

孙靖, 王建捷. 北京地区一次引发强降水的中尺度对流系统的组织发展特征及成因探讨[J]. 气象, 2010, 36(12): 19-27.

北京地区一次引发强降水的中尺度对流系统的组织发展特征及成因探讨^{* 1}

孙 靖¹ 王建捷²

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 北京市气象局, 北京 100089

提 要: 2008 年 8 月 10 日白天到夜间, 北京地区发生了全市性强降水, 其中 10 日下午 15:00—18:00 经过城区的三个 β 中尺度对流单体不但产生强的降水(局地达到 45 mm/h 和 12 mm/5 min 的雨强), 还出现了明显的组织化发展的迹象。利用北京地区多种高时空观测数据(包括地面自动站、多普勒雷达、风廓线、微波辐射计等)和雷达变分同化分析系统(VDRAS)的高分辨率分析场资料, 重点分析研究了这三个对流单体组织发展的特征和成因。结果显示:(1)10 日下午城区的短时暴雨与大范围降水云系前部(北京城区南部到房山东部)近地面层 β 中尺度切变线的产生直接相关, 该切变线触发了对流, 使对流单体组织化发展成为准南北向排列的 β 中尺度线状对流系统影响了城区;(2)降水发生前 2 小时左右, 北京本站边界层环境风风向由西南向偏东的转变以及城区局地对流有效位能的短时快速积累, 是城区对流得以发展的关键局地环境因素;(3)10 日下午北京西北部山区的层状降水系统的低层(500 m 以下)形成的西北冷性水平出流与北京东南部低层东南暖平流在城南一带汇合形成的风切变是导致对流单体移进北京后组织化和进一步发展的直接原因。因此, 在有利的大尺度环流背景下, 对于北京大范围降水而言, 预报中需特别注意降水云系移动的近前方、边界层环境风风向的变化(即偏东风的出现), 因为大范围降水发生后近地面层所形成的水平出流, 可能与其前部偏东环境风构成明显风切变而激发对流的产生和组织化。

关键词: 中尺度对流系统, 组织化发展, 成因分析

Investigation on Systematic Development of Mesoscale Convective Systems in a Torrential Rain Event over Beijing

SUN Jing¹ WANG Jianjie²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

Abstract: There was a torrential rain occurring in Beijing during 15:00—18:00 BT 10 August 2008, and it was the afternoon of that day there were three meso- β convective cells that moved to city of Beijing, generated heavy rainfall (can be 45 mm/h and 12 mm/5 min) and had an obvious organizational development. Many high spatial-temporal resolution data, such as auto-weather station (AWS) network data, Doppler radar data, wind profile data and variational Doppler radar analysis system (VDRAS), are used to analyze the organizational development of the mesoscale convective system in this case. It is revealed that: (1) the cause for the organizational development of three convective cells in the afternoon is about the appearance of meso- β shear which was in the front of stratified precipitation system; (2) there are obvious changes before starting to rain in main urban areas of Beijing, such as accumulation of CAPE, and environmental wind whose direction changed from south to east; (3) the casue for the organizational development of the three convec-

* 科技部《北京奥运短临时临近预报实时业务系统研发》(2005BA904B05)和北京市科委《城市突发气象灾害风险防范与快速响应关键技术研究》(Z090506016609001)资助

2010 年 4 月 29 日收稿; 2010 年 6 月 21 日收修定稿

第一作者: 孙靖, 主要从事中尺度暴雨研究工作. Email: sunjinglinger@gmail.com

tive cells is due to the shear generated by the conflict between the northwest cold horizontal flow from stratified rain system and the southeast warm horizontal flow beneath 500 m. Therefore, at the advantaged large-scale background, with regard to the weather forecast of large-scale rain event, one of the key places is in the front of stratified precipitation system, where conflict between the cold horizontal flow and the environmental wind before the system maybe triggers the organizational development of convective system.

Key words: mesoscale convective system, organizational development, causes for organizational development

引言

北京地处华北,是我国首都和世界闻名的超大城市,三面环山、地形比较复杂,最近十多年北京城市发展又相当迅速,强降水对城市运行的影响更加突显。所以,北京地区的强降水问题一直以来备受关注,尤其是近年来,对北京暴雨的研究涉及面更加广泛,不仅有降水日变化特征的细致研究,也有关于地形、城市边界层,以及城市热岛对当地降水的作用和影响的探讨^[1-11]。然而,对直接造成北京强降水的中尺度对流系统的演变特征、发展规律和机理等的研究仍比较薄弱、认识还不足。近年来,在北京社会经济发展和重大活动等的需求牵引下,北京地区高时空分辨率气象观测网综合探测能力和资料处理与分析能力显著提升,为研究北京暴雨提供了便利条件。

2008年8月10日北京发生了一次全市性强降水过程,当时正值奥运会大规模室外赛事开赛,赛场基本上都分布在城区(五环路以内),降水过程对赛事、城市交通和市民的生活等产生了较大的影响。在持续一天的降水过程中,北京城区间杂着稳定性降雨和对流单体快速组织化发展引发的对流性强降水。指导赛事有效地避开短时强降雨是当天的气象服务关键,而这恰恰是预报的难点和预报误差之处,因为它需要准确把握对流发生的地点和时间以及对流的快速发展和演变趋势。本文借助奥运期间北京加密的观测资料和雷达变分同化分析系统(VDRAS)的分析资料^[12],找出造成当日下午城区强降水过程的中尺度系统,并对其组织化发展成因进行了探讨,期望为北京市的暴雨预报提供有益的线索。

1 雨情和环流形势

1.1 降水特点

10日北京城区受降水过程影响的时间比较长,可达24小时,其中降水有间歇。这一时间段,北京

绝大部分地区累积降水量达50 mm以上(图略),暴雨区总体呈东北—西南向,暴雨中心分别在西南山区、城区和东北部山前地带。

尽管当天降水时间较长,但是城区降水主要发生在14:00之后到前半夜,在14:00—23:00这一时段里,基本上全市都出现了20 mm以上的降水,其中雨量大于45 mm的降水(图1)则主要分布在城区附近,西南山区和东北部山前地带也有若干强的降水点,但都没有前者集中,由此可以看出这一时期的降水主要发生在城区及其附近,其中车道沟一带(北京市气象局附近)是强降水的中心之一,雨量达66 mm。

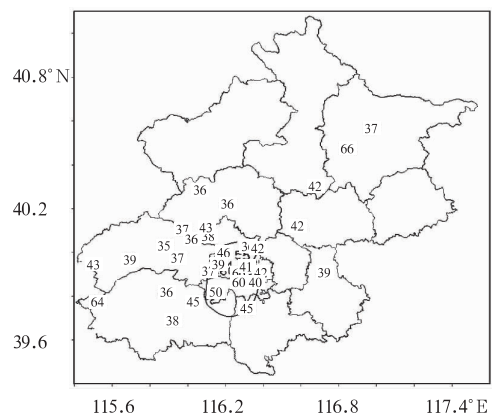


图1 2008年8月10日14:00—23:00 (≥ 35 mm)的北京市降水分布(单位: mm)

Fig. 1 The accumulative precipitation (units: mm) of Beijing from 14:00 to 23:00 BT

从车道沟的小时降水时间序列图(图2a)可以看到,车道沟的降水分为两个明显的不同阶段,主要降水发生在午后到前半夜,这与图1所反映的城区降水主要发生在14:00—23:00的特征是一致的。车道沟10日8:00—15:00,降水表现为强度弱、强度变化不大的稳定性降水特征;而15:00—23:00,降水则表现出强度变化显著、短时雨强大等对流性降水特点,如在16:00—17:00雨强最强,达到45 mm/h,3个小时之后,雨强再次达到30 mm/h左

右。车道沟 5 分钟雨强时间序列图(图 2b)显示,在对流最活跃、降水最强的一个多小时里,雨强随时间其实也是有变化的,5 分钟雨强一般都在 5 mm 以上、最大达到 12 mm,10 mm 以上的 5 分钟雨强仅维持了 10 分钟。观测的小时雨强和 5 分钟雨强在时间序列上呈现出的不均匀特征表明,在 8 月 10 日

北京大范围降水过程中,城区主要降水阶段里,存在着中尺度甚至小尺度强对流系统的活动,且傍晚城区降水的对流特征相对最强,其中 15:00—18:00 之间是对流系统最活跃的时段。本文拟捕捉、分析和认识的,正是对流最活跃时段里影响城区暴雨的中尺度对流系统。

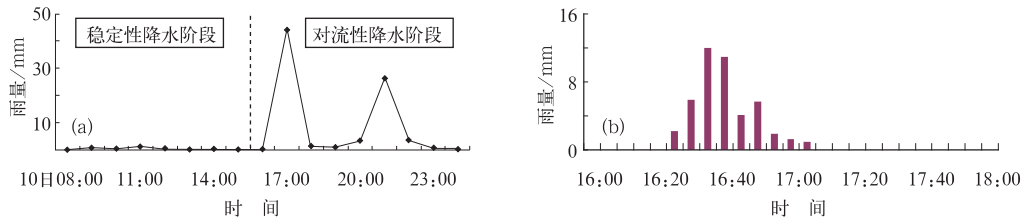


图 2 海淀车道沟 8 月 10 日 08:00—23:00 的小时降水时间序列图(a)

和同日 16:00—18:00 的 5 分钟雨强时间序列图(b)

Fig. 2 Time series plots of precipitation every hour during 08:00 to 23:00 BT (a) and every 5-min during 16:00 to 18:00 BT (b) at Chedaogou, Haidian District, Beijing

1.2 大尺度背景介绍

通过对当天大尺度环流背景的分析可以知道,10 日当天北京大范围的大到暴雨过程是在对流层中低层比较深厚的河套低槽系统与对流层高层急流构成有利配置,冷暖空气在华北交汇的条件下发生的,不仅受到对流层中低层河套低槽和地面辐合区系统性的动力抬升作用,同时受到有利的对流层高层辐散的强迫作用。这种配置下,中低层大尺度动

力抬升与高层强辐散呈现出垂直耦合状态,有利于大范围上升运动的持续发展。特别是随着时间的推移,城区一带低空的对流不稳定性逐渐加大(图 3),这是下午的降水对流性比上午更强的原因之一。同时还有着丰富和持续的水汽供应条件,这些都构成了 10 日北京大范围强降水的有利大尺度环流背景条件。因此,10 日降水的雨量持续时间长、雨量大也就不足为奇了。下面对 10 日下午城区强降水过程的雷达回波特征进行进一步分析。

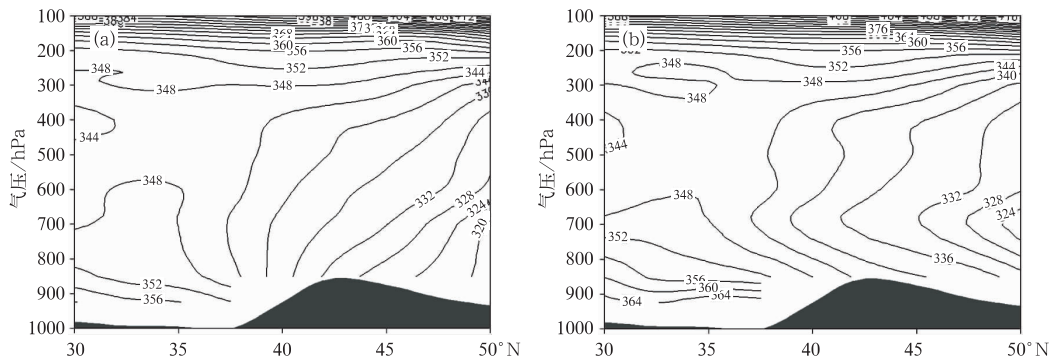


图 3 8 月 10 日 08:00 和 14:00 沿 115°E 的假相当位温(θ_w)剖面图(单位:K)

Fig. 3 Cross sections of pseudo-equivalent potential temperature along 115°E at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) on 10 August 2008 (unit: K)

2 城区强降水的雷达回波特征

从北京、天津、石家庄和张北 4 部雷达拼图的组合反射率因子 CR 的分析可知,8 月 10 日 08:00—

14:00,河北西部到北京的中西部存在着大片以层状云为主的回波,回波比较均匀、缓慢东移,强度一般在 35 dBz 以下、部分介于 35~40 dBz,这是河套槽前大范围降水云系在雷达上的反映(见图 4a)。

14:18 左右(图 4b),在大范围降水云系前部,北

京房山东南部和河北交界处开始生成了一些分布不规则的 γ 中尺度小对流单体, 半小时里, 这些小的单体回波尺度和强度都有些加大, 并在 14:54 左右开始呈现出南北向排列的迹象(图略), 之后的时间里, 对流单体这种准南北向排列的组织化发展变得清楚起来, 在大范围降水云系前部构成了一条 β 中尺度对流单体发展线(图 5a), 线上排列着 3 个比较清楚的对流单体(图中分别记为 A, B, C), 该线状中尺度对流系统随着整个云系向东略偏北方向移动。

在 15:30—17:30 的两个小时里, 这个 β 中尺度线状对流系统上的对流单体经历了组织化快速发展、成熟和减弱的演变过程, 但 3 个对流单体的演变过程在时间上并不是完全同步的。A 单体最先达到成熟, 依次是 B 和 C, 似乎呈现“右向”(对流线和对流单体前进方向右侧)发展演变的特征, 这从先后不同时间次的雷达组合反射率因子观测中可以得到比较清楚的支持证据(图 5a, 5b)。16:54 左右, 对流单体 A 和 B 发生了合并之后减弱, 合并后的单体 AB 和单体 C 继续向东北方向移动, 17:30 左右完全移出城区并明显减弱(图略)。

过成熟阶段的对流单体 A 沿单体移动方向作雷达反射率因子垂直剖面, 进行分析可以发现(图 6a), 在成熟阶段 A 单体最强回波达到 55 dBz, 45 dBz 垂直厚度从地面一直伸到 6 km 高度, 35 dBz 最高达到 8 km 左右, 说明对流发展还是相当深厚的。从回波结构上不难看出, 回波由西南向东北倾斜发展, 在对流单体的东北一侧(图中右侧)、回波顶的下面, 即低层有弱回波区, 形成了一定的回波空穹结构, 这是比较典型的强对流单体发展状况的雷达回波特征。由此看出此时单体 A 达到了强对流单体的标准^[13]。这时单体 A 正好到达海淀区, 在它移过海淀区的时候, 地面产生了 5 分钟 12 mm 的雨强(见图 2b)。

沿 β 中尺度线状对流系统, 3 个对流单体作雷达反射率因子垂直剖面(图 6b)可以看到, 从 16:24 到 16:42, 单体 A 已从成熟进入减弱阶段, 单体 B 达到成熟, 单体 C 正处于发展旺盛期。虽然此时单体 C 因过于靠近雷达本站, 无法得到较高层次的回波情况, 但从图 6b 仍然可以大致看出 C 的强度是三个单体里发展最强烈的。由此看出, 每 6 分钟的雷达观测可以捕捉到 β 中尺度对流线上 A、B、C 单体发展过程在时间上的不同步和发展演变上的“右向”特征, 尽管这种特征是发生在 1 个多小时的短时间里。

8 月 10 日下午, 北京大部分地区是层状云降水为主, 但城区受 β 中尺度对流线系统的影响, 发生了

明显的对流性降水。根据上述关于雷达回波观测特征的分析, 这里将影响城区的 β 中尺度对流线及其上单体的发展演变动态概括如图 7 所示。由图 7 看出, 8 月 10 日影响城区暴雨的对流单体, 先期在房山东部组织化, 构成 β 中尺度对流线系统, 该系统向东北方向移动发展经过城区后减弱, 前后两个多小时; 对流线上的单体随对流线亦向东北方向移动, 虽然对流单体 C 的强度在 15:00 左右比 A 和 B 强, 但是在随后的 1 个小时里, 其强度没有太大的变化, 反而后两者先后发展起来, 直到 16:00 后 C 才开始发展, 因此总体上看, 这三个对流单体略呈“右向”(在对流线移动方向右侧)顺序发展演变的特征, 16:30 前后在移经城区时组织化发展最为旺盛。

3 对流发展的条件和组织化的成因探讨

从上节分析可以知道, 8 月 10 日下午北京城区的暴雨是由大范围稳定性降水云系前部对流单体组织化发展成线状 β 中尺度对流系统影响所致。本节将通过高时间或空间分辨率观测资料就对流发展的条件和导致对流单体组织化发展的主要原因作一些探讨。

3.1 本站低层风场条件

从观象台的风廓线资料的分析中发现, 在城区强降水发生前 2~3 小时, 低层风场开始发生变化、朝着有利于对流发展的方向转变(图 8)。如: 14:00 之前, 3 km 以下是一致的偏南风, 0~3 km 内风向和风速垂直切变都很小, 本站低层没有什么冷或暖平流。14:00 之后, 1.5 km 以下风向开始发生变化(1.5 km 以上水平风是少变的), 由偏南风转为偏东风, 一方面使得 0~3 km 层次内风的垂直切变加大, 这种环境风的变化使本站低层风的垂直切变结构变成比较典型的有利于对流发展的结构^[14]; 另一方面此时低层出现偏东风有利于水汽向本站的输送(图略), 并且风向随高度顺转, 表明北京本站低层(主要在 500~1500 m 层次里)有暖平流发展, 低层增暖增湿显然对本站大气层结对流不稳定性加强是非常有利的。这种有利的本站低层风场结构持续到 17:00 左右, 即 β 中尺度对流线及其上对流单体减弱, 城区强降水基本结束的时间。另外, 3~5 km 高度环境风为南风或南西南风, 在这样的引导气流下, 10 日的 β 中尺度对流线系统和其上对流单体由西南向东北移动也就不难理解了。

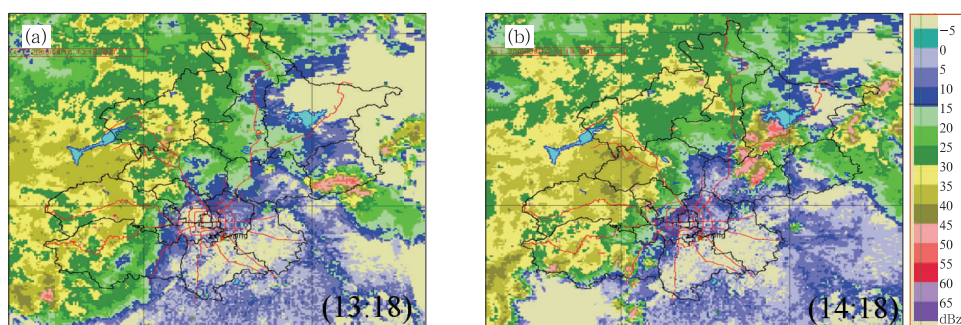


图 4 2008 年 8 月 10 日 13:18(a)和 14:18(b)北京雷达 CR 拼图
Fig. 4 Radar combined reflectivity images of Beijing at 13:18 BT (a)
and 14:18 BT (b) on 10 August 2008

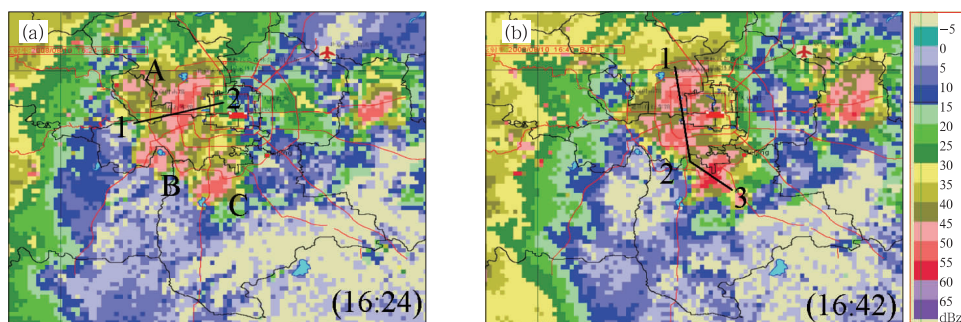


图 5 2008 年 8 月 10 日 16:24(a)和 16:42(b)北京城区雷达 CR 拼图
Fig. 5 Radar combined reflectivity images of Beijing at 16:24 BT (a)
and 16:42 BT (b) on 10 August 2008

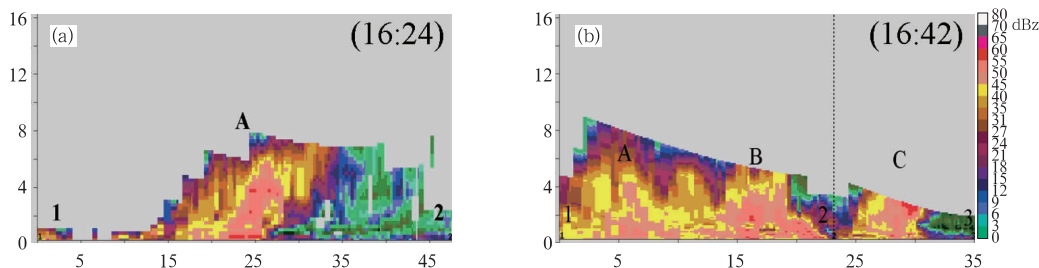


图 6 2008 年 8 月 10 日 16:24(a)和 16:42(b)对流单体回波剖面图(阴影为
雷达回波强度,单位:dBz,剖面位置见图 5)

Fig. 6 Cross sections of radar reflectivity of Beijing at 16:24 BT (a)
and 16:42 BT (b) on 10 August 2008

上述分析显示,北京本站低层风在 8 月 10 日 14:00 前后的变化,即:0~3 km 风垂直切变的加大和 1.5 km 以下偏东风的出现是 10 日下午城区对流得以发展的又一个重要原因。

3.2 对流单体的组织化发展成因

分析北京地区每 5 分钟间隔的地面风场观测资料,发现 8 月 10 日 13:00 以后,城南到房山东南部一带开始有风切变出现,13:25 左右形成一条清楚的长约 50 km,近乎南北向的 β 中尺度风切变线,

此后一个小时里,该风切变线少动维持,14:50 左右其北段略向西摆动(图 9),之后 β 中尺度风切变线开始向东北方向移向城区,15:20 其北段到达城区西部边缘,当北段移经城区后风切变变得就不明显了,南段依然可见,这可能是由于城区复杂下垫面状况的影响。与前面所作的回波分析(图 4)进行对比可知,14:18 左右北京房山东南部与河北交界处产生的一些小对流单体,正是发生在该 β 中尺度切变线南端附近,并很快沿着 β 中尺度切变线方向开始排列,15:24 小对流单体已组织发展为三个准南北

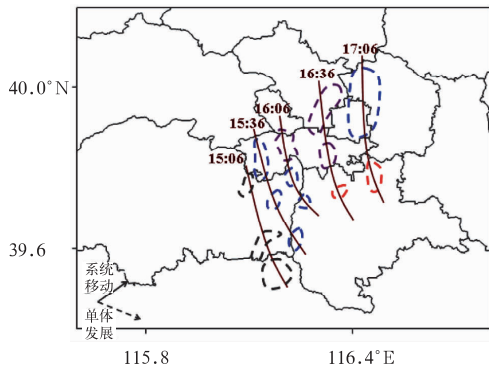


图 7 2008 年 8 月 10 日 15:06—17:06

对流单体发展演变动态示意图

棕色实线为对流线的位置,黑色、蓝色、紫色和红色虚线分别代表 35 dBz、45 dBz、50 dBz 和 55 dBz 等值线

Fig. 7 The development of convective cells during 15:06—17:06 BT 10 August 2008

the brown line represents the convective line; black, blue, purple and red ones represent respectively the isograms of 35 dBz, 45 dBz, 50 dBz and 55 dBz

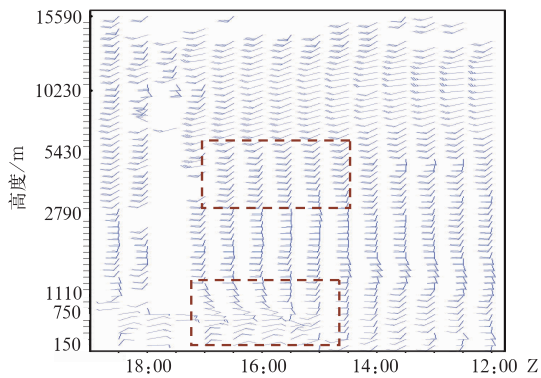


图 8 2008 年 8 月 10 日观象台风廓线

Fig. 8 Wind profiles at the Guanxiangtai Observatory

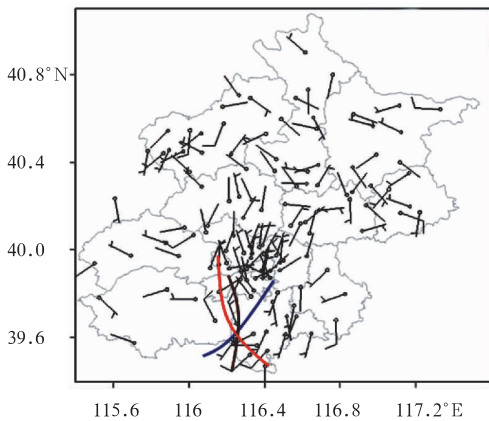


图 9 2008 年 8 月 10 日 13:25 北京地面

自动站风场观测

(其中蓝线、棕线和红线分别是 13:25、14:50 和 15:20 地面风切变线位置)

Fig. 9 Surface wind field of Beijing at 13:25 BT 10 August 2008

blue, brown and red lines represent surface shear lines respectively at 13:25, 14:50 and 15:20 BT

向排列的大对流单体,单体的排列方向与 β 中尺度切变线走向基本一致,并且之后进一步发展为明显的线状对流系统,其位置和移动与 β 中尺度切变线吻合。这些证据表明,在地面加密观测中看到的这个 β 中尺度切变线就是直接导致 10 日午后到傍晚城区发生暴雨的中尺度系统,它的生成早于对流单体的发生,不仅触发了对流的发生,而且使得对流单体组织化发展成为线状对流系统。

从上面的分析知道,城区降水发生前地面一条准南北向 β 中尺度切变线的出现是导致对流单体发展和组织化的原因。然而,这条中尺度切变线又是如何生成的呢? 本文利用北京市气象局的 VDRAS

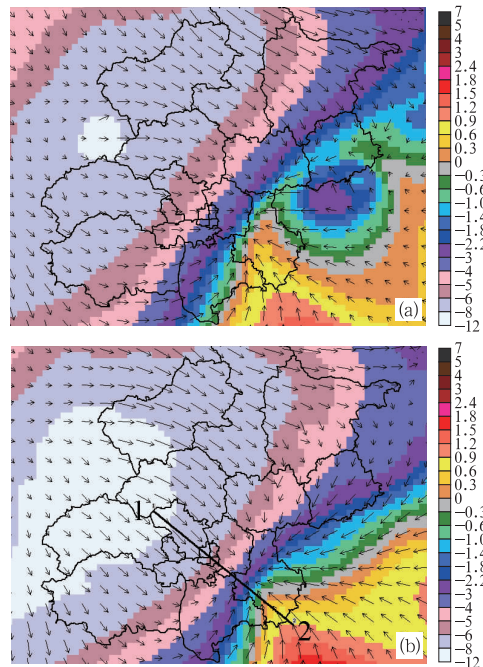


图 10 2008 年 8 月 10 日 13:12(a)和 14:24

(b)VDRAS 北京离地面 0.1875 km 的温度距平(阴影,单位: $^{\circ}\text{C}$)和风场

Fig. 10 Temperature anomaly (unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind field of Beijing at 0.1875 km above ground at 13:12 BT (a) and 14:24 BT (b) on 10 August 2008

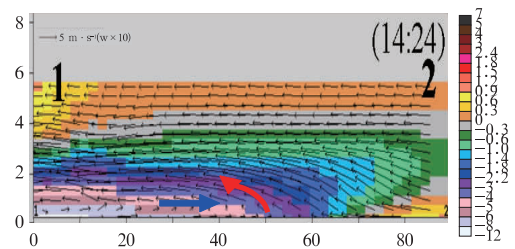


图 11 2008 年 8 月 10 日 14:24 温度距平(阴影,单位: $^{\circ}\text{C}$)和风场剖面图(剖面位置见图 1b)

Fig. 11 Cross section of temperature anomaly (unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind field at 14:24 in 10 August 2008

(多普勒雷达资料变分分析系统)^[14]提供的对流层低层高分辨风和扰动温度分析场资料来做进一步的分析 and 探讨。图 10a 是 13:12 北京区域 0.1875 km 温度扰动和风场的 VDRAS 分析场,与雷达回波对比(如图 4a)可以看出,此时北京还处于以层状云降水为主的时期,北京西部大范围降水云系所在处的近地面层存在着和雨带东北—西南走向一致,但并不很强的带状负变温扰动区,该负变温扰动区应该是雨滴从云底落至地面过程中因蒸发对环境温度冷却所致。负变温扰动区前部近地面层此时出现了由冷指向暖的西北冷性水平出流,北京中部平原一带正好位于出流的前方,西北冷出流与北京东部仍然存在的偏南环境风恰好在城南到房山与大兴交界处一带构成了风向变化比较清楚的狭窄风切变区,其位置和出现时间都与文章前面提到的地面 β 中尺度切变线(图 9)相吻合,这表明加密地面观测分析看到的 β 中尺度切变线极可能就是在这个狭窄的风切变区在地面图上的反映。之后随着西部雨带的东移靠近,负变温扰动和变温梯度都有所加大,进而西北水平出流亦有所加强(图 10b),另一方面北京本站低层环境风亦由西南向南或偏东南方向转变(图 8),这就使得在城区南部边界层内风的切变强度加强。

进一步分析显示,这一由大范围雨带前部西北冷出流和偏南环境风构成的狭窄风切变区,或者说 β 中尺度切变线主要存在于近地面 500 m 内,且风切变区低层存在上升运动(图 11),这对于对流在此的发生会产生触发作用。

由此看出,大范围降水云系移动的近前方,在适宜条件下可能会成为对流系统发展区。当降水发生后所形成的水平出流,恰好与其前部环境风构成明显切变或甚至有相向而来的环境风时,就有可能在近地面层内形成中尺度风切变或辐合,直接触发对流的发生发展或甚至使其组织化。因此,在预报中对大范围降水云系移动的近前方,低层风向的变化应予以重视。

3.3 局地 CAPE 的积累及对降水的指示性

对流有效位能(CAPE)不仅是对流能够发展的最重要的条件之一,它的变化还反映了大气内部对流不稳定性演变的特征。从 6 小时一次的北京气象台探空资料可知:10 日 14:00 和 20:00 两个时次 200 hPa 以下的 CAPE(分别为 $111.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $142.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,图略)似乎并不是强对流发展所应具有的量级。为了捕捉对流有效位能在短时间里的变化特征,这里选用于海淀车道沟和气象台(对流单体 A 和 C 恰好分别经过这两个地点)的两部微波辐射计数据^[15-16]对城区暴雨发生前局地对流有效位能的变化进行分析。因检验和大量应用中发现,微波辐射计观测误差在降水发生期间和结束后的短时间内明显增大,数据可信度降低,故这里主要应用微波辐射计观测来考察分析城区暴雨发生前 CAPE 的演变情况。

图 12 是基于上述两部微波辐射计温湿探测资料计算的 300 hPa 以下的总 CAPE 的时间序列和相应站点的雨强时间序列。从图 12a 中可以看到,在车道沟降水发生 2~3 个小时前,当地上空有着丰富的对流有效位能,14:30—15:10,CAPE 仍在缓慢增加,暗示对流有效位能还在积累,15:10 左右达到最大,为 $2130 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时距地面降水发生大约还有 1 小时。在这之后的 1 小时里,CAPE 值不断减小,到地面即将出现降水时(16:00 左右),CAPE 值降至 $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,这期间地面降水虽未形成,但 CAPE 值的减小表明对流已经开始发生,这一点与雷达回波观测吻合,回波显示此时单体 A 已向海淀靠近并发展(图 5a、图 7)。

气象台比车道沟降水发生时间晚几十分钟。图 12b 显示,在气象台降水发生前 3 小时,即 14:00 左右,其上空 CAPE 小于 $200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,但在随后的两个小时里对流有效位能迅速积累,16:00 左右 CAPE 值达到最大($2085 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),这时距气象台

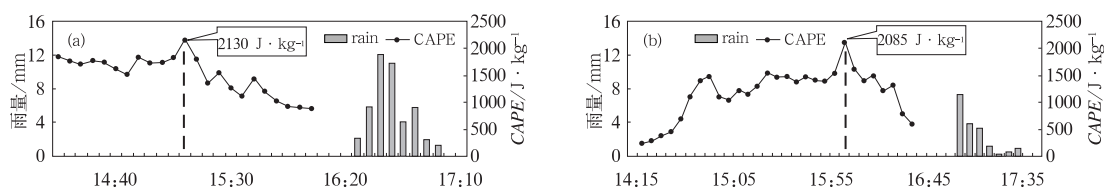


图 12 车道沟(a)和气象台(b)降水量及 300 hPa 以下对流有效位能时间序列图

Fig. 12 Time series plots of CAPE beneath 300 hPa at stations Chedaogou (a) and Guanxiangtai (b)

降水还有约 1 小时。和车道沟情况类似,从 CAPE 峰值到地面即将发生降水,观象台的 CAPE 值下降到 $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,所不同的是 CAPE 降幅越大,距降水发生时间越短(1 小时内),说明观象台上空对流发展过程更快一些,雷达回波观测到的 C 单体的特征亦可支持这一点(图 5a、b)。

由以上分析不难看出,在城区强降水发生前,局地对流有效位能有着短时间(2 小时左右)的快速积累或再积累,使城区产生了丰富的 CAPE($2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右),即形成了丰富的潜在对流不稳定能量,这样的特征从稀疏的探空资料中常常是难以被捕捉的。另外,上述分析也告诉我们,利用微波辐射计温湿探测资料进行 CAPE 诊断,有助于捕捉强对流发生前局地 CAPE 的积累和变化;CAPE 达到峰值后的释放是对流早期发生的信号,先于地面降水的出现,不失为一个对降水开始时间有指示意义的临近预报指标。

4 结 论

综上所述,经过对 10 日降水过程的分析可以得到以下结论:

(1) 10 日北京绝大部分地区 24 小时累积雨量在 50 mm 以上,到暴雨级别。其中,降水有明显的间歇性,下午和前半夜北京城区分别出现了短时暴雨,特别是 10 日下午观测到 45 mm/h 和 $12 \text{ mm}/5 \text{ min}$ 的雨强,城区为这一时期的暴雨中心之一,其降水表现出强度变化显著、短时雨强大等对流性降水特点,呈现出显著的中尺度(生命史)变化特征。

(2) 从雷达回波和加密地面观测分析可以看到,北京 10 日既有层状回波,又有对流回波。14:00 之前,北京主要以层状回波为主,主要位于西北部山区,呈西南—东北向,强度不大,多在 35 dBz 左右;14:00 之后,随着大范围降水回波的逼近,在其移动的近前方,地面 β 中尺度切变线南端(即北京房山东南部和河北交界处)生成了一些分布不规则的 γ 中尺度小对流单体,这些小单体沿着 β 中尺度切变线呈南北向组织化排列发展,形成了一条明显的线状对流系统,该系统靠近和移经城区期间,对流单体呈现出“右向”发展的现象。

(3) 诊断分析表明,地面 β 中尺度切变线是近地面层切变线在地面的表现。它的形成是由于,在城区暴雨发生前 2~3 个小时,随着北京西北部上游

大范围降水云系的逼近,降水产生的近地面(主要在 0.5 km 以下)冷性西北水平出流不断加强,与其移动前方边界层内的偏南环境风场在城区南部形成了比较明显的风的切变,切变线附近低层存在上升运动,触发并使对流单体组织化发展。这个近地面层的 β 中切变线系统正是对流单体不断加强并组织化的原因,也是导致 10 日下午城区短时暴雨的直接影响系统。由此看出,大范围降水云系移动的近前方,在适宜条件下可能会成为对流系统发展区,因此在预报中对此区域低层风向的变化应予特别关注。

(4) 利用北京地区高时间分辨率的微波辐射计和风廓线资料等,捕捉到 10 日下午城区发生降水前 1~2 个小时、当地上空 CAPE 的短时快速积累过程(300 hPa 以下最大可达 $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右)和城区一带 3 km 以下的环境风由西南风转为偏东风,低层垂直切变明显加强的现象。局地 CAPE 的快速积累和低层风的这一变化,是城区对流得以发展的关键环境条件,而这些重要的细节在已经加密了的 6 小时间隔探空观测中仍不能被有效捕捉。另外,CAPE 在积累到一定程度后会出现骤减,这一变化发生在降水开始前 1 个小时左右,因此,具有一定的预报意义。

当然,无论是大尺度层结的改变,低层风切变的加强,还是边界层内的风场的辐合都仅是 10 日下午影响城区的 3 个对流单体组织化发展的主要原因。在今后的工作中将对这 3 个单体从无序到有序期间它们之间的相互作用做更详细的讨论,对其组织化发展给出更多的解释。

致谢:感谢北京市气象局杨波、陈明轩为本文提供的资料及北京市气象局孙继松老师的悉心指导。

参考文献

- [1] 李健,宇如聪,王建捷. 北京市夏季降水的日变化特征[J]. 科学通报,2008,53(7): 829-832.
- [2] 张朝林,季崇萍,Ying-Hwa Kuo,等. 地形对“00.7”北京特大暴雨过程影响的数值研究[J]. 自然科学进展,2005,15(5): 572-578.
- [3] 矫梅燕,毕宝贵. 夏季北京地区强地形雨中尺度结构分析[J]. 气象,2005,31(6): 9-14.
- [4] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学,2005,29(3): 445-452.
- [5] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. 高原气象,2005,24(1): 62-68.
- [6] 丁青兰,王令,陈明轩,等. 近 12 年北京暖季对流天气的气候特征[J]. 暴雨灾害,2007,26(2): 144-148.

- [7] 孙继松,王华,王令,等. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学,2006,30(2):221-234.
- [8] 丁青兰,王令,陈明轩,等. 北京地区暖季对流天气的气候特征[J]. 气象,2007,33(10):37-44.
- [9] 王华,孙继松. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J]. 气象,2008,34(3):16-21.
- [10] 江晓燕,张朝林,高华,等. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响一个例分析[J]. 气象学报,2007,65(2):301-306.
- [11] 孙继松,舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. 大气科学,2007,31(2):311-320.
- [12] Sun J, M X Chen, Y C Wang. A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 Forecast Demonstration Project[J]. Weather and Forecasting, 2009,24(7).
- [13] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2007,7:94.
- [14] N. Andrew Crook, Sun Juazhen. Analysis and forecasting of the low-level wind during the sydney 2000 forecast demonstration project[J]. Weather and Forecasting,2004,19(1):151-167.
- [15] 刘红燕,王迎春,王京丽. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J]. 大气科学,2009.3,33(2):387-396.
- [16] 魏重,雷恒池,沈志来. 地基微波辐射计的雨天探测[J]. 应用气象学报,2001,S₁:65-72.

征稿简则

- 1 《气象》主要刊登气象科学研究领域的综合评述及研究论文;天气、气候诊断分析与预报技术;气象业务技术及业务现代化建设经验;气象灾害的规律及防灾减灾决策;公共气象服务和专业气象服务技术方法;气象科技信息动态等。
- 2 来稿注意事项
 - 2.1 来稿务必论点明确,数据可靠,文字精炼。文章的书写顺序为:中文题目(不超过 20 个汉字)、作者姓名、单位名称、邮政编码、中文提要(200~300 字)、关键词(3~8 个);英文题目、作者姓名、单位名称、邮政编码、英文提要及英文关键词;引言;正文;结论和讨论;致谢;参考文献。文章首页页脚处附作者信息,即姓名、从事专业工作和研究方向。Email 等。
 - 2.2 正文标题用阿拉伯数字连续编号,不同层次数字间用圆点间隔,如“1”,“1.2”,“2.1.3”等。标题左顶格,在数字编号后空一格再写标题,末尾不加标点符号。
 - 2.3 基金资助的研究项目,请注明省部级以上基金名称和项目编号。
 - 2.4 文稿的单位制采用《中华人民共和国法定计量单位》。图、表中量和单位间用“/”隔开,表示物理量的符号用斜体表示,并注意文种、大小写、正斜体、上下角码等。
 - 2.5 科技术语和名词应使用全国自然科学名词审定委员会公布的名词。
 - 2.6 文稿只附必要的图表。图、表要求准确,清晰,美观。在文中相应的位置插入图、表。图、表附相应的中英文图题、表题。附表请使用三线表。
 - 2.7 参考文献按在文内出现顺序连续编码。在期刊上发表的文献书写格式为:[序号]作者姓名(列出前 3 位).题名[J].期刊名,年,卷(期):页码。在专著、教科书上发表的文献书写次序为:[序号]作者姓名,译者姓名,文题名,书名[M].出版地:出版社,出版年:页码。
- 3 请勿一稿两投。本刊一般不退稿,若 6 个月内未见刊用通知,可自行处理。
- 4 本刊收取发表费,并付稿酬,所付稿酬包含纸质版、数字版稿酬和刊物内容网络服务报酬等。凡不同意将其稿件纳入此两种版本进行交流者,请书面说明。
- 5 通讯地址:北京市中关村南大街 46 号《气象》编辑部 邮政编码:100081
网上投稿地址: <http://219.234.83.5>
电话:(010)68407936 58993789 68407336 Email:qixiang@cams.cma.gov.cn