预报的相关方法和 OSSE 试验相结合，这样能够正确快速的分析出某一预报变量的敏感性要素及对应的敏感区。

需要指出的是，本文只是对一个暴雨的敏感性要素和敏感区进行研究。敏感区的确定依赖于预报时间的长短、预报检验区域和预报对象。在后续工作中将选择类似天气形势背景的个例做进一步研究，以总结一类北京高影响天气敏感区的分布规律。

参考文献 (References)

- Arnold C P Jr, Dey C H. 1986. Observing-systems simulation experiments: Past, present, and future [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67 (6): 687–695.
- Ancell B, Hakim G J. 2007. Comparing adjoint-and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting [J]. *Mon. Wea. Rev.* 135 (12): 4117–4134.
- Baker N L, Daley R. 2000. Observation and background adjoint sensitivity in the adaptive observation targeting problem [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126 (565): 1431–1454.
- Bergot T, Hello G, Joly A, et al. 1999. Adaptive observations: A feasibility study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127 (5): 743–765.
- Bishop C H, Toth Z. 1999. Ensemble transformation and adaptive observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (11): 1748–1765.
- Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (3): 420–436.
- Buizza R, Montani A. 1999. Targeting observations using singular vectors [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (17): 2965–2985.
- 陈静, 陈德辉, 颜宏. 2002. 集合数值预报发展与研究进展 [J]. *应用气象学报*, 13 (4): 497–507. Chen Jing, Chen Dehui, Yan Hong. 2002. A brief review on the development of ensemble prediction system [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (4): 497–507.
- Epstein E S. 1969. Stochastic dynamic prediction [J]. *Tellus*, 21 (6): 739–759.
- Gelaro R, Langland R, Rohaly G D, et al. 1999. An assessment of the singular vector approach to targeted observing using the FASTEX data set [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125 (561): 3299–3328.
- Hawblitzel D P, Zhang F Q, Meng Z Y, et al. 2007. Probabilistic evaluation of the dynamics and predictability of the mesoscale convective vortex of 10–13 June 2003 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (4): 1544–1563.
- 胡英, 贾朋群, 高良成. 2002. 近 5 年大气科学外场试验及其重要成果 [J]. *气象*, 27 (1): 3–8. Hu Ying, Jia Pengqun, Gao Liangcheng. 2002. Outlines of the recent field programmes and their results for weather research [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 27 (1): 3–8.
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (1): 170–181.
- Langland R H, Gelaro R, Rohaly G D, et al. 1999. Targeted observations in FASTEX: Adjoint based targeting procedures and data impact experiments in IOP/7 and IOP/8 [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125 (561): 3241–3270.
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138 (5): 1587–1612.
- Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model [J]. *Tellus*, 17 (3): 321–333.
- Lorenz E N, Emanuel K A. 1998. Optimal sites for supplementary weather observations: Simulation with a small model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (3): 399–414.
- Majumdar S J, Etherton B J, Bishop C H. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part II: Field Program Implementation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (5): 1356–1369.
- Mu M, Zhang Z Y. 2006. Conditional nonlinear optimal perturbations of a two-dimensional quasigeostrophic model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63 (6): 1587–1604.
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 10 (6): 493–501.
- Noh Y, Cheon W G, Hong S Y, et al. 2003. Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 107 (2): 401–427.
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics and adaptive Observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (4): 633–653.
- Pu Z X, Kalnay E. 1999. Targeting observations with the quasi-inverse linear and adjoint NCEP global models: Performance during FASTEX [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125 (561): 3329–3337.
- Rabier F, Klinker E, Courtier P, et al. 1996. Sensitivity of forecast errors to initial conditions [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122 (529): 121–150.

- Szunyogh I, Toth Z, Morss R, et al. 2000. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 winter storm reconnaissance program [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (10): 3520–3537.
- Szunyogh I, Toth Z, Zimin A V, et al. 2002. Propagation of the effect of targeted observations: The 2000 winter storm reconnaissance program [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (5): 1144–1165.
- Sippel J A, Zhang F Q. 2008. A probabilistic analysis of the dynamics and predictability of tropical cyclogenesis [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65 (11): 3440–3459.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 气象出版社. Tao Shiyan. 1980. *The Torrential Rain of China (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press.
- Torn R D, Hakim G J. 2008. Ensemble-based sensitivity analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (2): 663–677.
- 王晨稀, 姚建群, 梁旭东. 2007. 上海区域降水集合预报系统的建立与运行结果的检验 [J]. *应用气象学报*, 18 (2): 174–180. Wang Chenxi, Yao Jianqun, Liang Xudong. 2007. The establishment and verification of the operational ensemble forecast system for Shanghai regional precipitation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 18 (2): 174–180.
- 王斌, 谭晓伟. 2009. 一种求解条件非线性最优扰动的快速算法及其在台风目标观测中的初步检验 [J]. *气象学报*, 67 (2): 175–188. Wang Bin, Tan Xiaowei. 2009. A fast algorithm for solving CNOP and associated target observation tests [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (2): 175–188.
- Zhao X P, Kalnay E, Sela J, et al. 1997. Sensitivity of forecast errors to initial conditions with a quasi-inverse linear method [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (10): 247–2503.
- 张朝林, 王迎春. 2002. 北京地区风廓线仪布网方案的数值研究 [J]. *气象学报*, 60 (6): 786–791. Zhang Chaolin, Wang Yingchun. 2002. Numerical study on weather influences of location design of wind-profiler network for Beijing area [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (6): 786–791.