

王婷婷,王迎春,陈明轩,等.北京地区干湿雷暴形成机制的对比分析[J].气象,2011,37(2):142-155.

北京地区干湿雷暴形成机制的对比分析^{*}

王婷婷¹ 王迎春² 陈明轩³ 张文龙³

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 北京市气象局,北京 100089

3 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089

提 要:利用多普勒雷达变分分析系统,结合局地非常规观测资料,对北京两次雷暴过程,即2008年8月14日湿雷暴(伴有强降水,简称“814”)和8月24日干雷暴(弱降水,简称“824”)形成的环境物理条件进行了较深入的对比分析,结果表明:(1)影响“814”的天气系统,主要是高层500 hPa稳定的东北冷涡槽和与之配合的850 hPa切变线,850 hPa以下整层空气湿润,北京位于比湿值大于 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和地面相对湿度大于90%湿舌区,中低层具有由湿度差动平流引起的对流不稳定;“824”高层盛行平直的偏西风,低层有反气旋,地面有冷锋快速过境,850 hPa以下整层空气干燥,北京处于比湿小于 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和相对湿度小于30%区,中低层有明显的温度差动平流。(2)“814”北京上空存在较强的整层垂直风切变,500~1500 m风向随高度有明显顺转,增强低层暖湿入流,有利于雷暴迅速组织发展,整层合成风小,雷暴移速慢;“824”则相反,垂直风切变弱,没有明显的低层暖湿入流,不利于雷暴组织加强,整层合成风大,促使对流系统快速东移。(3)“814”是一次多单体雷暴相互影响,并相继碰撞合并的湿雷暴群事件,上游雷暴降水产生强的冷池出流与前方低层偏东风暖湿气流形成辐合线,迫使暖湿气流抬升,加上强热力不稳定和垂直风切变,有利于新对流单体产生,而多个雷暴冷池出流形成的阵风锋之间的相互碰撞,进一步加剧了这种不稳定,导致冷池之间雷暴新生或加强;“824”是一次伴随冷锋的线状对流系统快速东移过程,上游雷暴冷池出流阵风锋前沿没有明显的偏东风暖湿气流配合,缺少中尺度抬升机制和暖湿入流,新生雷暴难以生成和发展。

关键词:湿雷暴,干雷暴,冷池,阵风锋,垂直风切变

The Contrastive Analysis of Formation of Dry and Moist Thunderstorms in Beijing

WANG Tingting¹ WANG Yingchun² CHEN Mingxuan³ ZHANG Wenlong³

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

3 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: Using the Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS) combined with local unconventional observation data, a more in-depth contrastive analysis is carried on the initiation mechanism of two storm cases in Beijing, one is 814 (August 14, 2008) case with strong rainfall that we call it as moist-storm and the other is 824 (August 24, 2008) case with little rainfall that we call it as dry-storm. The results show: (1) The synoptic-scale systems of 814 storm were stable Northeast cold vortex-low trough at 500 hPa and shear line at 850 hPa, the specific humidity that more than $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ below 850 hPa and the relative humidity that more than 90% in the surface indicated that the atmosphere was very moist. It had convective instability caused by humidity advection in lower levels. The 824 storm had a prevailing straight west wind in high levels, an anticyclone in lower levels, and a surface cold front moving fast. The specific humidity that less than $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the relative humidity that less than 30% below 850 hPa indicated

* 公益性行业(气象)科研专项“京津冀城市群强对流天气短时临近预报关键技术研究”(GYHY200706004)资助

2010年5月3日收稿; 2010年8月1日收修定稿

第一作者:王婷婷,研究方向:强对流天气的分析和预报. Email:tingting1985511@163.com

that the atmosphere was very dry. It had convective instability caused by temperature advection. (2) There was much strong vertical wind shear in the whole vertical layer for 814 storm case, the clockwise wind direction with height within 500—1500 m intensified the warm and humidity inflow of lower layer advantageous to storm initiation and development. While there was weak vertical wind shear and unobvious warm and humidity inflow of lower layer for 824 case, which was not conducive to storm initiation and development. In addition, composited wind of the whole troposphere and storm movement speed were very low for 814 case, but they were very high for 824 case. (3) The 814 storm was formed by the collision and mergence of multi-cell storms, a convergence line was formed by the cold pool outflow produced by the precipitation of the upstream of thunderstorm cell and the east wind in low levels which forced the low-level warm and moist air to uplift, additionally the strong convective instability and vertical wind shear supported the formation and development of new storm. The interactions (collisions) of gust fronts in the leading edge of cold pool of multi-cell thunderstorm group, further exacerbating the low-level instability, leading to the regeneration and mergence of new convective thunderstorms. The 824 storm was a line convective system accompanied with cold front that rapid moved eastward and lasted for short time, there was no east wind with warm and moisture air accompanying the cold pool outflow produced by the downdrafts of thunderstorm. The absence of mesoscale lifting mechanism and moisture inflow couldn't support the formation and development of new storm.

Key words: moist-storm, dry-storm, cold pool, gust front, vertical wind shear

引言

众所周知,雷暴形成的环境物理条件,主要包括抬升力、水汽和不稳定层结。此外,垂直风切变的大小和具体结构对雷暴强弱和组织状态等有重要影响,逐渐引起国内外学者广泛关注。近几十年来,随着各种观测手段的不断完善和中尺度数值模式的发展,国内外围绕雷暴形成的环境条件从天气尺度、中尺度和对流尺度等方面开展了大量分析研究工作,对强对流天气形成机理有了更深入的认识,并揭示了雷暴发生、发展的演变规律,提出了雷暴结构的概念模型。

大量观测事实分析表明,对流超级单体在强垂直风切变环境中能迅速组织和发展。Newton 第一次指出环境风垂直切变与雷暴的相互作用可以增强或延长雷暴生命期^[1]。Rotunno 和 Klemp 提出了著名的 RKW 理论,即当低层垂直风切变和冷池强度达到平衡时为最优状态,此时对流获得最大程度发展^[2]。Fovell 等在前人基础上揭示了雷暴发生发展机制,即:对流云中降水粒子落入云下不饱和区后产生蒸发,使其周围空气冷却,冷空气下沉,维持冷池发展;冷池出流边界产生的阵风锋与前方暖湿气流碰撞形成辐合抬升,使得沿着雷暴移动方向的前

方将会产生新的雷暴单体^[3-4]。廖晓农等统计了北京 24 个雷暴大风日位温(θ_e)平均廓线,发现雷暴发生前对流层低层 θ_e 有极大值,对流层中层 θ_e 有极小值,即干空气位于暖空气之上,引起层结不稳定^[5]。郑媛媛等利用多普勒雷达对一次典型的超级单体风暴进行了详细分析,指出该风暴具有有界弱回波区(穹窿)、回波悬垂、中气旋等特征^[6]。邵玲玲等利用多普勒天气雷达中气旋产品探讨了其在强风预报中的应用^[7]。

近几年来,利用雷达观测资料获得与对流雷暴生消发展密切相关的环境热动力场三维结构,已成为目前国际上天气雷达资料应用研究的一个重要方向^[8-9]。其中,基于最优控制理论和伴随方法的四维变分同化技术(4DVar)成为雷达资料同化应用最有效的途径之一^[10-11]。Sun 等指出:与其他方法相比,4DVar 在雷达资料同化方面具有明显优势,它能够充分考虑与模式的协调,并能有效地利用高频次的探测信息来捕捉雷暴过程^[12]。Sun 等发展了变分多普勒雷达分析系统(The four-dimensional Variational Doppler Radar Analysis System,简称 VDRAS),实现了对单部多普勒雷达资料的 4DVar 同化反演,对飑线过程的分析表明,VDRAS 能够描述出低层阵风锋、辐合线和冷池等特征^[13-15]。

相对于国外较深入的雷暴研究,国内在此方面

开展的深度不够,特别是利用雷达等非常规资料对雷暴形成的环境条件缺乏深入细致的研究工作。此外,国内外对于干雷暴的研究尚不多见。北京局地暴雨和强对流常发生在相对较干的夏季大陆气团中,水汽供应并不十分充沛,与我国华南、江淮地区有明显不同,但却在这样的背景下,常发生突发性局地暴雨和强对流天气^[16-21]。因此,开展针对北京的雷暴等强对流天气研究,对更进一步认识我国北方地区强对流天气发生、发展和演变规律具有十分重要的科学价值,对提高京津冀大城市的强对流天气预报水平无疑也是有益的工作。

与以往国内雷暴研究不同,本文主要是基于多普勒雷达反演技术,并结合其他探测资料,围绕雷暴形成的环境物理条件,对北京发生的两次典型的干湿雷暴过程的形成机制进行较深入的对比分析研究,特别是在低层热动力场和垂直风切变等方面的研究,弥补了国内以往工作的不足,也为此类强对流天气的预报工作提供有价值的科学参考。

1 资料与方法

本文利用同化了北京和天津两部 SA 多普勒雷达资料的反演分析系统(VDRAS),以及南郊观象台(54511 站)奥运期间每日 4 个时次(08、14、20 和 02 时)的探空和位于观象台、海淀时间间隔为 6 min 的风廓线仪等数据,对北京两次干湿雷暴过程的形成机制进行较全面的对比分析。资料范围及观测站点如图 1 所示(本文所用资料均是北京时)。

1.1 多普勒雷达变分分析系统简介

这里仅对 VDRAS 作简要介绍,关于其三维云尺度数值模式和 4DVar 同化技术的详细内容,可参阅相关文献[13-15]。多普勒雷达四维变分分析系统是利用 4DVar 同化技术和一个采用简单暖雨参数化方案的云尺度模式,对雷达资料进行 12 min 间隔的快速更新循环同化分析,反演与对流雷暴生消发展密切相关的低层热动力场,包括水平风场、辐合辐散、扰动温度和扰动温度梯度等。

该系统使用的数据包括:(1)北京南郊观象台($31^{\circ}52'1''N, 117^{\circ}15'28''E, 165.6\text{ m}$)和天津滨海新区($39^{\circ}2'38''N, 117^{\circ}43'1''E, 69.8\text{ m}$)两部 S 波段雷达探测的径向速度和反射率因子(图 1 中 BJRS 和 TJRS);(2)模式分析范围内 53 个自动站的 5 min

观测,包括温度、湿度、气压和风场;(3)北京快速更新循环数值预报系统(BJ-RUC)输出的探空廓线。系统每 12 min 输出一次同化分析结果。其中,将初猜场与 Barnes 法插值后的雷达 VAD 结果融合,得到高空分析场,将地面自动站观测经 Barnes 插值分析后得到地面分析场,并利用垂直最小二乘拟合法和距离权重修正法对地面和高空分析场进行合成得到背景场。

鉴于两部雷达有效探测范围,将 VDRAS 运算范围设置为 $300\text{ km} \times 300\text{ km}$,水平分辨率为 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 。本论文主要利用 VDRAS 获得边界层(3 km 以下)三维热动力场。因此,模式顶高设置为 5.4375 km,仅在 3 km 以下的雷达资料被同化,3 km 以上作为模式顶海绵边界层处理。同时,考虑到时空一致性,将模式垂直分辨率设置为 375 m,模式最低层为垂直分辨率的一半,即 187.5 m。对比试验分析表明,上述设置与全对流层设置的 VDRAS 所反演的低层热动力三维结构差异不大^[22],也保证了每个 4DVar 循环能够在 12 min 内完成,从而确保了新资料到达时下一个循环能够启动。

1.2 检验分析

陈明轩等^[23]选取 2008 年 7 月 30 日至 8 月 30 日期间北京及其周边发生的 10 个典型风暴个例(包含这两次个例),利用位于北京海淀区的风廓线雷达和观象台的地基微波辐射仪资料,分别对 VDRAS 反演的风场和温度场进行统计检验,计算 VDRAS 反演结果与两者之间的偏差和均方根误差。关于微波辐射仪数据可靠性,有研究指出:微波辐射计和探空两者测量方法的温度变化趋势相同,7 km 以下两者温度等值线几乎重合^[24-25]。

如图 2 所示,风速偏差均在 $-2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之内,对于能够指示辐合辐散和出流的低层风场来说,偏差较小,在 $-1.5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内;除 8 月 29 日个例,风速均方根误差均在 $2.5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内,低层更小。风向偏差在 20° 以内,与风廓线雷达相比,误差在一个象限之内。温度偏差和均方根误差在低层和高层均较小,中层稍大,这与当天微波辐射仪与探空数据相比低层偏冷,中层偏高有关(温度绝对差为 $0.5 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$),低层偏差和均方根误差分别在 -1.9°C 和 2.8°C 以内,能够很好地指示出冷池结构。因此,VDRAS 反演的边界层温度场和风场总体上与观测

值较接近,其中温度场偏差较合理,风场误差相对偏大,但仍能较好地反演出对流层低层辐合辐散、冷池的位置和强度等演变特征。

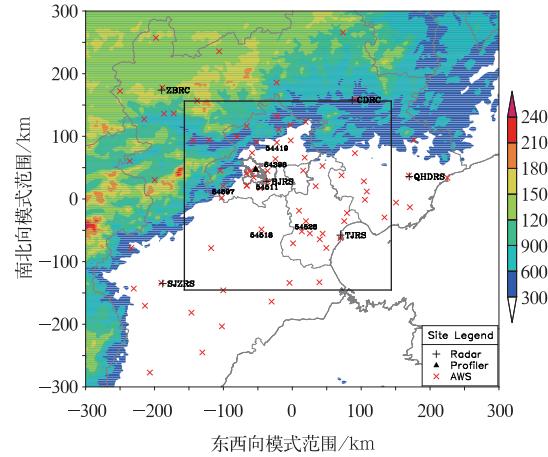


图1 京津冀的雷达和主要自动站站点分布及VDRAS反演分析范围示意图

其中,“+”表示雷达站位置;“×”表示自动站位置;“▲”表示检验使用的海淀边界层风廓线位置;矩形框表示VDRAS反演分析区;彩色阴影区表示地形高度。
Fig. 1 Sketch map of radar and AWS distribution in Beijing-Tianjin-Hebei area and VDRAS model domain. Sites of radars, AWS and the profiler used as verification are symbolized by “+”, “×” and “▲” respectively; VDRAS model domain is marked with the rectangle; terrain height is marked with color shaded figure

2 天气实况和背景分析

本节主要利用NCEP $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 再分析资料,并结合加密探空、风廓线仪等非常规探测资料对比分析两次雷暴形成的环境条件异同。

2.1 天气实况

“814”是一次典型的湿雷暴过程,北京受多个雷暴群影响,中午至傍晚发生了近6个小时的阵性强降水,并伴有雷电现象,降水量呈跳跃式分布,有6个降水中心达到50 mm以上,城区平均雨量达到23 mm,昌平山前(长陵)和怀柔区西南部6小时内累积雨量超过84 mm,强降水导致正在进行的奥运会网球比赛被迫中断。“824”是一次典型的干雷暴过程,主要发生在24日00—04时,全市大部分地区无降水,仅个别站出现少量降水,且分布极不均匀,单站局地最大降水量仅为5 mm,但伴有持续3小时左右的强烈雷电。

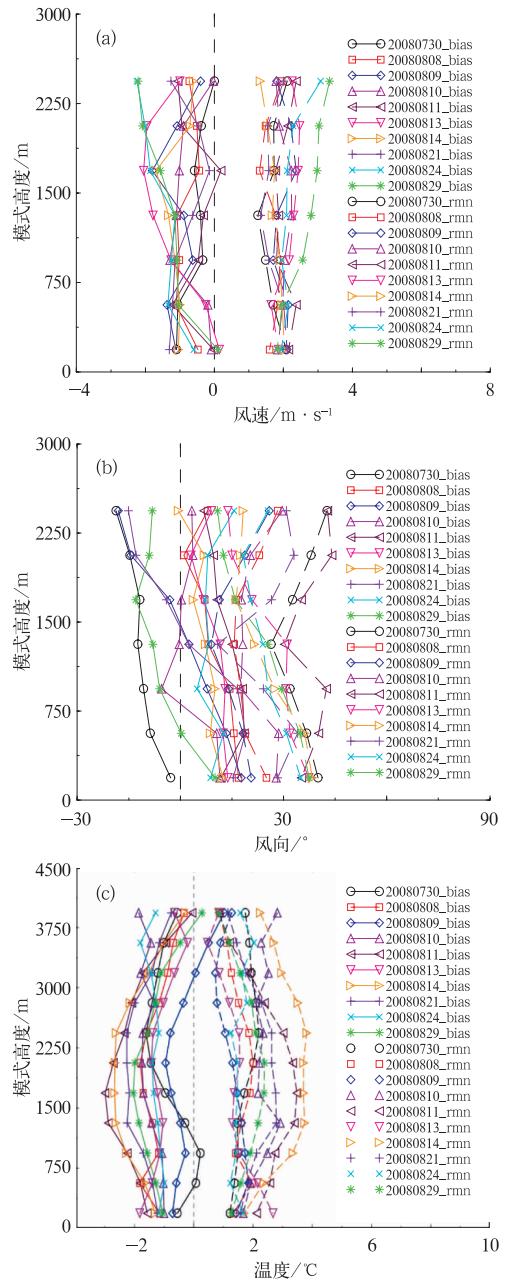


图2 VDRAS对2008年10个风暴个例

反演的风速(a)、风向(b)、温度(c)的偏差(bias, 实线)和均方根误差(rms, 虚线)

Fig. 2 Bias (solid curves) and root mean square errors (rms, dashed curves) of VDRAS retrievals for 10 storm cases in 2008 (a) wind speed, (b) wind direction, (c) temperature
The abscissa is wind speed (a), wind direction (b) and temperature (c), and the ordinate is VDRAS model height in m

2.2 天气尺度背景条件

8月14日08时,北京位于500 hPa东北低涡槽

前,系统稳定少动,为多单体雷暴群的组织化发展提供了较好的潜势条件,但等温线和等压线近乎平行,冷暖平流不明显;850 hPa 上空有一偏东风与东北偏北风构成的弱切变线,温度梯度小;地面形势特征不明显(图 3a)。从 850 hPa 水汽通量散度来看(图略),水汽输送不明显,但该层以下空气很湿,北京处

在比湿值大于 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和地面相对湿度大于 90% 的湿舌区,这可能与之前 9—13 日京津冀地区一直有不间断的阵性和持续性降水过程密切相关。

8月23日20时,500 hPa 北京受较平直的西风气流控制;850 hPa 上空有一反气旋,有利于低层不稳定能量积累,45°~50°N 之间有一等温线密集区,

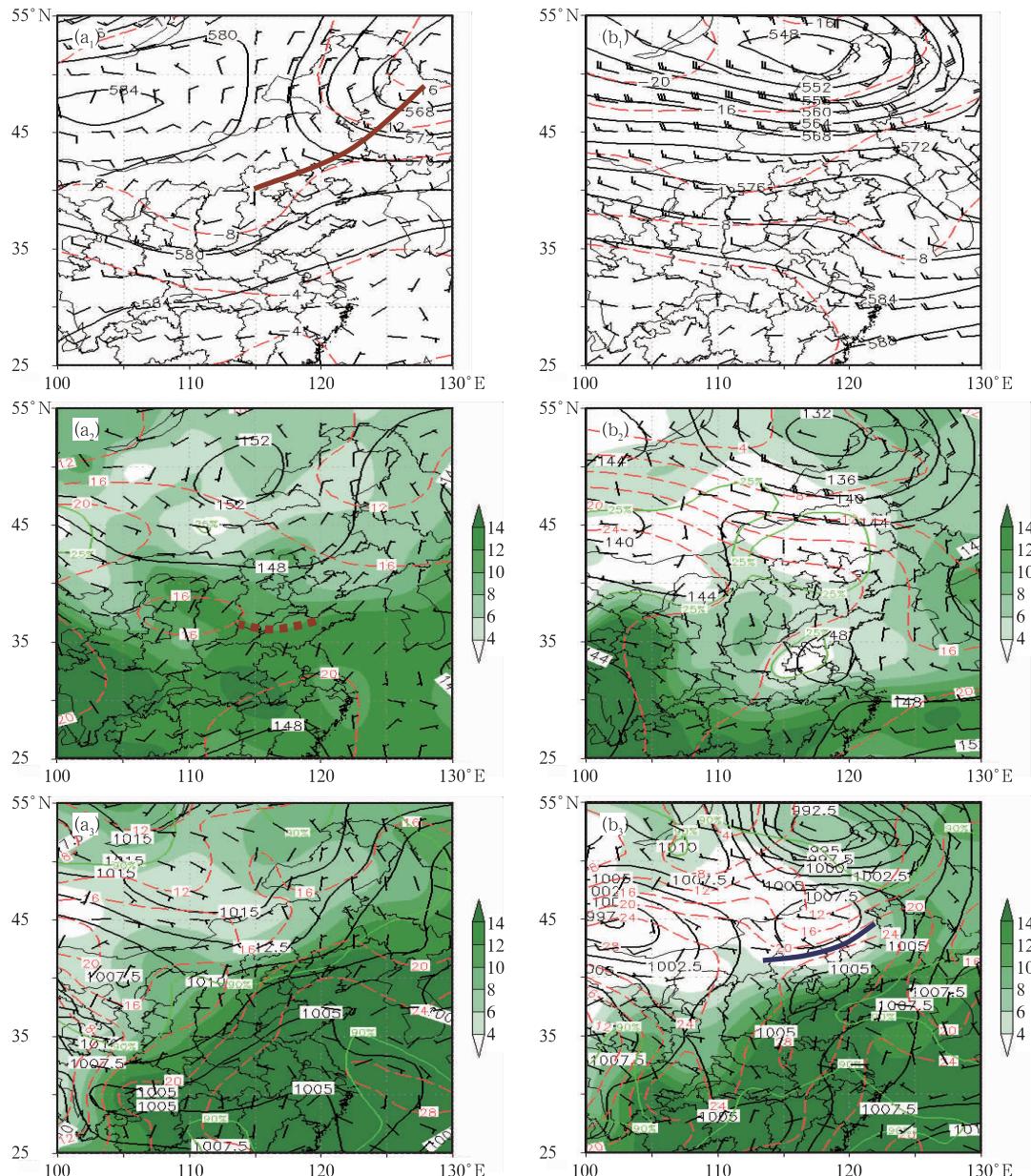


图 3 2008 年 8 月 14 日 08 时(a)和 23 日 20 时(b)500 hPa、850 hPa 和地面形势对比图

其中,图中黑色实线、红色虚线、棕色实线和虚线、蓝色实线依次为等压线、等温线、

槽线(冷锋)和切变线,绿色实线为相对湿度等值线,阴影区为比湿场,单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Fig. 3 Weather situation comparison diagrams of 500 hPa, 850 hPa and 1000 hPa at 0800 BT 14 August (a) and 2000 BT 23 August 2008 (b) respectively

Black solid line, red dashed line, brown solid and dashed lines are isobar, isotherm, trough line

(cold front) and shear line respectively. Relative humidity is drawn as contours with green solid line,

and the shadow area is the specific humidity field in $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

5个纬度内相差 10°C ,温度梯度大,冷空气前沿已到达北京北部;地面形势场中,北京上空有一冷锋过境。850 hPa以下整层空气非常干燥,北京处于比湿小于 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和相对湿度小于30%区,水汽条件极差,不利于降水发生(图3b)。

分析500 hPa和850 hPa两层之间的水汽通量和温度平流差异,如图4所示:“814”北京500 hPa水汽通量小于 $1\text{ g}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$,850 hPa大于 $2\text{ g}\cdot\text{s}$

$\cdot\text{kg}^{-1}$,上下层水汽通量差大于 $2\text{ g}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$,温度差动平流接近 $0^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Crook曾指出,低层温度、湿度的垂直梯度变化 1 K 和 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 可导致风暴强度较大变化^[26],与“814”类似,故此次过程对流不稳定建立主要是由湿度差动平流引起。“824”则相反,水汽通量差小于 $1\text{ g}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$,温度平流差接近 $2.5\times 10^{-5}\text{ ^{\circ}C}\cdot\text{s}^{-1}$,对流不稳定的建立主要是由温度差动平流引起。

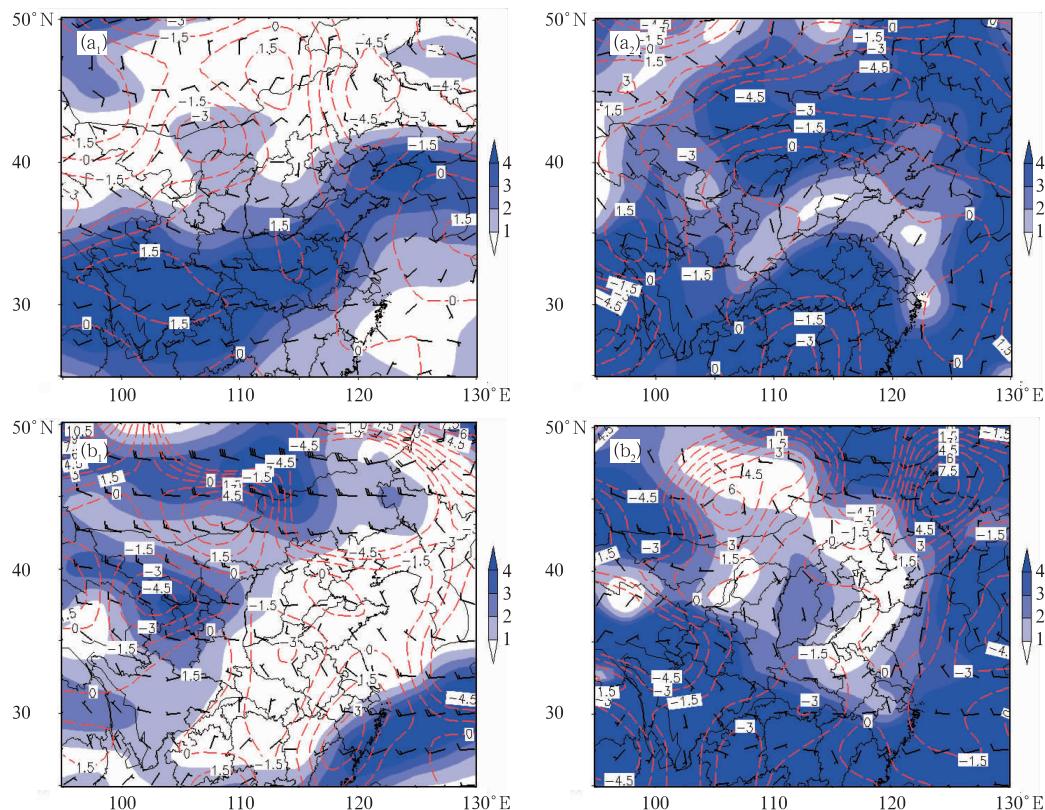


图4 2008年8月14日08时(a)和23日20时(b)500 hPa、850 hPa水汽通量和温度平流

图中阴影区为水汽通量,单位为 $\text{g}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$,红色虚线为温度平流,单位为 $10^{-5}\text{ ^{\circ}C}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 4 Water vapor flux (unit: $\text{g}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$) and temperature advection (unit: $10^{-5}\text{ ^{\circ}C}\cdot\text{s}^{-1}$) of 500 hPa and 850 hPa at 08 BT on 14 August (a) and 20 BT 23 August (b) 2008, respectively

The shadow area and red dashed line are water vapor flux and temperature advection, respectively

2.3 垂直风切变

垂直风切变是强对流天气发生的关键条件,能够在强雷暴前方形成低层辐合、高层辐散的散度分布特征,有利于雷暴在其前方不断再生并向前传播^[27]。利用北京相距约30 km的海淀气象站(探测高度3.6 km)和南郊观象台(16 km)两部风廓线资料,对比分析了两次过程垂直风切变特征,为我们研究强雷暴形成的环境风场条件,特别是认识北京地

区偏东风的作用提供了十分有价值的科学依据。

从南郊观象台风廓线数据可见(图5a),“814”雷暴发生前,北京上空存在较强的整层垂直风切变,1.5~4 km为偏东风,最大风速达到 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,4.5 km以上转为偏西风,风速仅为 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,为新生雷暴的发展提供了有利条件,且对流层整层合成风较小,进一步增强了对流单体的迅速组织和稳定发展;从海淀风廓线数据可见(图5b),0.05~1.5 km低层风向随高度由偏东北风顺转为偏东风,

且风速随高度增加。风垂直切变和近地面层偏东风的逐渐建立和加强,增强了新生雷暴低层暖湿入流,促使雷暴迅速组织和发展。“824”则完全不同,2 km以上整层盛行偏西北和西风,垂直风切变较小

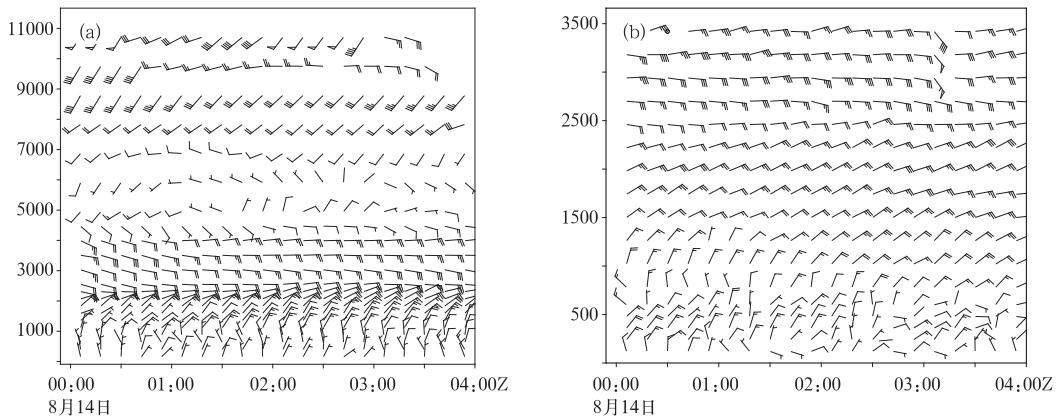


图5 2008年8月14日00—04 UTC南郊观象台(a)和海淀(b)风廓线图

横轴为时间,分辨率12 min;竖轴为垂直高度,单位:m

Fig. 5 Wind profile charts in Guanxiangtai (a) and Haidian (b) during 00—04 UTC 14 August 2008
Abscissa is the time with a resolution of 12 min, and ordinate is vertical height in m

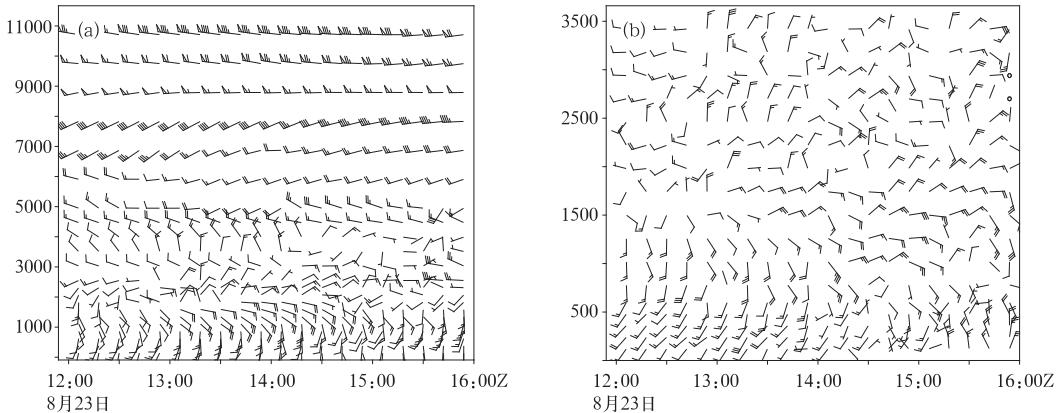


图6 2008年8月23日12—16 UTC观象台(a)和海淀(b)风廓线图

横轴为时间,分辨率12 min;竖轴为垂直高度,单位:m

Fig. 6 Wind profile charts in Guanxiangtai (a) and Haidian (b) during 12—16 UTC 23 August 2008
Abscissa is the time with a resolution of 12 min, and ordinate is vertical height in m

2.4 热力不稳定条件

利用南郊观象台每日4次加密探空资料,对比分析两次过程发生前后热力不稳定特征,结果发现:“814”探空层结曲线呈“漏斗”型,上层干冷下层暖湿,有利于降水产生。08时(雷暴发生前4小时)不稳定能量(CAPE)较大($1377 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),对流抑制能(CIN)较低($-71 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),热力不稳定较强,大气层结不稳定,有利于雷暴发生;14时(雷暴发生

(图6a),近地层为西南偏南风,风向随高度逆转,没有明显的低层暖湿入流(图6b),不利于雷暴新生或发展,且对流层整层合成风较大,促使雷暴快速东移减弱。

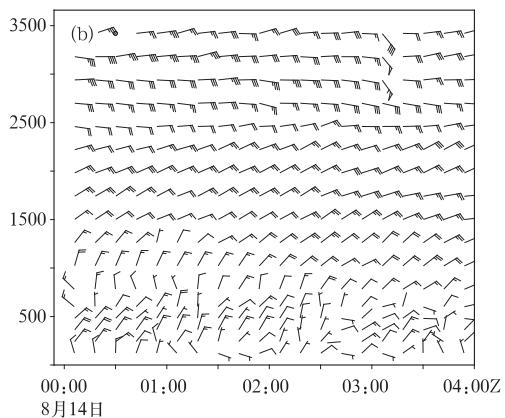


图5 2008年8月14日00—04 UTC南郊观象台(a)和海淀(b)风廓线图

横轴为时间,分辨率12 min;竖轴为垂直高度,单位:m

Fig. 5 Wind profile charts in Guanxiangtai (a) and Haidian (b) during 00—04 UTC 14 August 2008
Abscissa is the time with a resolution of 12 min, and ordinate is vertical height in m

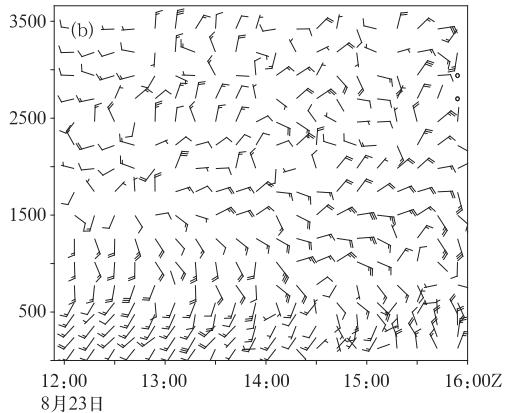


图6 2008年8月23日12—16 UTC观象台(a)和海淀(b)风廓线图

横轴为时间,分辨率12 min;竖轴为垂直高度,单位:m

Fig. 6 Wind profile charts in Guanxiangtai (a) and Haidian (b) during 12—16 UTC 23 August 2008
Abscissa is the time with a resolution of 12 min, and ordinate is vertical height in m

后)不稳定能量释放,大气层结稳定。“824”探空层结曲线呈“倒V”型,低层空气干暖,不利于降水产生。23日20时(雷暴发生前4小时)CAPE值较小($125 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),CIN值较大($-284 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),但600 hPa附近存在浅薄的逆温层,构成明显的干暖盖,为不稳定能量的积累及爆发式的释放提供了重要条件。24日02时(雷暴发展盛期),CAPE值为 $2595 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,但由于低层空气十分干燥,不利于降水产生,故出现了持续近3小时的雷电现象。

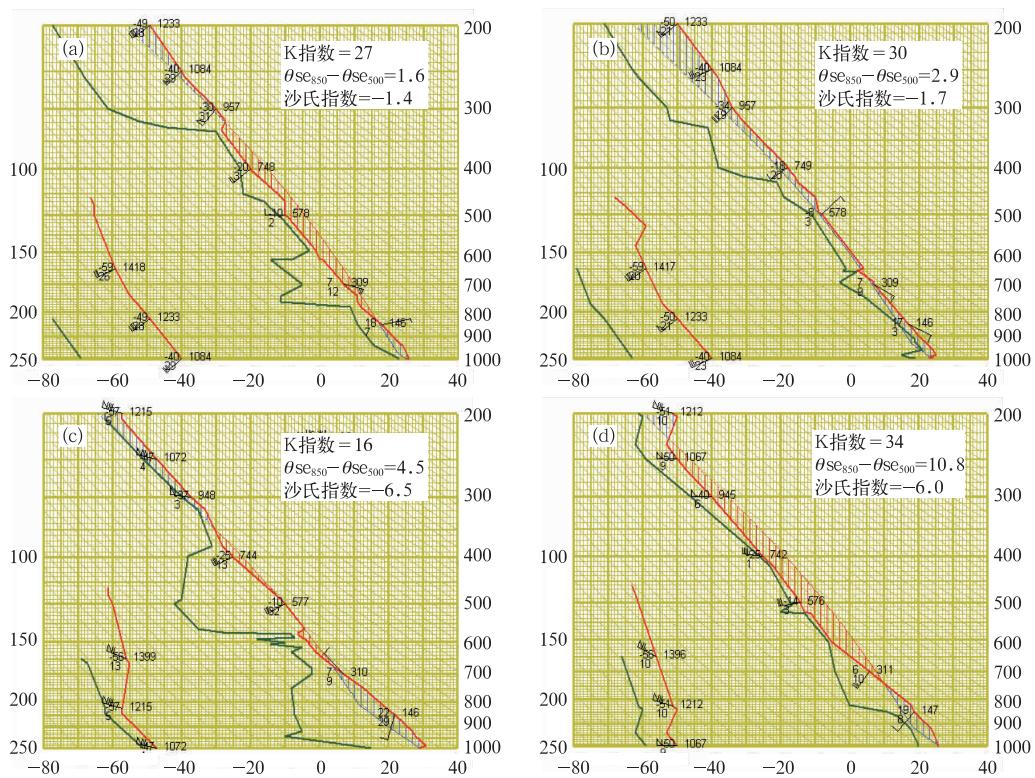


图 7 南郊观象台 2008 年 8 月 14 日 08 时(a)和 8 月 14 日 14 时(b),
8 月 23 日 20 时(c)和 8 月 24 日 02 时(d)的探空层结图
横轴为温度;竖轴为垂直高度,单位: hPa

Fig. 7 Sounding stratifications in Guanxiangtai at (a) 08 BT 14 August,
(b) 14 BT 14 August, (c) 20 BT 23 August, and (d) 02 BT 24 August, 2008
Abscissa is temperature (°C), and ordinate is the vertical height in hPa

3 雷达回波演变特征

“814”是一次多单体对流雷暴相互影响并相继合并的湿雷暴群事件(图 8a)。10:53 左右,北京西南边缘有一弓形回波 a 移入,有明显的“V”型后侧入流缺口,受其前沿较强出流影响,11:17 城区南部有对流元生成(图 9a),回波强度逐渐增强并发展为多单体雷暴 b,中层和低层回波位置几乎重合,回波顶位于低层和中层回波反射率因子最强区域之上,呈多单体非强雷暴特征(图略)。随后,该雷暴向海淀区移动,13:05 左右与减弱消散的弓形回波合并发展为多单体强雷暴,回波强度超过 60 dBz,有弱回波区和中高层回波悬垂的分布特征(图略)。同时,受地形影响,平谷县、昌平和怀柔区交界处(山前)有两组对流雷暴生成并向城区方向发展传播,15:41 左右与对流雷暴 b 相继合并在一起,覆盖了北京大部分地区,回波强度约为 40 dBz,随后逐渐

减弱消散。

“824”是一次伴随冷锋的线状对流系统快速东移事件,持续时间短(图 8b)。23 日 23:29 左右,北京西北边缘有一伴随冷锋的线状对流系统移入,受环境风场影响,云砧向前伸展,上层单体移速较快,不利于系统维持。24 日 00:35 左右,北京西部边缘受地形影响有对流泡生成并发展为弓形回波向东北方向移动,后侧有明显的“V”型入流缺口,引起强下沉气流。00:53 该弓形回波与线状对流系统南端连接在一起形成新的线状对流系统,低层存在高反射率因子梯度区以及弱回波区(图 9b),但回波顶位于低层和中层回波反射率因子最强区域之上,且云砧向前伸展,其前沿没有对流元新生,故不利于对流系统维持,01:35 该系统解体。

4 VDRAS 反演的低层热动力场分析

风廓线和探空等非常规探测资料,仅能观测到

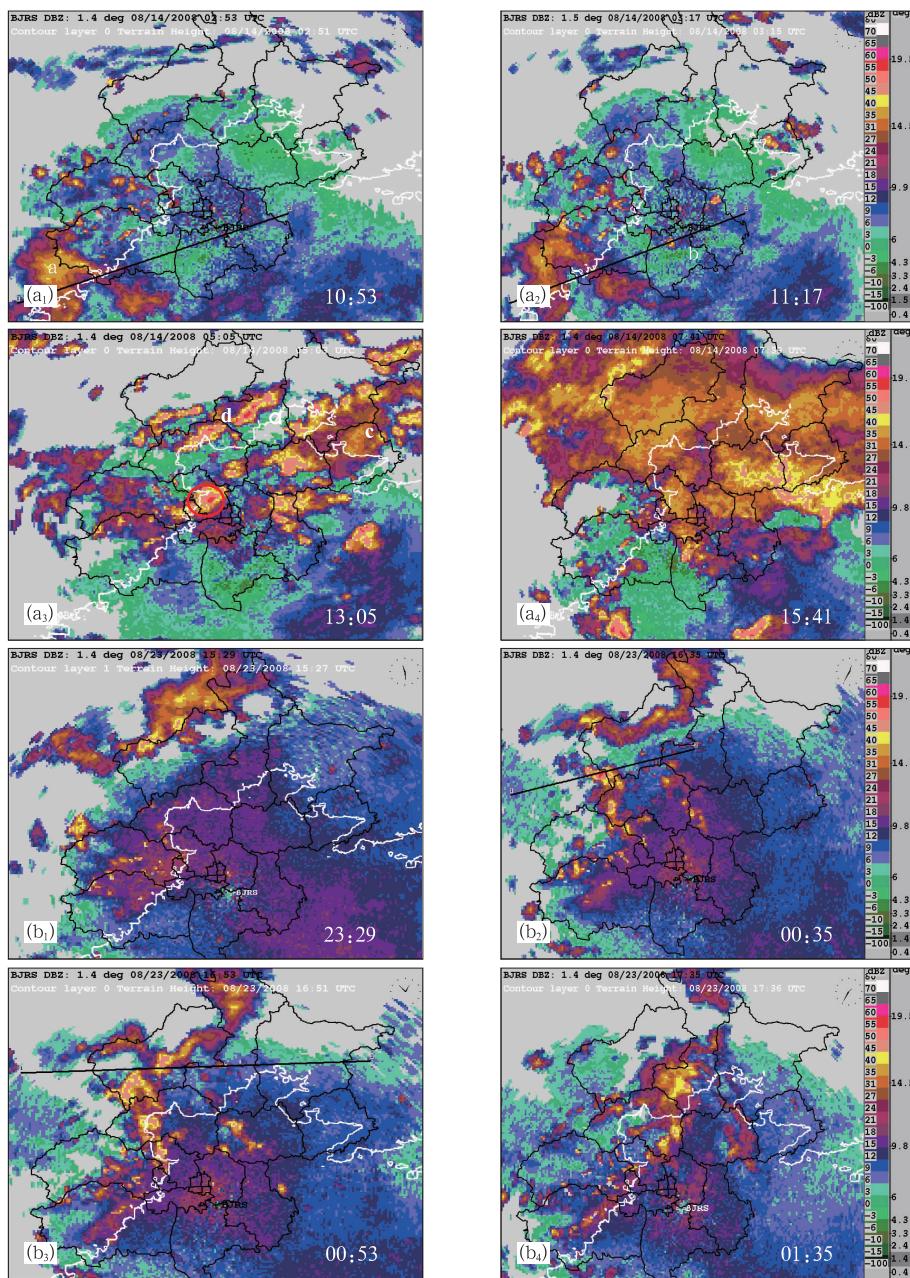


图8 “814”(a)和“824”(b)观象台S波段雷达反射率因子回波演变
图中的时间为北京时,雷达仰角为 1.5° ,VCP21体扫模式

Fig. 8 Radar echo evolution charts at 1.5 degree elevation angle with VCP21 scan for “814” case (a) and “824” case (b), respectively
Observational time in charts is measured in BT

单站点的垂直气象要素信息,而无法获得边界层风、温等气象要素场的三维变化信息。本研究利用多普勒雷达四维变分同化技术,可以有效地获得对流层低层三维热动力场,为更加深入细致地研究对流雷暴的形成机制提供十分有效的科学方法和不可或缺的手段。然而,鉴于目前计算机条件、平行运算技术和业务化要求,该系统仅3 km(含3 km)以下数据被同化,在分析系统位置和变化趋势上具有明显优

势。由于篇幅有限,这里我们着重讨论低层热动力场对“814”城区南部大兴区新生雷暴和“824”飑线形成的作用和影响,对“814”雷暴群之间的相互作用不作为本研究重点。

4.1 “814”湿雷暴(多单体雷暴群)

10:53时,北京西南方向有一强弓形雷暴回波移入,由降水引起的湿空气下沉蒸发导致近地面层

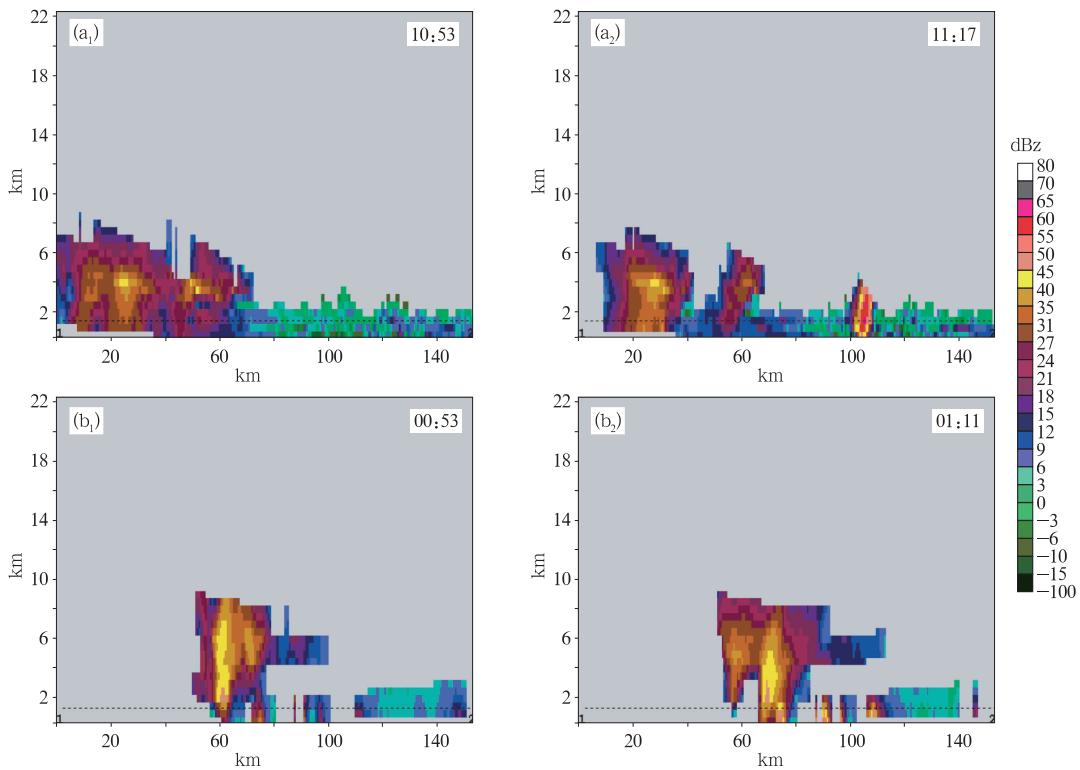


图9 “814”(a)和“824”(b)雷达回波垂直剖面

Fig. 9 Radar echo vertical sections for “814” case (a) and “824” case (b), respectively

温度较低,形成湿冷空气堆。从187 m高度扰动温度和风矢量场可见(图10a),该雷暴伴有一温度低中心构成的强冷池(CP1)。沿其移动方向,扰动温

度梯度逐渐加强,与西南风矢量呈90°夹角,即有强冷出流,且与前方近地面层偏东风暖湿气流汇合,在城区南部大兴形成一条南北向的辐合线。空气结构

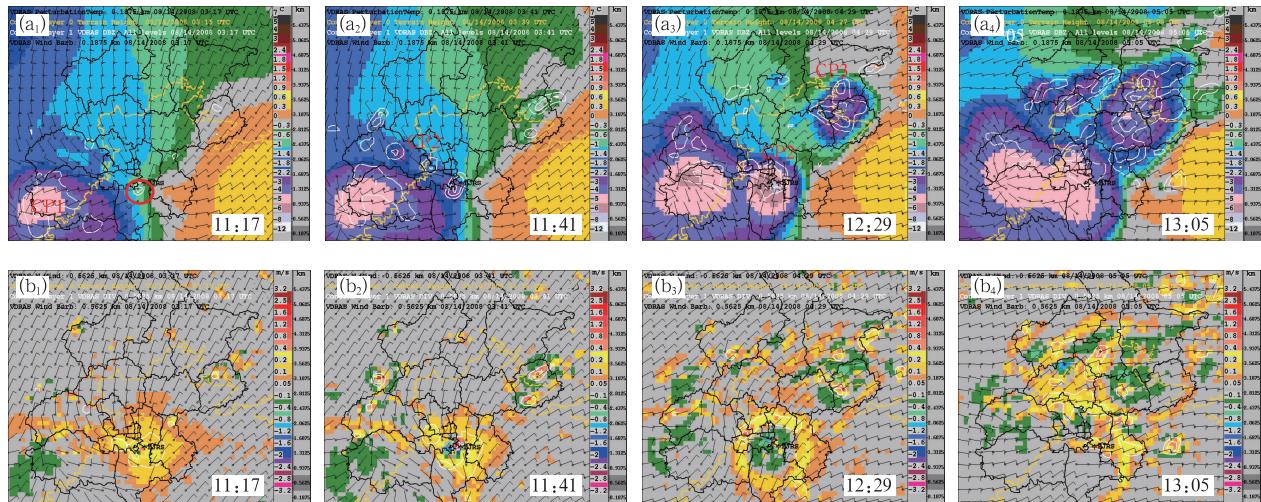


图10 VDRAS反演的2008年8月14日(a)在低层187.5 m的扰动温度、(b)在低层562.5 m的垂直速度叠加的风矢量为反演的水平风场,橙色实线为100 m高度地形。(a)中白色等值线为大于等于30 dBz的雷达组合反射率因子回波,间隔为10 dBz,(b)中等值线为从0.2 m·s⁻¹·km⁻¹开始,间隔0.3 m·s⁻¹·km⁻¹的水平辐合等值线

Fig. 10 Retrieved (a) perturbation temperature at 187.5 m height, (b) low-level vertical velocity at 562.5 m height on 14 August 2008 from VDRAS

Retrieved horizontal wind is drawn as wind barb. Radar reflectivity and white horizontal convergence lines are drawn as contours with minimum of 30 dBz and interval of 10 dBz and contours with minimum of 0.2 m·s⁻¹·km⁻¹ and interval of 0.3 m·s⁻¹·km⁻¹ in (a) and (b), respectively

的不连续为下一时刻对流单体新生提供了有利的抬升机制,在辐合线处有新对流单体产生,最大强度超过 50 dBz(图 8a₂,11:17)。沿弓形回波出流方向做垂直剖面(西南—东北向),如图 11 所示,10:53—11:17,弓形回波冷池出流与低层偏东风暖湿气流交汇处形成辐合线(阵风锋),迫使暖湿气流抬升,不仅为弓形雷暴回波提供水汽输送,同时与阵风锋进行

的边界层辐合为新生雷暴提供抬升触发机制及暖湿空气,促使新生雷暴迅速组织发展。该雷暴发展的同时近地层伴有冷池 CP2(见图 10a₂,11:41),冷池强度逐渐增强,呈对称分布,由于上下层环境风场合成风速较小,有利于不稳定能量聚集,雷暴迅速组织加强,随后向东北方向移动。

此外,受 CP1 北侧出流边界和地形共同影响,

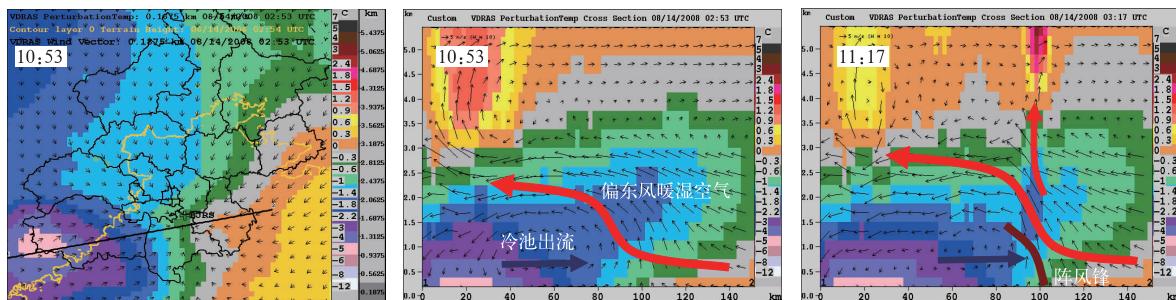


图 11 VDRAS 反演的 2008 年 8 月 14 日沿弓形回波出流方向做的扰动温度垂直剖面

Fig. 11 Retrieved perturbation temperature vertical section along the outflow direction of bow echo on 14 August 2008 from VDRAS

形成了另一条沿着 CP1 北侧边界由偏西风与偏北风汇合的东西向辐合线,并陆续在海淀、门头沟区有多个雷暴单体生成,但由于缺少暖湿气流的配合,不利于雷暴发展(图 8a₃,13:05)。同时,东部平谷地区受地形影响有一组新的对流组织生成并逐渐向西南城区方向发展传播,其伴有的冷池(CP3)与 CP2 对应的雷暴相向移动并逐渐靠近,在其出流交汇处有新的对流组织发展(见图 10a₄,13:05 时)。此外,从图 10b 不同时刻 562.5 m 高度的垂直速度场分布来看,低层冷池出流前沿辐合区的高层有上升运动大值区相对应,即该物理量能够很好指示出新生对流单体的位置。

4.2 “824”干雷暴(线状对流系统)

根据雷暴发展与冷池和阵风锋之间关系的概念模型^[3-4],扰动温度梯度可以指示阵风锋的相对位置和强弱。00:53 时,西北方向移入的线状对流系统南端与西部边缘受地形影响生成的弓形回波在延庆连接,形成一条南北向的新线状对流系统,移入北京呈下山减弱趋势。从图 12a 可见,对应的冷池强度较强(扰动温度为 -8 ℃),其前沿有一条南北走向的带状扰动温度梯度大值区(图 12b),即阵风锋位置。由于冷池出流前方为一致的西北偏北气流,没有偏东风暖湿气流与之汇合形成辐合线,故阵风锋

快速东移减弱,逐渐远离雷暴主体。此外,冷池出流边界与出流西北风矢量夹角较小,东侧边界与气流基本平行,夹角几乎趋于零。上述现象说明,线状对流系统进入北京前(23:23 时),由于降水已经释放大量能量,尽管冷池中心温度较“814”偏低,但冷池呈非对称分布,其边界无明显出流,也不存在与之交汇的辐合,低层无中尺度抬升机制,加之环境风场无明显的垂直风切变,故不利于系统发展增强。沿线状对流系统移动方向做垂直剖面,如图 13 所示,北京西北边缘移入的线状对流系统冷池出流前沿没有明显的偏东风暖湿气流,低层辐合抬升很弱,缺少动力抬升机制和暖湿空气输送,不利于雷暴新生,系统减弱消散。至 01:35 时,雷达观测显示该线状对流系统结构解体,回波强度迅速减弱,尽管受后侧北风入流作用影响,冷池强度较强,但由于低层空气较干,不利于降水产生。图 12c 上的垂直速度场呈零散的分布,显然无强的上升气流相配合。

5 概念模型讨论

综合以上分析结果,对两次过程冷池触发新生雷暴的概念模型进行初步探讨,如图 14 所示。

“814”雷暴群的触发机制主要是由冷池出流与环境场低层偏东风形成的辐合线所致。低层偏东风

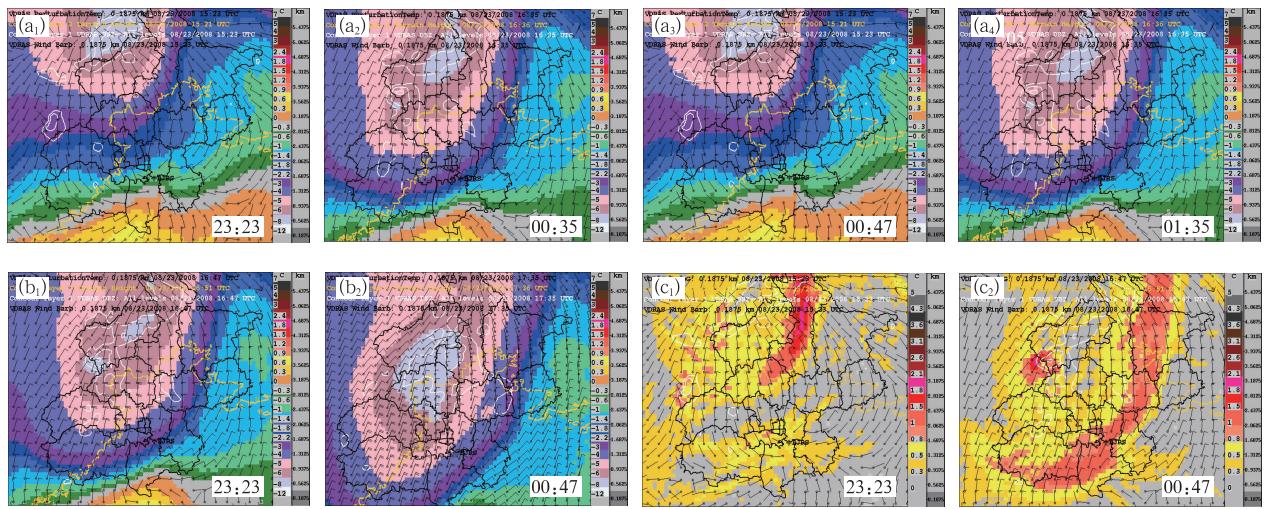


图 12 VDRAS 反演的 2008 年 8 月 24 日 (a) 在低层 187.5 m 的扰动温度, (b) 在低层 187.5 m 的扰动温度梯度, (c) 在低层 562.5 m 的垂直速度
叠加的风矢量为反演的水平风场, 橙色实线为 100 m 高度地形
白色等值线为大于等于 25 dBz 的雷达组合反射率因子回波, 间隔为 10 dBz

Fig. 12 Retrieved (a) perturbation temperature at 187.5 m height, (b) time increment of perturbation temperature at 187.5 m height, (c) low-level vertical velocity at 562.5 m height on 24 August 2008 from VDRAS
Retrieved horizontal wind is drawn as wind barb, orange solid line is terrain for 100 m height. Radar reflectivity
is drawn as white contours with minimum of 25 dBz and interval of 10 dBz

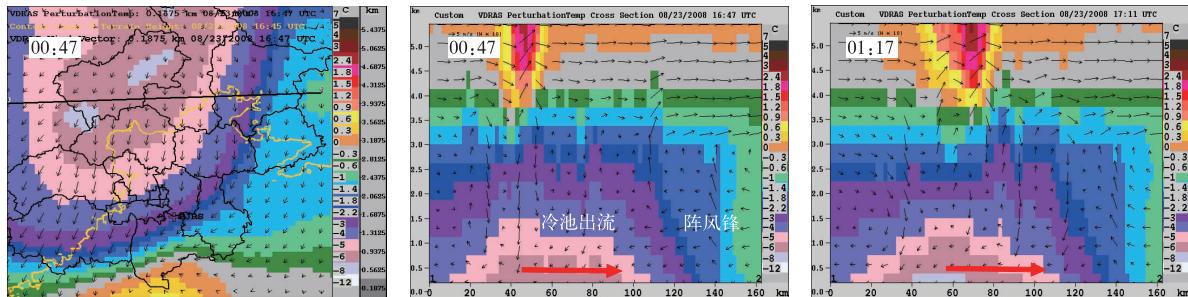


图 13 VDRAS 反演的 2008 年 8 月 24 日沿线状对流系统移动方向做的扰动温度垂直剖面

Fig. 13 Retrieved perturbation temperature vertical section along the moving direction of linear convective system on 24 August 2008 from VDRAS

的作用可概括为三个方面:(1) 向成熟雷暴提供水汽输送,(2) 与阵风锋进行边界层辐合, 为新生雷暴提供抬升触发机制,(3) 为新生雷暴提供暖湿空气流入, 促进新生雷暴迅速发展。另外, 整层水平风垂直切变较强, 有利于强雷暴形成和发展, 层结曲线在对流层低层接近饱和, 呈现“上干下湿”的显著特征, 有利于强降水发生。

“824”则相反, 成熟雷暴阵风锋前方没有偏东风暖湿气流配合, 新生雷暴缺少抬升触发机制和低层暖湿入流, 难以生成和发展。可见, 对流层低层偏东风暖湿气流对雷暴的新生和组织化发展有十分重要的作用, 这一点从理论上印证了北京预报员的经验。

此外, 环境场垂直风切变较小, 不利于强雷暴发展, 层结曲线低层非常干燥, 不利于降水产生。

6 结 论

利用 VDRAS 并结合多种非常规探测资料对两次雷暴过程形成机制进行较深入的对比分析, 结果发现两次过程具有明显不同:

(1) 影响“814”的天气系统, 主要是高层稳定的 500 hPa 东北冷涡槽和与之配合的低层 850 hPa 较弱的切变线, 850 hPa 以下整层空气湿润, 北京位于比湿值大于 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和地面相对湿度大于 90%

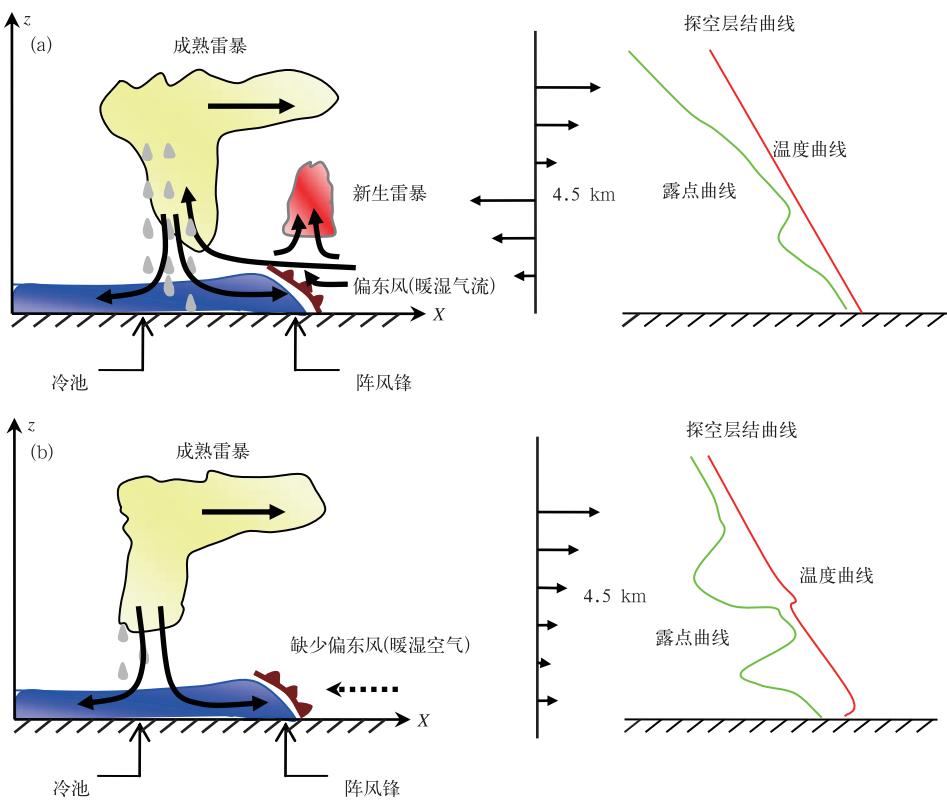


图 14 “814”湿雷暴(a)和“824”干雷暴(b)形成的概念模型

Fig. 14 Conceptual models of thunderstorm genesis for case 814 moist thunderstorm (a) and case 824 dry thunderstorm (b), respectively

的湿舌区,中低层具有由湿度差动平流引起的对流不稳定。而“824”高层盛行平直的偏西风,低层有反气旋,地面有冷锋快速过境,850 hPa 以下整层空气干燥,北京处于比湿小于 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和相对湿度小于 30% 区,中低层具有由温度差动平流引起的对流不稳定。

(2) “814”北京上空存在较强的整层垂直风切变,500~5000 m 风向随高度顺转,增强了低层暖湿入流,有利于雷暴迅速组织发展,整层合成风小,雷暴移速慢。探空层结曲线呈“漏斗”型,有利于降水产生,具有较强的热力不稳定能量。“824”则相反,垂直风切变弱,没有明显的低层暖湿入流,不利于雷暴组织加强,整层合成风大,促使对流系统快速东移。探空层结曲线呈“倒 V”型,不利于降水产生,低层干暖盖的存在为形成雷暴所需能量积累及爆发式释放提供了重要条件。

(3) “814”是一次多单体雷暴相互影响,并相继碰撞合并的湿雷暴群事件。上游雷暴降水产生的冷池出流与前方低层偏东风暖湿气流形成辐合线,迫使暖湿气流抬升,加上强热力不稳定和垂直风切变

条件的配合,有利于新对流单体产生,而多个雷暴冷池出流形成的阵风锋之间的相互碰撞,进一步加剧了这种不稳定,导致冷池之间雷暴新生或加强;“824”是一次伴随冷锋的线状对流系统快速东移过程,上游雷暴冷池出流的阵风锋前沿没有明显的偏东风暖湿气流配合,缺少中尺度辐合线抬升触发机制和暖湿入流,新生雷暴难以生成和发展。

通过以上分析可见,VDRAS 能够反演出边界层中冷池、阵风锋、辐合辐散等演变特征,对于雷暴新生有较强的指示意义,其反演结果也揭示了对流层低层偏东风暖湿气流对雷暴新生和组织化发展的重要作用,其反演的热力和动力场的变化趋势和系统位置较合理,但定量应用还有一定偏差,需在今后研究工作要进一步改进。此外,由于本论文仅限于两个例子的对比分析,所得出的结论是否具有普遍性,还有待进一步深入研究和探讨。

参考文献

- [1] Newton. Structure and mechanism of the prefrontal squall line [J]. Journal of Meteorology, 1950, 7: 210-221.

- [2] Rotunno, Klemp and Weisman. A theory for strong long-lived squall lines [J]. *J the Atmos Sci*, 1998, 45(3):463-485.
- [3] Fovell R G, Dailey P S. The temporal behavior of numerically simulated multicell-type storms. Part I: Modes of behavior [J]. *J Atmos Sci*, 1995, 52(11): 2073-2095.
- [4] Fovell R G, Tan P H. The temporal behavior of numerically simulated multicell-type storms. Part II: The Convective Cell Life Cycle and Cell Regeneration [J]. *Mon Wea Rev*, 1998, 126(3): 551-577.
- [5] 廖晓农,王华,石增云,等.北京地区雷暴大风日 θ_e 平均廓线特征[J].*气象*,2004,30(11): 352-37.
- [6] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].*气象学报*,2004,62(3):317-328.
- [7] 邵玲玲,孙婷,邬锐,等.多普勒天气雷达中气旋产品在强风预报中的应用[J].*气象*,2005,31(9):34-38.
- [8] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:47-61,109-116.
- [9] 俞小鼎.强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[G].新一代天气雷达业务应用.北京:气象出版社,2008:1-13.
- [10] Park S K, Zupanski D. Four-dimensional variational data assimilation for meso-scale and storm-scale applications[J]. *Meteor Atmos Phys*, 2003, 82:173-208.
- [11] Sun J. Convective-scale assimilation of radar data: Progress and challenges [J]. *Q J R Meteor Soc*, 2005, 131:3439-3463.
- [12] Sun J, Flicker D W, Lilly D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data [J]. *J Atmos Sci*, 1991, 48(6): 876-890.
- [13] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint: I. model development and simulated data experiments [J]. *J Atmos Sci*, 1997, 54(12): 1642-1661.
- [14] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint: II. Retrieval experiments of an observed Florida convective storm [J]. *J Atmos Sci*, 1998, 55(5): 835-852.
- [15] Sun J, Crook N A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data [J]. *Wea Forecast*, 2001, 16(1): 117-132.
- [16] 李向红,唐熠,郑传新,等.一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J].*气象*,2010,36(8):61-71.
- [17] 王国荣,卞素芬,王令,等.用地面加密自动观测资料对北京地区一次飑线过程的分析[J].*气象*,2010,36(6):59-65.
- [18] 郭虎,王令,时少英,等.国庆 60 周年演练中一次降水过程的短时预报服务[J].*气象*,2010,36(10):21-28.
- [19] 雷蕾.2008 年 7 月 4 日北京一次大暴雨过程的强对流分析[J].*气象*,2008,34:100-104.
- [20] 廖晓农,于波,卢丽华.北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J].*气象*,2009,35(9):18-28.
- [21] 陶岚,戴建华,陈雷,等.一次雷暴冷出流中新生强脉冲风暴的分析[J].*气象*,2009,35(3):29-35.
- [22] Sun J, Chen M X, Wang Y C. A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 forecast demonstration project [J]. Submitted to *Wea Forecast*, 2009.
- [23] 陈明轩,王迎春,高峰,等.基于雷达资料 4DVar 的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析[J].*气象学报*,2010,待刊.
- [24] 刘红燕,李炬,曹晓彦,等.遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计测量结果分析[J].*遥感技术与应用*,2007,22(2):225-226.
- [25] 魏东,孙继松,雷蕾,等.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[J].*气候与环境研究*,2010,待刊.
- [26] Crook N A. Sensitivity of moist convection forced by boundary layer processes to low-level thermodynamic fields[J]. *Mon Wea Rev*, 1996, 124:1768-1785.
- [27] 陆汉城.中尺度天气原理和预报[M].北京:气象出版社,2004, 2:258-259;44-45;53-60.
- [28] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理与方法[M].北京:气象出版社,2000:400-425.