

基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验^{*1}

雷 蕾 孙继松 王国荣 郭 锐

LEI Lei SUN Jisong WANG Guorong GUO Rui

北京市气象台,北京,100089

Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089, China

2011-05-25 收稿,2011-10-21 改回.

Lei Lei, Sun Jisong, Wang Guorong, Guo Rui. 2012. An experimental study of the summer convective weather categorical probability forecast based on the rapid updated cycle system for the Beijing area (BJ-RUC). *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 752-765.

Abstract About the convective weather in the summer of Beijing area, some researches have done before by using the conventional sounding data of 54511 station, the special sounding data constructed by microwave radiometer data as well as the wind profile data and the model-output sounding data of the rapid updated cycle assimilation and forecast system for Beijing area (BJ-RUC). Now in this article, we discuss the experimental study of the convective weather probability forecast and the categorical (such as short-time convective rainstorm and the hailstorm) probability forecast in Beijing area based on the BJ-RUC meso-scaled model. On the model basic elements many different thermal and physical parameters are calculated and then some convective weather characteristic indicators are employed. In this study at least four experiments were compared and the best of them are used to analyze three typical convective weather events in the summer of 2009 and 2010 in the Beijing area. The experimental results show that the probability forecast of the summer convective weather can be achieved, and there are also some successes of the categorical probability forecast based on the BJ-RUC in the Beijing area.

Key words Conventional sounding, BJ-RUC, Model sounding, Severe convection, Categorical probability forecast

摘 要 在利用实况探空资料、微波辐射计和风廓线构建的特种探空资料对北京地区强对流天气进行判别,以及快速更新循环同化预报系统(BJ-RUC 模式)探空资料可应用性分析的基础上,针对模式探空基本要素计算多种热力、动力、综合不稳定物理量,根据统计的强对流天气判别指标,计算模式格点上的强对流发生概率,并进一步针对冰雹(雷暴大风)和强对流短时暴雨天气下不同物理量的阈值范围,初步探索中尺度数值模式对强对流天气分类预报的可能性。通过不同组合的预报方案进行的对比分析表明,利用北京地区中尺度数值模式快速循环系统(BJ-RUC)的格点探空资料进行强对流天气概率的预报是可以实现的,强对流天气的分类概率预报也存在一定的成功率。

关键词 实况探空, BJ-RUC, 模式探空, 强对流, 分类概率预报

中图法分类号 P456.1 P456.7

1 引 言

强对流天气的预报及其发生机制在中外科学家的研究中一直占有重要地位。一般认为,强对流天

气是中尺度对流活动发生、发展的直接结果。在中尺度对流活动中,热力不稳定、动力不稳定、水汽以及启动机制决定了对流发展的深厚程度以及伴随的不同天气现象。长期以来在研究和业务中通过探空

* 资助课题:公益性行业(气象)专项项目(GYHY200706042)、国家支撑项目(2008BAC37B01)、中国气象局项目(全国强对流预报专家团队建设)。

作者简介:雷蕾,主要从事短时临近天气预报及相关研究。E-mail: fyrd1234@126.com

资料计算得到的大量物理意义明确的对流参数,成为研究强对流天气的重要基础,使我们能够更直接地分析强对流天气发生前的能量、热动力条件、层结的稳定度情况(彭治班等,2001;李耀东等,2004)。Stensrud等(1997)、Hart等(1998)和Lee等(2000)的研究表明,利用数值模式输出参数的方法进行强对流天气的预报,可以有效地提高预报水平和预报时效,这使得对流参数的应用有了更大的发展空间。从这个意义上来说,相比大尺度模式,利用同化大量本地探测资料能有效模拟中尺度环境场的区域中尺度数值模式计算得到的对流参数将起更为重要的作用,不但能更准确地预报强对流时空分布,而且,还有可能预报强对流天气的类别。在前期研究(雷蕾等,2011;魏东等,2010,2011a,2011b)的基础上,本文利用BJ-RUC中尺度数值模式的格点探空资料,计算一系列相关物理参量,组合不同的预报方案进

行强对流概率预报,并进一步尝试了强对流天气的分类预报试验。

2 BJ-RUC 模式简介

BJ-RUC系统是基于WRF模式和WRF三维变分同化系统建立起来的北京地区高分辨率快速循环同化预报业务系统。模式为3层嵌套,分别为27、9和3 km,预报区域如图1a所示。垂直方向38层,模式层顶为50 hPa。通过WRF三维变分同化系统每3 h同化一次最新的常规或加密探空、地面观测、船舶/浮标观测资料以及北京地区稠密的局地观测资料,系统每天运行8次(05、08、11、14时等,北京时,下同)。其中,20时为冷启动,其他时次为热启动,每次预报时效为24 h,系统的运行流程图1b所示。

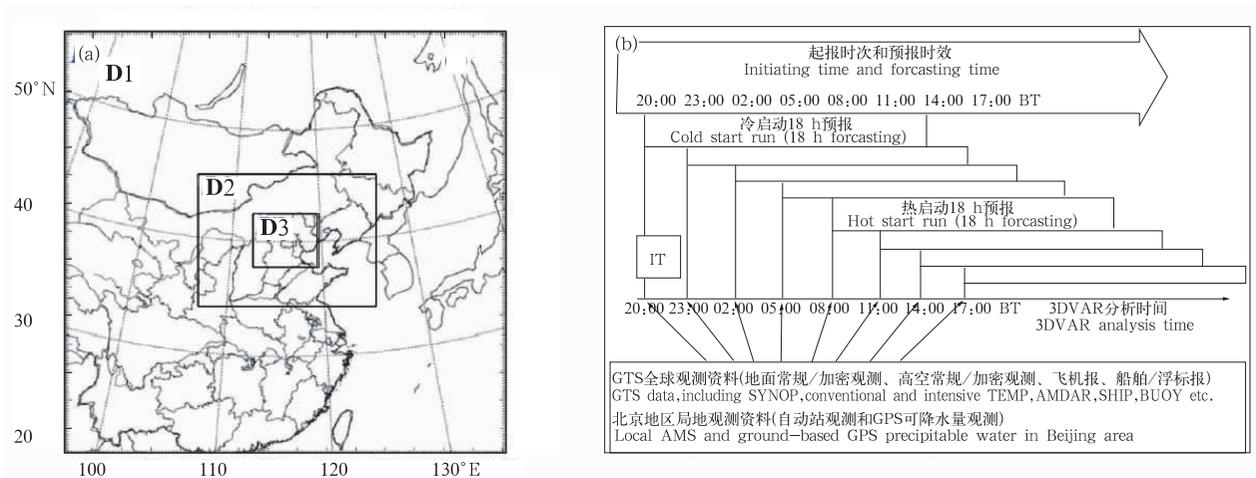


图1 BJ-RUC模式(a)预报区域及(b)预报流程

Fig. 1 Model domains (a) and flow diagram (b) of the Rapid Updated Cycling Analysis and Forecast System (BJ-RUC)

3 研究背景

3.1 基于实况常规探空资料判别强对流天气类别

雷蕾等(2011)曾利用2007、2008年5—9月的北京南郊观象台(54511站)每天2次(或4次)的实况探空资料对夏季冰雹、雷暴大风、暴雨等强对流天气的类别进行过仔细的判别研究,发现由探空资料计算的众多物理量及其时间变量在冰雹(雷暴大风)

和暴雨出现时存在显著差异。如: 0°C 层高度、 -20°C 层高度、500与850 hPa温差、逆温层高度、低空风切变等参量能够准确区分冰雹和暴雨天气;此外,850 hPa的温度露点差、500与850 hPa的 θ_{se} 差、大气可降水量也是判断强对流类别的重要条件;对于时间变量来说,对流有效位能、下沉对流有效位能、不稳定性指数、500与850 hPa的 θ_{se} 差、大气可降水量、低层的垂直风切变等物理量的6 h变量也

能较好地甄别出冰雹(雷暴大风)和暴雨天气。上述研究结果表明,合理利用探空资料确定判别指标进行北京夏季强对流天气类别的判断是可能的。

3.2 “特种”探空资料的引入及应用

常规探空仅每天2次(夏季加密为每天4次),时空分辨率很低,对于强对流天气临近发生时提供较准确的信息存在明显不足,因此,引入了高时间分辨率(间隔6 min)的“特种”探空资料,“特种”探空资料是将微波辐射计的温、湿度数据与风廓线仪的水平风数据相结合得到的,并对其定量应用的可靠性、计算的物理量与实况常规探空计算的物理量都分别进行了详细的对比检验(魏东等,2011a)。结果表明,特种探空的各要素与常规探空具有较一致的变化趋势,定性分析使用时可有效弥补常规探空时间分辨率低的不足。但是,定量使用时需要对不同要素区别对待,如特种探空的温度和经向风、纬向风的一致性较好、误差较小,可以定量使用。由于微波辐射计探测的相对湿度误差较大,造成特种探空的露点温度与常规探空的一致性较差、明显偏大,定量使用时需要订正。

3.3 BJ-RUC 模式探空的检验以及3种探空资料在强对流天气预报中的对比

统计分析表明,在大多数情况下,BJ-RUC 模式探空各要素和计算的物理参量于12 h时效内的预报误差较小(魏东等,2010),模式探空计算的各项物理参数在强天气发生前后都有不同程度的体现(魏东等,2011b),但与特种探空资料及实况对比发现,模式预报的物理量的演变与实况有时存在一定的时间差,可能与模式的预报偏差或者不能准确描述某些中小尺度天气系统的发生、发展过程有关。在强天气发生前后,模式探空表征的大气动力特征(如中低层垂直风切变)和大部分表征大气热力性质的物理参量有一致性变化趋势,而模式对潜热释放过程的描述能力明显不足,几乎不能描述强对流云团发展过程中对流层中上层强烈的增温过程。此外,从模式计算的物理量量值的时间序列与特种探空相比来看,其峰值和谷值偏大或偏小的程度也有相当大的不稳定性。

总之,无论是实况探空、特种观测探空都存在很强的局限性:(1)探空是静态的,并不总是能很好地描述强对流酝酿过程中各种物理参量的“动态”特

征;特种探空虽然可以实现动态观测,但定量使用上还存在较大误差;(2)探空是单点的,无法实现细网格化预报属性,只表现在判断某一区域强对流有、无(即0/1)预报上有重要意义。由于BJ-RUC 模式本身不仅同化了探空资料,而且每3 h还同化了本地的GPS水汽资料、部分飞机报资料、稠密的地面观测资料等,在理论上应该比单点探空更全面、水平分布上更合理。统计结果也表明,BJ-RUC 模式探空与实际探空的一致性很好(魏东等,2010)。

4 北京地区强对流天气潜势预报流程及预报方案设计

基于中尺度数值模式进行强对流预报的前提条件是:(1)模式能够快速更新同化反映本地大气特征变化的最近时刻的多源观测资料;(2)模式能够基本描述对流中尺度系统在酝酿、发生阶段环境大气的热、动力学变化特征。前期的研究(魏东等,2010,2011a,2011b)认为,北京市气象局的中尺度快速更新循环预报系统(BJ-RUC)在上述两个方面都体现出了较强的能力。鉴于此,开展了基于BJ-RUC 模式的北京地区细网格化、快速更新的强对流天气及分类概率预报试验,设计了强对流天气及分类概率预报流程(图2)。首先,利用BJ-RUC 模式的第3层嵌套(3 km)结果,在模式后处理模块中读取探空基本要素(温、压、湿、风),计算多种热力、动力、综合不稳定物理量。其次,通过实况及模式统计的结果初步确定强对流判别指标。第三,设计预报方案,计算模式格点上的强对流发生概率。最后,进一步确定冰雹/雷暴大风(在模式中还没有足够的条件能将冰雹和雷暴大风区分开,因此,将冰雹和雷暴大风初步都归于冰雹天气进行概率预报)和强对流短时暴雨天气下不同物理量的阈值,从而得出强对流分类天气的概率。

4.1 预报方案设计

预报方案分为两步(图2):首先,对北京及其周边地区进行强对流天气概率预报,在大量统计分析的基础上,设计了物理量参数的阈值范围及其动态权重条件、3 h变量条件等进行概率计算。其次,对满足强对流发生条件(综合概率不小于50%)的格点,再分别设计满足短时暴雨和冰雹发生的条件进

行天气分类概率计算。因此,计算暴雨、冰雹的概率时需要用到强对流概率计算的参数,此部分参数为

公共参数,此外,暴雨和冰雹又各有其特有的判别指标,称为特征物理量参数。

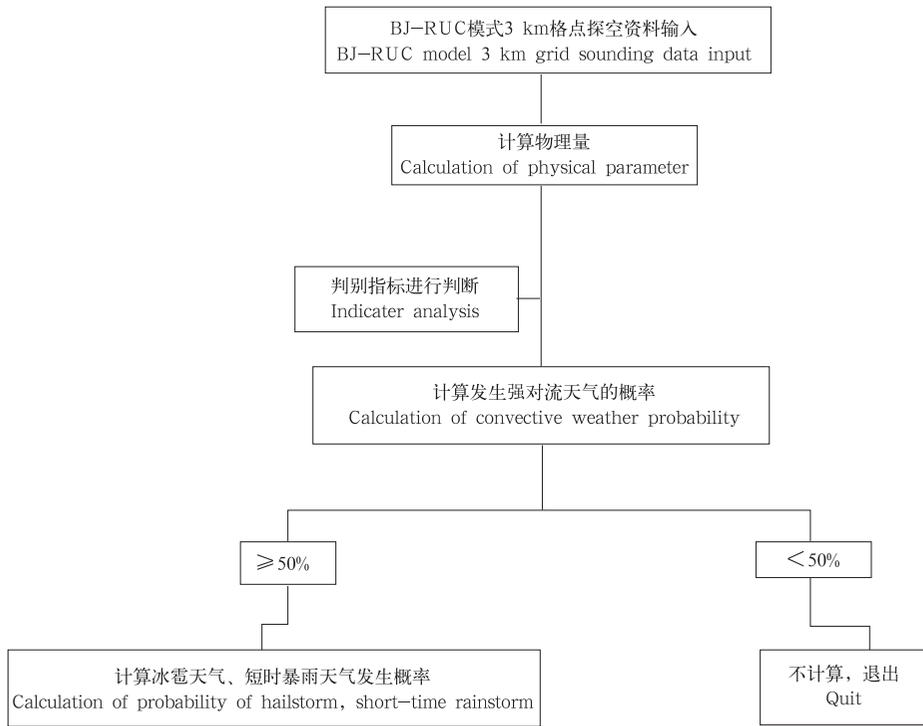


图2 基于 BJ-RUC 模式的强对流天气及分类概率预报流程

Fig. 2 Flow diagram of the convective weather and categorical probability forecast based on BJ-RUC

概率计算方法:对单个格点而言,出现某类天气的概率为在该格点上满足预设条件的参数在所有参数中的比重。概率计算方法有二分法计算和连续概率计算两种。所谓二分法即对物理量参数预先设定一个判别条件,凡是符合该条件的记为1,不符合的记为0。对所有参与计算的参数都进行上述判断计算,如果某个格点出现 n 次满足条件,则格点的概率为 $\frac{n}{N}$, n 为格点上满足条件的参数个数, N 为总参数的个数。研究结果(雷蕾等,2011)表明,强对流天气以及不同强对流现象在酝酿阶段,对不同的热、动力学参数表现出不同的敏感性,在设计阶段需要分配给每个参数不同的权重,上述概率可以进一步表示

$$\text{为 } \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i}, \omega_i \text{ 为第 } i \text{ 个参数的权重。}$$

但是,经过试验发现二分法计算存在计算结果高度依赖判别条件的问题,以不稳定度指数为例,假设预设判别条件为 $K > 30$,此时如果两个相邻的格点 i, j ,其 K 分别为 $K_i = 31, K_j = 29$,则判断 K_i 将出现强对流, K_j 不出现强对流。显然这种结果过于极端,即存在“双重极端”问题。先前的统计结果也表明,出现强对流时对应的参数往往在一个区间范围内,如 K 在 $[25, 50]$ 范围内都能出强对流,但大部分强对流个例都要求 K 超过35,因此,单纯以 $K > 25$ 或 $K > 35$ 作为判别条件都存在上述“双重极端”问题。

经过试验发现,连续概率计算方法能有效地缓解上述问题。对于某一个物理量首先确定强对流天气发生时其对应的值的区间,该区间的范围是通过大量的实际探空样本确定的。然后判断模式格点上的参数在该区间中的位置,模式探空得到的值有可能超出该区间的上限或下限,因此,当模式探空参量

的值越接近区间极大值,其概率越大,相反越接近极小值的概率越小,不小于极大值该物理量参数的权重为1,那么由此得出某一个物理量参数的权重在 $[0,1]$ 。同时,通过大量的组合实验发现,在某个区间 $[y_1 - c_0]$ 、 $(c_0 - y_2]$ 内线性变化,而在整个区间 $[y_1 - y_2]$ 内非线性变化的“动态”权重计算方法预报效果更好。如图3,设置节点 c_0 ,并在计算程序中给其在 $(0,1)$ 中相对合适的权重系数。这是由于发生强对流前,对应的各种物理参量大多数情况下是在某一个区间变化的(雷蕾等,2011),大量的实际个例统计得到的平均值实际上是与节点 c_0 对应的,因此,该区间附近的权重系数应该比所有区间 $[y_1, y_2]$ 线性插值更大。

因此,基于连续概率计算思想,在模式的后处理模块中加入物理量因子诊断模块,对于模式格点逐个进行阈值区间判断,统计每个格点上满足阈值条件的物理参量个数,形成样本库1;设定3 h变量条件,在样本库1中筛选出符合变量条件的样本,形成样本库2;最后对于选出的样本库2中的物理量参数给予动态权重。最后,符合条件的物理量因子个数与自身权重之积与所有入选的物理量因子与自身权重积的比值即为该格点上的强对流天气发生的概率。

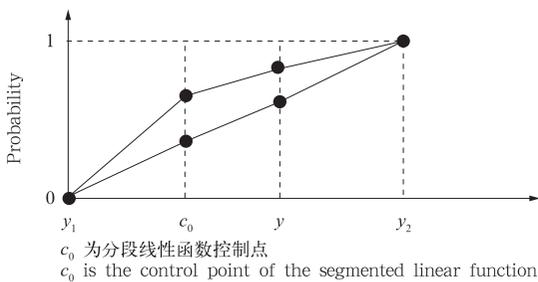


图3 动态权重的计算

Fig. 3 Diagram of the dynamic weight factor calculation

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i f_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \times 100 \quad (1)$$

$$f_i = \begin{cases} \omega_0 + \left(\frac{y - c_0}{y_2 - c_0}\right)(1 - \omega_0) & (c_0 < y \leq y_2) \\ \left(\frac{y - y_1}{c_0 - y_1}\right)\omega_0 & (y_1 \leq y \leq c_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, N 为所有入选的因子数, n 为符合条件的因子数, α_i 为第 i 个因子(物理量)的权重, f_i 为第 i 个因子(物理量)的概率, c_0 为分段线性控制点, ω_0 为 c_0 对应的权重。对于每一个因子(物理量),假设值为 y ,给定阈值区间 $[y_1, y_2]$ 、 c_0 、 ω_0 ,即可计算 f_i 。

4.2 强对流天气判别因子

已有研究表明,强对流能否发生发展主要与温度垂直梯度、水汽(垂直分布结构、水平输送)、垂直风切变和抬升机制有关,或者说与热力稳定度、动力稳定度和触发机制有关。在实际天气预报过程中,描述热力稳定度的物理参量有很多,如对流有效位能,下沉对流有效位能,对流抑制位能,K指数,沙氏指数(SI)、强天气威胁指数(SWEAT),500与850 hPa θ_{se} 的差等温湿度组合参量,也有高低空温差 ΔT ,温度露点差及其垂直递减率等分别描述温度、湿度分布的参量。上述参量之间存在很强的相关性,但是,它们的物理意义并不完全相同,没有一种参数能够“包打天下”,而且,在不同的对流现象发生前,对它们的敏感程度、阈值区间及其随时间变化特征也不尽相同,这也是有可能进行强对流分类预报试验的物理基础(雷蕾等,2011)。在大量统计分析基础上,进行模式参数的多种组合试验,最终选定了以下物理量参数进入模式强对流天气预报方案。其中,描述热力稳定度的参量有对流有效位能,K指数,SWEAT指数,500与850 hPa θ_{se} 差,SI指数,高低空温差 ΔT ,水汽条件参数有850 hPa温度露点差以及850与500 hPa温度露点差的垂直梯度;动力稳定度参数有低空风切变(包括风速切变、风向切变)、中高空风切变;强对流天气启动因子(造成气块抬升)包括高低空的辐散辐合,700 hPa的垂直速度等(表1)。由于不同强对流现象在其他大气环境上还存在明显差异,如 0°C 、 -20°C 层高度及其随时间的变化,南风层的厚度,水平风向转折等,因此在强对流天气的分类概率预报中还相应地设定了特征物理量参数(表2、3)。

表1中给出了第一步用来判别强对流概率的物理量参数区间、中值(即上述的分段线性控制点 c_0 ,而非区间的平均值,下同)以及中值的动态权重、物理量本身的权重系数;表2和3是在表1判别结果的基础上给出分类概率预报的物理量条件、相应的中值以及中值的动态权重、物理量本身的权重。需要指出的是,在分类概率预报中所用到的和第一步强对流概率计算同样设置的公共参数表2和3不再

列出,但如果涉及的参数相同,而阈值或中值(包括中值的动态权重)、物理量本身权重有一项设定不同则列于表 2、3 中,重新进入模式进行判断计算。此外,在分类概率预报中,经过试验发现参数的区间和

中值如果不变,仅改变中值的动态权重和物理量参数的权重即可达到不同的预报结果,而且判别计算也变得比较简单,因此,表 2 和 3 中同样的参数在这两个条件上有所变化。

表 1 基于连续概率方法的强对流概率预报中选取的物理量参数及时间变量

Table 1 The physical parameters and the temporal variation conditions in the convective weather probability forecast

物理量	区间	中值(中值权重)	物理量权重
对流有效位能(CAPE)	[300,2000]	800(0.8)	1
K 指数(KI)	[25,40]	35(0.7)	4
强天气威胁指数(SWEAT)	[100,320]	250(0.75)	2
沙氏指数(SI)	[-2.5,2.5]	0(0.75)	2
1000—700 hPa 风切变	[2,8]	6(0.4)	1
700—500 hPa 风切变	[2,6]	3(0.5)	1
低空风向切变	1/0	1/0	1
高空风向切变	1/0	1/0	1
500 与 850 hPa 温差	[-25, -35]	-28(0.75)	2
500 与 850 hPa θ_{se} 差($\Delta\theta_{se}$)	[-20,0]	-5(0.75)	2
850 hPa 温度露点差($T - T_d$) ₈₅₀	[2,10]	6(0.75)	4
850 与 500 hPa 的温度露点差的差	[0,10]	5(0.75)	3
850 hPa 散度	[-1.5,1]	0(0.75)	1
300 hPa 散度	[-1,2]	0(0.75)	1
700 hPa 垂直速度	[0,2]	1(0.7)	1
3 h 变量	区间	中值(中值权重)	物理量权重
K 指数(KI)	[0,15]	5(0.8)	4
700—500 hPa 风切变	[0,5]	2(0.7)	3
850 hPa 温度露点差($T - T_d$) ₈₅₀	[-2, -6]	-3(0.75)	2
沙氏指数(SI)	[-2, -8]	-4(0.75)	2
强天气威胁指数(SWEAT)	[100,300]	150(0.85)	2

表 2 短时暴雨概率预报中选取的物理量参数/时间变量及特征量(与表 1 中相同的公共参数不再列出)

Table 2 The physical parameters and the temporal variation conditions in the short-time rainstorm probability forecast (the common parameters to Table 1 are not listed)

物理量	区间	中值(中值权重)	物理量权重
对流有效位能(CAPE)	[300,2000]	1000(0.8)	1
K 指数(KI)	[25,40]	35(0.65)	4
沙氏指数(SI)	[-2.5,2.5]	0(0.6)	2
500 与 850 hPa 温差	[-25, -35]	-28(0.7)	2
500 与 850 hPa θ_{se} 差($\Delta\theta_{se}$)	[-20,0]	-5(0.7)	2
850 hPa 温度露点差($T - T_d$) ₈₅₀	[2,10]	3(0.85)	4
3 h 变量	区间	中值(中值权重)	物理量权重
850 hPa 温度露点差($T - T_d$) ₈₅₀	[-2, -6]	-3(0.7)	2
沙氏指数(SI)	[-2, -8]	-4(0.7)	2
强天气威胁指数(SWEAT)	[100,300]	150(0.8)	2
特征量	取值	中值(中值权重)	物理量权重
700 hPa 南风	1/0	/	0.8
850 hPa 南风	1/0	/	0.8
500 hPa 增湿($T - T_d$) ₅₀₀	1/0	/	0.8
850 hPa 增湿($T - T_d$) ₈₅₀	1/0	/	0.8
格点 3 h 预报雨量 > 6 mm	1/0	/	0.8 × 4
850 hPa 东风或南风增强	1/0	/	0.8
0℃层高度(Z_0)	>3800	/	0.8
-20℃层高度(Z_{-20})	>7000	/	0.8

表3 冰雹概率预报中选取的物理量参数/时间变量及特征量
(与表1中相同的公共参数不再列出)

Table 3 The physical parameters and the temporal variation conditions in the hailstorm probability forecast
(the common parameters to Table 1 are not listed)

物理量条件	区间	中值(中值权重)	物理量权重
对流有效位能(CAPE)	[300,2000]	1000(0.65)	1
K 指数(KI)	[25,40]	35(0.55)	3
沙氏指数(SI)	[-2.5,2.5]	0(0.6)	2
500 与 850 hPa 温差	[-25,-35]	-28(0.6)	2
500 与 850 hPa θ_{sc} 差	[-20,0]	-5(0.65)	2
850 hPa 的温度露点差($T - T_d$) ₈₅₀	[2,10]	6(0.6)	4
850 与 500 hPa 温度露点差的差	[0,10]	6(0.6)	3
强天气威胁指数(SWEAT)	[100,320]	250(0.55)	2
850 hPa 散度	[-1.5,1]	0(0.65)	1
300 hPa 散度	[-1,2]	0(0.65)	1
700 hPa 垂直速度	[0,2]	1(0.65)	1
3 h 变量条件	区 间	中值(中值权重)	物理量权重
K 指数(KI)	[0,15]	5(0.5)	3
1000—700 hPa 风速切变	[0,5]	2(0.6)	3
850 hPa 温度露点差($T - T_d$) ₈₅₀	[-2,-6]	-3(0.6)	2
沙氏指数(SI)	[-2,-8]	-4(0.6)	2
强天气威胁指数(SWEAT)	[100,300]	180(0.5)	2
特征量	取 值	中值(中值权重)	物理量权重
0℃层高度是否在[3500,4500]内	1/0	/	0.7
-20℃层高度是否在[6500,8200]内	1/0	/	0.7
700 hPa 以下是否有逆温	1/0	/	0.7
500 hPa 为北风	1/0	/	0.7
0℃层高度降低	1/0	/	0.7
地面升压	1/0	/	0.7

5 强对流天气过程预报试验

以下是以最终试验方案进行的3次天气过程模拟预报结果分析。

5.1 短时强对流降水过程

2010年6月13日,受冷空气和低层辐合系统的共同影响,傍晚至夜间北京出现雷阵雨天气,主要降水时段在18—21时,有17站出现大于20 mm/h的降水,主要出现在昌平、大兴、房山、海淀、门头沟、平谷、石景山和怀柔地区。

19—21时实况雷达回波显示有一条长宽比约3:1的强对流带状回波自西北向东南方向移动影响北京地区,窄带中心强度超过60 dBz(图4)。可以看到此带状回波给北京西部山区以及山前的平原地区都带来了一次明显的降水过程,局地为20—30 mm/h。

BJ-RUC模式11时起报的19—21时-20℃层

上的雷达反射率因子预报如图5a₁、a₂、a₃,而相应的强对流天气概率预报结果如图5b₁、b₂、b₃。由于概率预报的物理量计算是基于BJ-RUC模式的,两者从形态上看来相似度较大,但从两者分别和实况对比可以看出,BJ-RUC模式本身预报的带状回波(dBz)虽然分布形态与实况雷达回波较为一致,但其中心落区和实况有一定的差异,19—20时,中心位置有一些偏东,21时向西部山区调整却又漏报了东南部地区。而仔细对比不难看出,强对流概率预报方案预报的较大概率发生位置(图5b₁、b₂、b₃)较BJ-RUC的预报结果有一些调整,60%以上概率的中心与实况雷达回波强对流回波中心以及雨量中心都有很好的对应。在此基础上,又给出了短时强降水预报概率(图6)。从结果上看,比强对流概率预报的结果(图5b₁、b₂、b₃)范围更进一步集中,中心更加突出,强降水预报结果还是比较理想的。

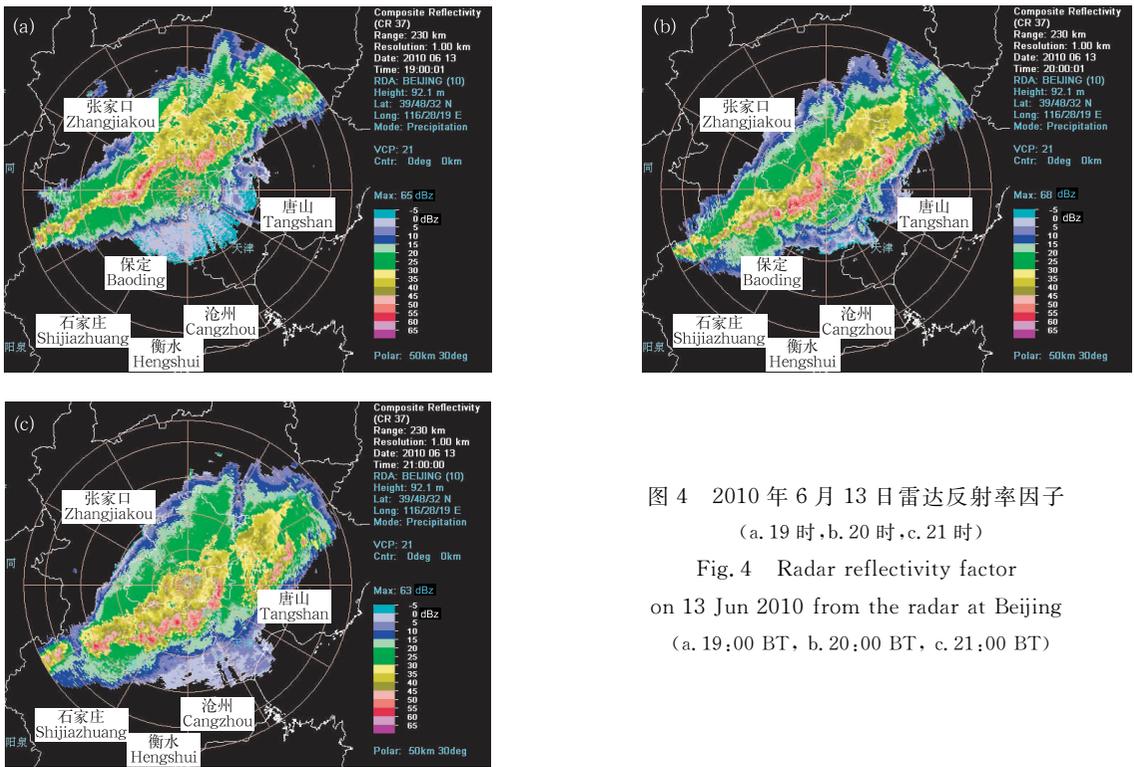


图4 2010年6月13日雷达反射率因子
(a. 19时, b. 20时, c. 21时)
Fig. 4 Radar reflectivity factor
on 13 Jun 2010 from the radar at Beijing
(a. 19:00 BT, b. 20:00 BT, c. 21:00 BT)

5.2 局地强对流短时暴雨过程

2010年7月11日,受东北低涡系统影响,04—08时、11日19时—12日00时有27个站出现大于20 mm/h降水,3个站出现大于50 mm/3 h的局地短时暴雨,暴雨区位于北京的怀柔、密云、平谷等北部区县。

从实况雷达回波(图7a₁、a₂、a₃)可以看出,在东北冷涡系统的影响下回波呈块状单体结构,强度也较强,中心超过55 dBz,回波由正北方向进入北京地区,沿北京东部地区向南移动,依次影响怀柔、密云、平谷等区县。因此,在这些地区都有比较明显的降水产生(图7b₁、b₂、b₃)。而BJ-RUC在20—22时均没有预报出北京北部的短时强对流天气(图7c₁、c₂、c₃)。

从基于同一时刻的BJ-RUC模式的强对流天气概率预报以及短时强降水概率的结果来看(图8),预报时次较实况滞后了约3 h,这可能与数值预报模式对天气系统预报偏慢有关,但从强对流天气发生、发展的区域来看与实况还是比较吻合的,主要落区与实况基本一致,主要发生在北京的北部、东北部地区。分类预报结果显示,本次局地强对流天气过

程主要以短时暴雨的方式出现,总体而言,强度预报的略偏弱,发生短时暴雨的概率的最大值在65%左右。从BJ-RUC模式长期应用情况来看,预报结果偏弱可能与模式本身对于这种局地的强对流把握要稍差于区域性的对流性降水天气有关。

5.3 短时强降水、冰雹和雷暴大风混合型强对流过程

2009年7月22日,受高空弱冷空气、850 hPa切变线以及地面辐合区的共同影响,北京自北向南出现了一次强雷阵雨过程,延庆、怀柔、密云、平谷、顺义、朝阳、通州境内共有33个站出现大于20 mm/h的短时强降水。佛爷顶15时24—28分、怀柔16时04—14分、通州17时33—41分出现冰雹。

从图9实况雷达回波的演变可以看出,此次过程雷暴云团发展非常强盛,初始时期先是从单体雷暴开始影响北京的延庆和怀柔地区,强度超过60 dBz,随后单体雷暴逐渐发展壮大演变成对流复合体沿着北北西—南南东的路径影响北京的城区以及东部大部分地区。影响时间超过6 h,中心强度一直维持在55—65 dBz,是一次大范围的强雷暴活动,造成局地30 mm/h以上的强降水并伴随着冰雹和雷暴大风现象。

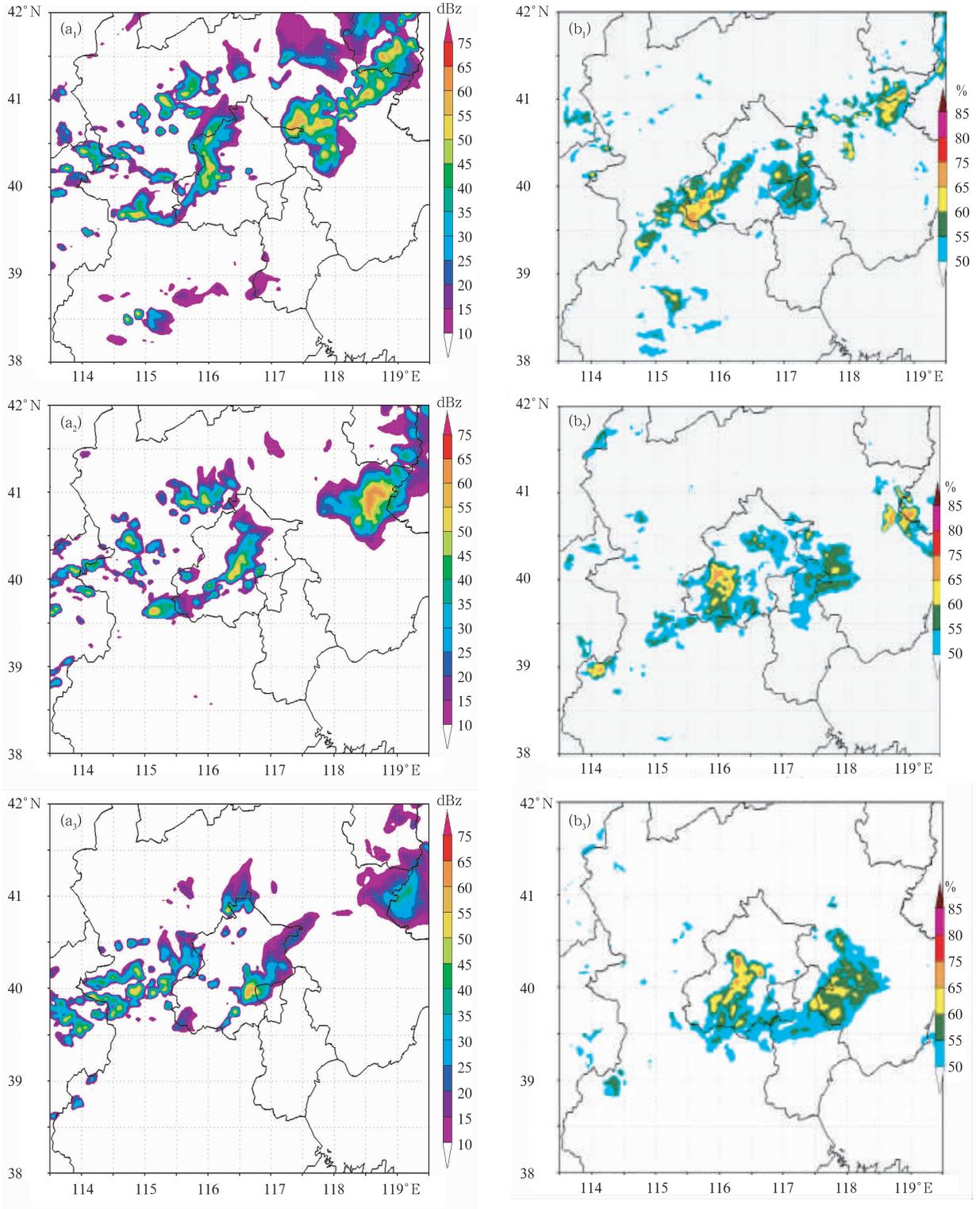


图5 2010年6月13日BJ-RUC模式11时起报的-20℃层上的反射率因子(a₁、a₂、a₃)及强对流天气概率(b₁、b₂、b₃)的19(a₁、b₁)、20(a₂、b₂)、21(a₃、b₃)时预报对比

Fig.5 Comparison between the radar reflective factor (at the level of -20°C) (a₁, a₂, a₃) and the convective weather probability forecast (b₁, b₂, b₃) initiating at 11:00 BT 13 Jun 2010 by the BJ-RUC (a₁, b₁. 19:00 BT, a₂, b₂. 20:00 BT, and a₃, b₃. 21:00 BT)

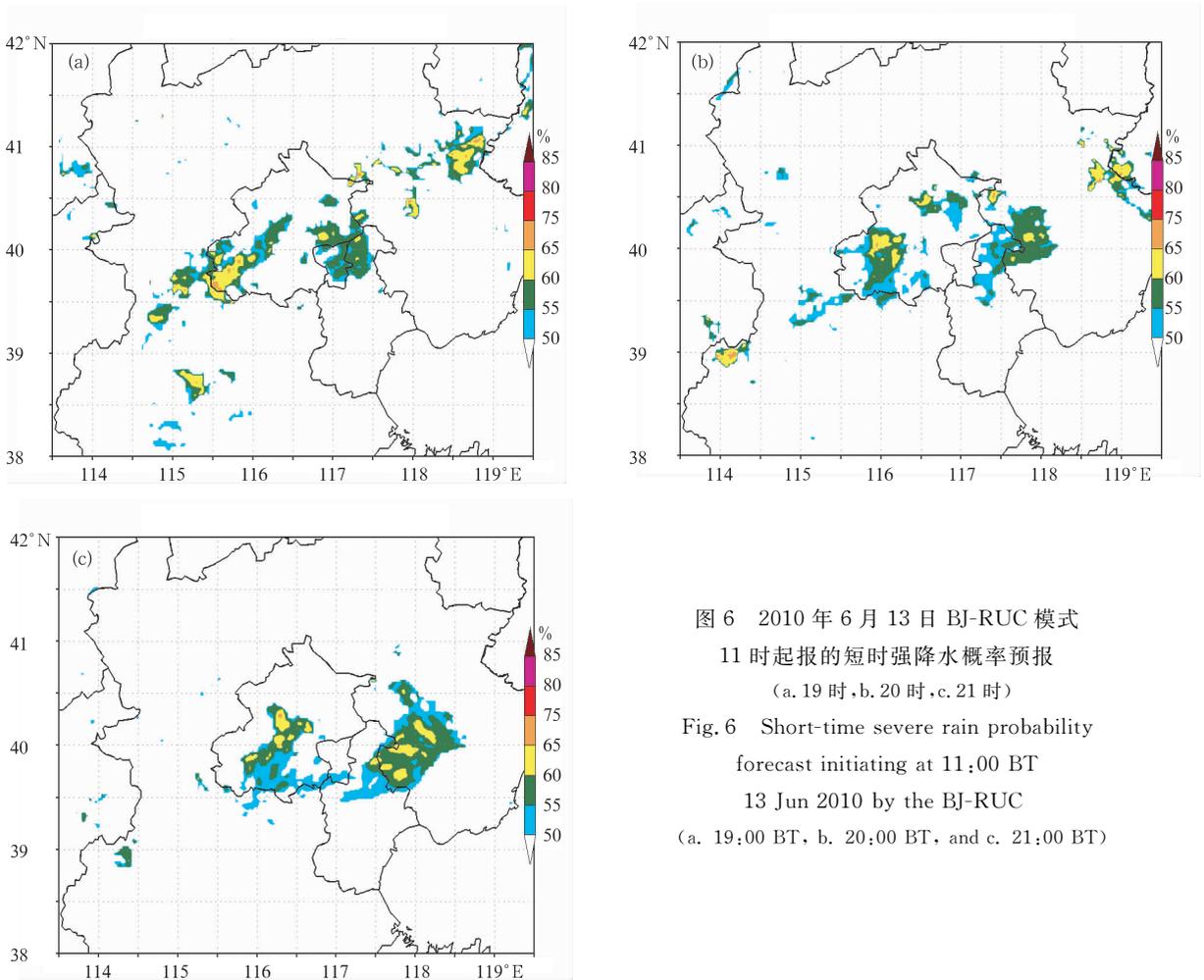


图6 2010年6月13日BJ-RUC模式
11时起报的短时强降水概率预报
(a. 19时, b. 20时, c. 21时)
Fig. 6 Short-time severe rain probability
forecast initiating at 11:00 BT
13 Jun 2010 by the BJ-RUC
(a. 19:00 BT, b. 20:00 BT, and c. 21:00 BT)

从基于BJ-RUC数值模式的3种概率预报结果与实况对比来看(图10),15时预报的强对流出现区域范围要明显大于实况,北京西南部大部分地区为虚警区。随着模式的调整,预报结果逐渐向实况接近,16—17时预报结果较好,预报强对流的发展演变趋势都与实况相似。但总体上看,模式预报的过程发展较快,结束时间早,18时之后强对流发生概率大的地区就已经移动到了北京的东南部至天津一带,而实际上,北京东南部地区依然存在强烈的对流活动。

从分类概率预报结果来看,短时强降水的概率(图10b₁、b₂、b₃)仍然与强对流概率结果(图10a₁、a₂、a₃)总体接近,也就是说,对于以短时强降水为主的强对流天气,两者差异很小,也就是说,强降水过

程是本次强对流过程的主要表现方式。从冰雹概率预报结果(图10c₁、c₂、c₃)来看,预报的强度和范围都明显小于短时强降水和强对流预报,15—16时65%—75%冰雹预报区域与实况冰雹的区域(延庆、怀柔和通州)差异不大,这表明,我们设计的预报方案,能够在一定程度上从较大范围的强对流过程中捕捉到可能发生冰雹/雷暴大风的发生区域。

6 结论与讨论

利用多种物理量参数计算的概率预报能提供一些区别于单个诊断量(如BJ-RUC预报的反射率因子或逐时降水)的信息。特别是在模式预报与实况存在明显误差时,概率预报可以作为模式单个诊断量的有效补充。

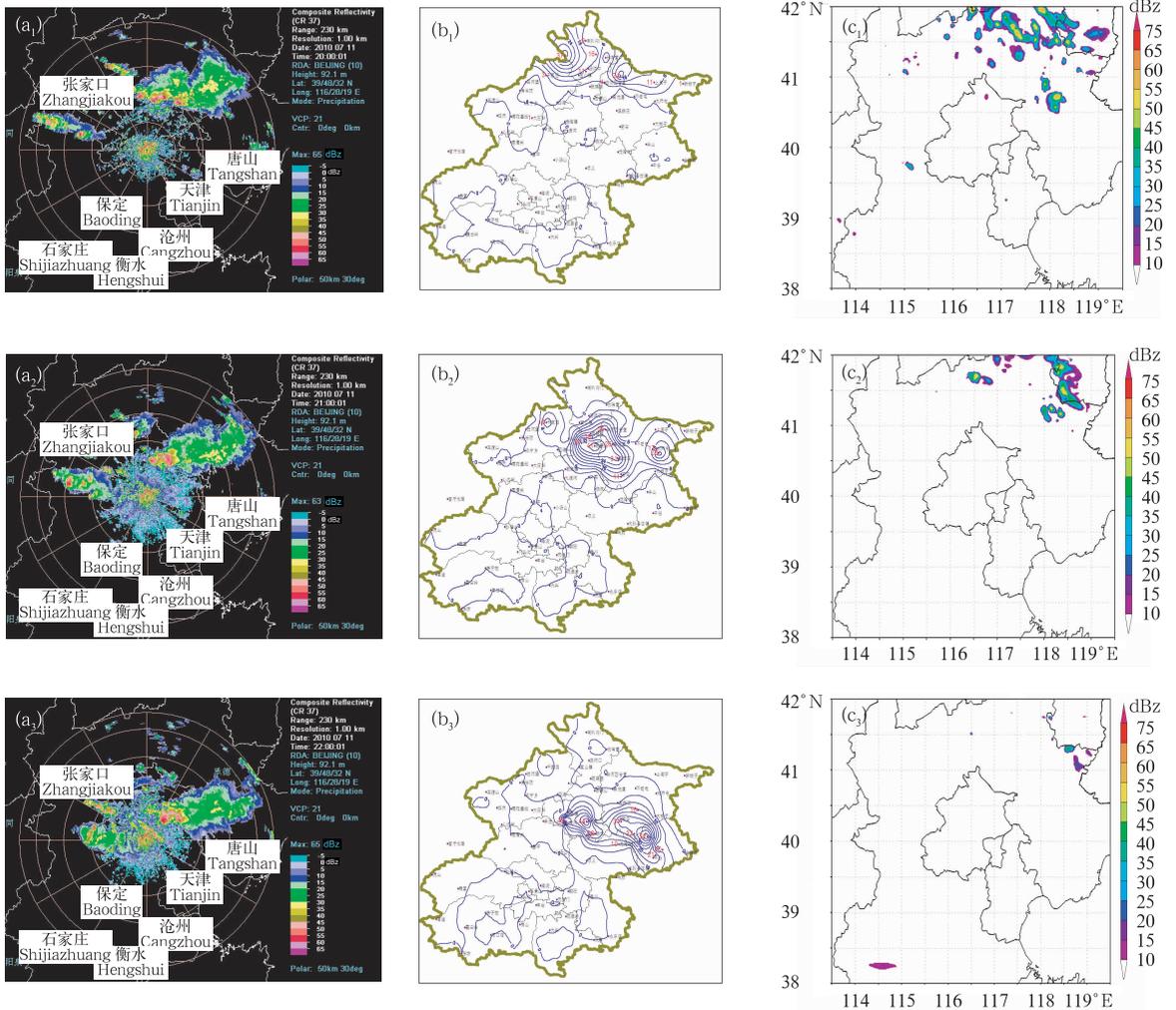


图7 2010年7月11日20(a₁, b₁, c₁)、21(a₂, b₂, c₂)、22(a₃, b₃, c₃)时实况雷达反射率因子(a₁, a₂, a₃), 实况雨强(b₁, b₂, b₃, mm/h)以及BJ-RUC模式11时起报的-20℃层上的反射率因子(c₁, c₂, c₃)

Fig. 7 Radar reflectivity factor (a₁, a₂, a₃), 1h precipitation (b₁, b₂, b₃), and the output radar reflectivity factor (at the level of -20 degree) initiating at 11:00 BT 11 Jun 2010 by the BJ-RUC (c₁, c₂, c₃) (a₁, b₁, c₁ 20:00 BT, a₂, b₂, c₂ 21:00 BT, and a₃, b₃, c₃ 22:00 BT)

概率预报方案中权重系数的引入使得某些物理量参数的作用得到突显,表现为概率空间分布上的局部特征更加明显。连续概率计算方法的引入能很好地缓解由于“双重极端”引起的概率分布离散,针对性较差等问题。

对于强对流天气的分类预报来说,始终是一项比较困难的工作。在前期大量的统计、诊断研究基础上,确立了基于BJ-RUC模式的北京地区强对流及分类概率预报方案,试验结果表明,该方案能够对BJ-RUC模式的预报能力进行较大限度的改进和拓

展。通过2009、2010年北京地区典型的8次强对流天气过程(本文只给出3个)概率预报的结果对比发现,强对流概率预报的结果与实况还是比较接近的。

由于北京地区的强对流天气多数表现为短时暴雨或者是伴有冰雹的短时暴雨天气,而不伴随强降水的冰雹(或雷暴大风)天气相对较少,因此,在分类预报中短时暴雨的预报结果与强对流总体预报结果差异不大,仅表现在范围可能更为集中或者中心更为突出;通过进一步筛选预报因子,试验方案能够在一定程度上从较大范围的强对流过程中捕捉到可能

发生冰雹/雷暴大风的发生区域。当然由于试验预报样本数量还不够多,本试验预报方案需要更多强

对流天气过程作检验并进一步改进。

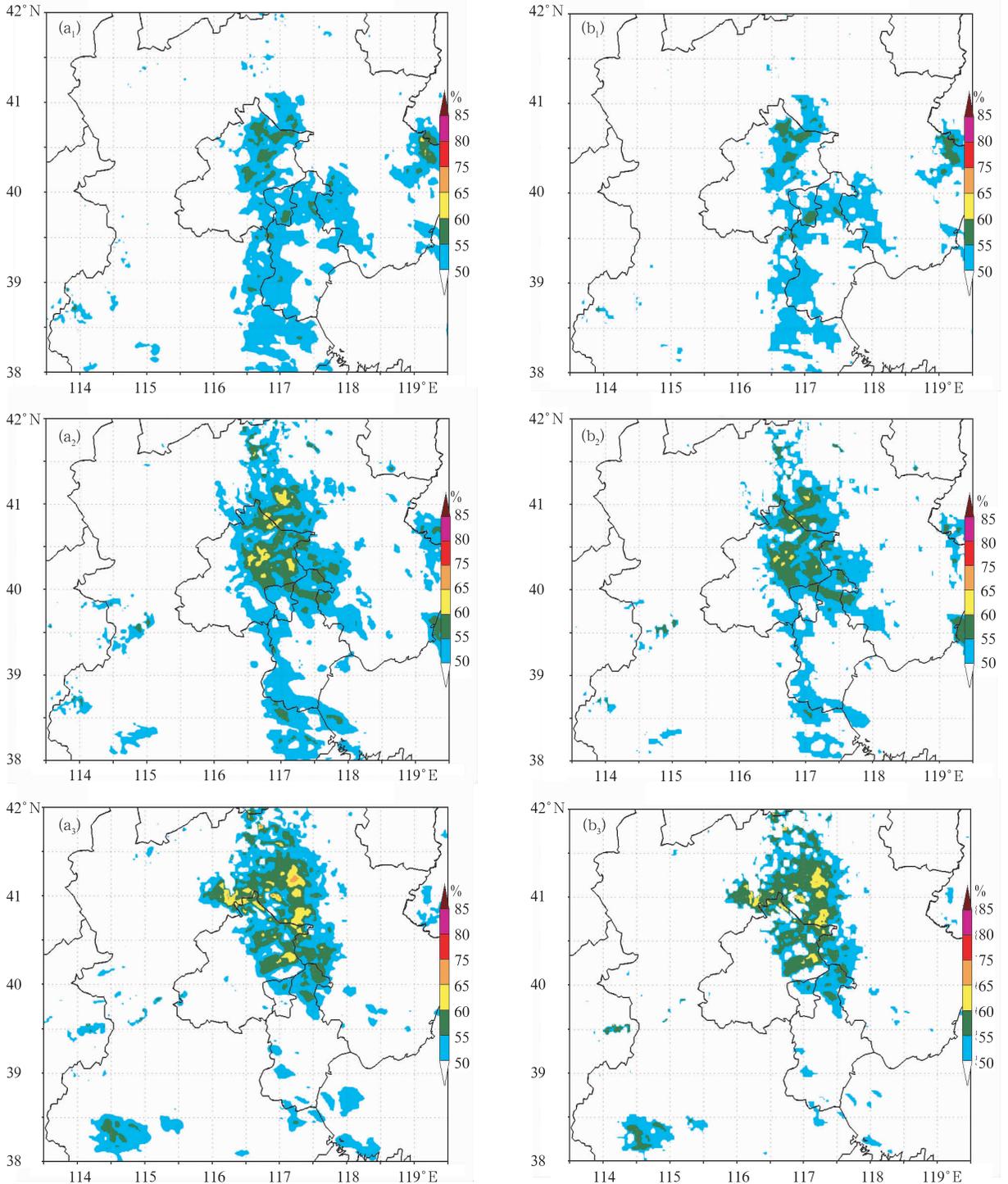


图8 2010年7月11日BJ-RUC模式11时起报的11日23时(a₁、b₁)、12日00(a₂、b₂)、01时(a₃、b₃)强对流概率(a₁、a₂、a₃)及强降水概率(b₁、b₂、b₃)预报

Fig.8 Convective weather probability forecast (a₁, a₂, a₃) and the short-time severe rain probability forecast (b₁, b₂, b₃) initiating at 11:00 BT 11 Jul 2010 by the BJ-RUC (a₁, b₁. 23:00 BT, a₂, b₂. 00:00 BT, and a₃, b₃. 01:00 BT)

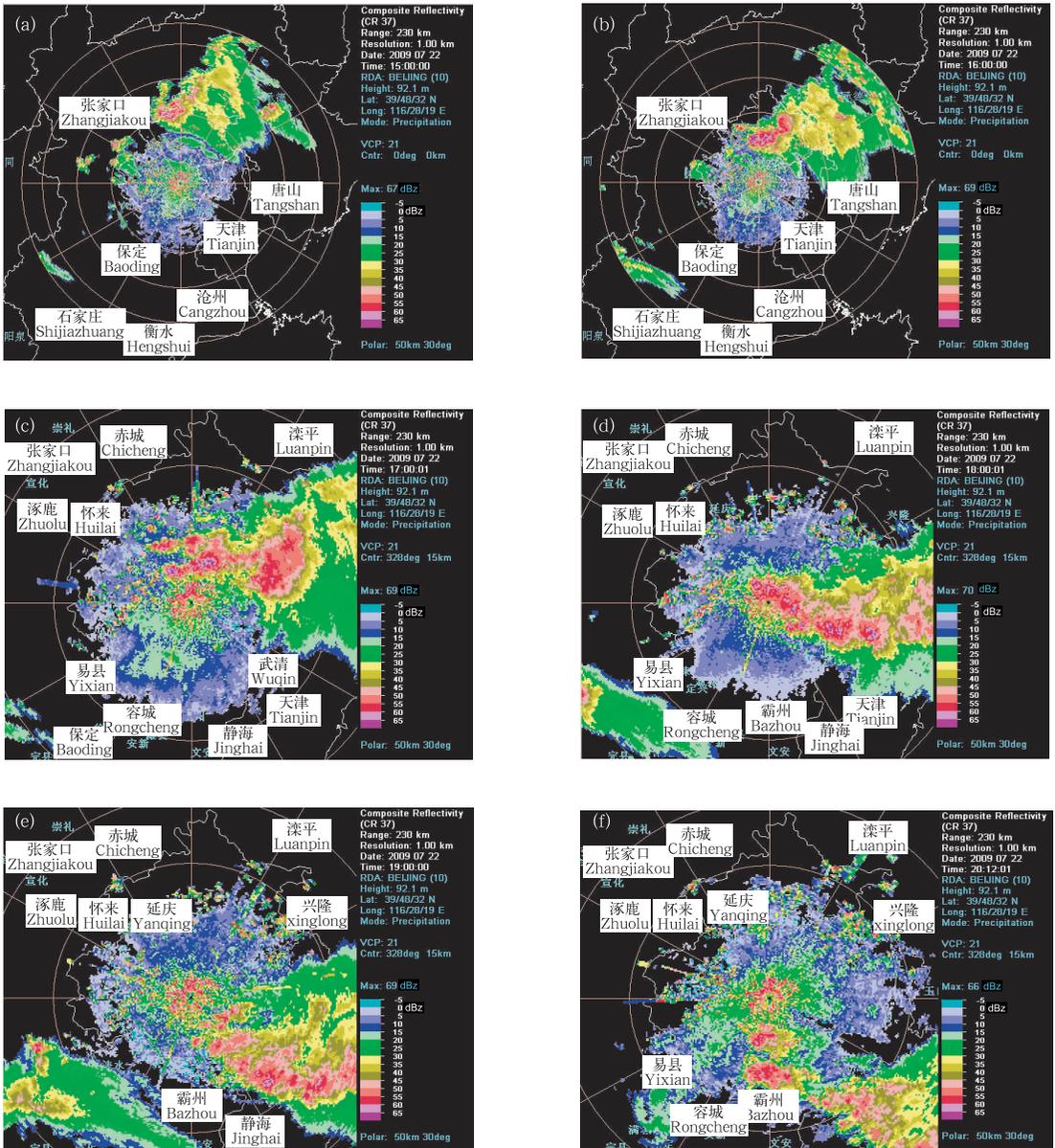


图 9 2009 年 7 月 22 日实况雷达反射率因子

(a. 15 时, b. 16 时, c. 17 时, d. 18 时, e. 19 时, f. 20 时)

Fig. 9 Radar reflectivity factor on 22 July 2009

(a. 15:00 BT, b. 16:00 BT, c. 17:00 BT, d. 18:00 BT, e. 19:00 BT, and f. 20:00 BT)

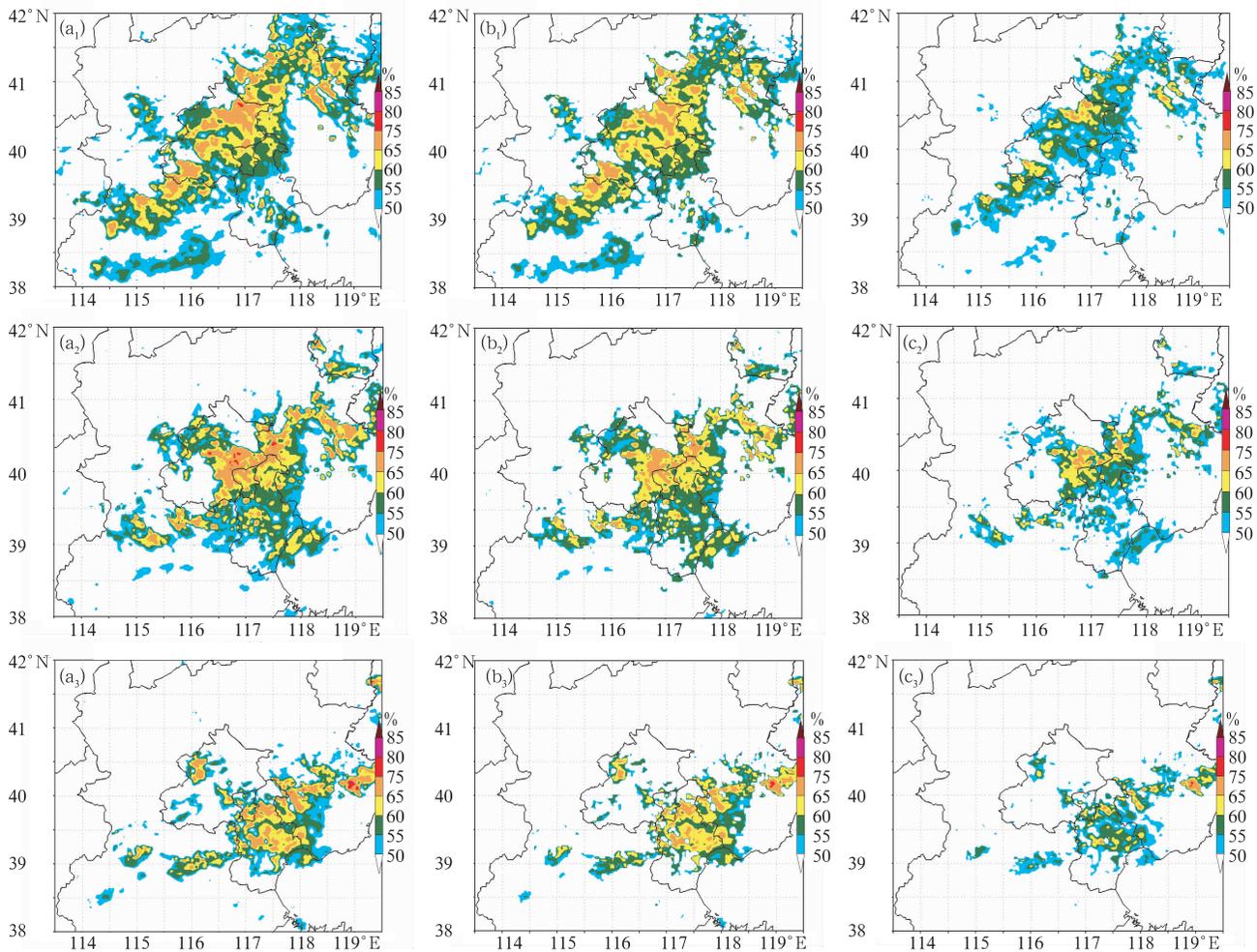


图 10 2009 年 7 月 22 日 BJ-RUC 模式 11 时起报的

15、16、17 时强对流概率(a_1 、 a_2 、 a_3)短时强降水概率(b_1 、 b_2 、 b_3)冰雹发生概率(c_1 、 c_2 、 c_3)

Fig10 Convective weather probability forecast (a_1 , a_2 , a_3), the short-time severe rain probability forecast (b_1 , b_2 , b_3) and the hailstorm probability forecast (c_1 , c_2 , c_3) initiating at 11:00 BT 22 July 2009 by the BJ-RUC (a_1 , b_1 , c_1 : 15:00 BT, a_2 , b_2 , c_2 : 16:00 BT, and a_3 , b_3 , c_3 : 17:00 BT)

致谢:感谢中国气象局北京城市气象研究所的陈敏、王在文、范水勇等同志在本研究过程中 BJ-RUC 模式上给予的支持和帮助!

参考文献

- 雷蕾, 孙继松, 魏东. 2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别. 气象, 37(2): 136-141
- 李耀东, 刘健文, 高守亭. 2004. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究. 气象学报, 62(4): 401-409
- 彭治班, 刘建文, 郭虎. 2001. 国外强对流天气的应用研究. 北京: 气象出版社, 414
- 魏东, 尤凤春, 范水勇等. 2010. 北京快速更新循环预报系统 (BJ-RUC) 模式探空质量评估分析. 气象, 36(8): 72-80
- 魏东, 孙继松, 雷蕾等. 2011a. 用微波辐射计和风廓线资料构建探

空资料的定量应用可靠性分析. 气候与环境研究, 16(6): 697-706

- 魏东, 孙继松, 雷蕾等. 2011b. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析. 气象, 37(4): 412-422
- Stensrud D J, Cortinas J V Jr, Brooks H E. 1997. Discriminating between tornadic and nontornadic thunderstorms using mesoscale model output. Wea Forecasting, 12(3): 613-632
- Hart R E, Forbes R S, Grumm R H. 1998. The use of hourly model-generated soundings to forecast mesoscale phenomena. Part I: Initial assessment in forecasting warm-season phenomena. Wea Forecasting, 13(4): 1165-1185
- Lee B D, Wilhelmson R B. 2000. The numerical simulation of non-supercell tornadogenesis. Part III: Parameter tests investigating the role of CAPE, vortex sheet strength, and boundary layer vertical shear. J Atmos Sci, 57(4): 2246-2261