

魏东,杨波,孙继松.北京地区深秋季节一次对流性暴雨天气中尺度分析.暴雨灾害,2009,28(4):289-294.

北京地区深秋季节一次对流性暴雨天气中尺度分析

魏 东,杨 波,孙继松

(北京市气象台,北京 100089)

摘 要:使用加密自动站、微波辐射计和风廓线仪等探测资料,详细分析了深秋季节(2007年10月27日)发生在北京地区的一次强对流局地暴雨过程的天气系统结构特征,探讨系统的发生发展机制。分析表明,此次局地暴雨天气是在高空冷槽和地面冷锋系统相配合的有利的大尺度环流背景下,地形和热岛效应共同作用产生的中尺度系统造成的。前人对夏季暴雨的研究结果可以很好地解释此次秋季强对流天气的发生发展机理,低层偏东气流与北京西部山脉的相互作用使得气旋式涡度增加,产生中低层垂直风切变,使山脉迎风坡的降水增强。城市热岛形成的城区与郊区之间的水平温度梯度在迎风坡强迫产生的中尺度垂直切变是对流性局地强降水发生发展的重要条件。吹向迎风坡的风速与降水强度之间存在正反馈过程,这也是局地降水增强的可能因素。此次秋季过程主要是较强冷空气与较好的水汽条件配合造成,而夏季强对流过程则多是在高温高湿条件下弱冷空气入侵造成。

关键词:强对流;局地暴雨;中尺度分析

中图分类号:P458.1*21.1 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2009)04-0289-06

1 引言

北京地区夏季(6—8月)出现强对流天气的概率大、次数多。入秋以后,尤其是霜降节气(一般为10月23或24日)过后,北京已处于深秋时节,发生强对流天气的几率很小。但2007年10月27日凌晨和晚上,北京地区在24h内出现了两次对流性降水天气,这在深秋季节比较少见。历史资料显示:1951年以来,北京地区在10月25日之后雷电天气共有10次(包括此次)。这表明,虽然深秋季节的大气温湿环境和能量条件比夏季明显减弱,但强对流天气出现的可能性仍然存在,而且此时的强对流天气往往不像夏季那样被人关注,常造成对流天气的漏报。

目前关于对流天气的中尺度研究已有相当丰富的研究成果。如高守亭^[1]、寿绍文^[2]等对中尺度天气发生发展的机理进行了深入研究,总结了大量的理论研究成果。业务一线的预报员也就华北地区的暴雨天气做了大量分析工作^[3-4]。但大多数都是针对夏季的强对流天气,对秋季强对流天气的研究和分析甚少。

近年来随着越来越多的新型探测设备投入气象业务应用,这些高时空分辨率的新型探测数据(如风廓线雷达资料、微波辐射计资料、地基GPS数据等)为进一步分析中尺度系统的发生发展提供了新手段。刘淑媛等^[5]利用风廓线雷达资料分析了低空急流的脉动与暴雨的关系,表明风廓线资料可以揭示出西南季风

和行星边界层内与暴雨相联系的中尺度现象。张京英等^[6]利用新一代天气雷达风廓线资料和逐时雨量资料对比分析后发现,暴雨过程中雷达风廓线资料可以直观地显示西南气流风场的垂直结构。孙继松等^[7]使用加密自动站、多普勒雷达和风廓线仪等新型探测资料,结合理论推导,研究了城市边界层过程在北京一次强局地暴雨过程中的作用。郭虎等^[8]使用多种新型探测数据对北京夏季的一次强对流降水天气的中尺度系统特征做了精细分析。这些研究在一定程度上有效弥补了使用常规探测资料分析的不足,加强了对强对流天气的中尺度系统的认识,但利用这些新型探测数据研究秋季对流天气的工作不多。

本文在大尺度环流系统分析的基础上,使用多种新型探测资料,分析发生在深秋季节北京的一次强对流天气的中尺度系统,并结合前人对北京盛夏强对流降水天气的研究成果探讨秋季对流性强降水天气发生发展的可能机制。

2 天气实况

2007年10月27日凌晨5时(北京时,下同)左右,北京地区出现小雷阵雨。27日21时,北京地区再次出现较强雷电和局地强降雨。

闪电定位仪的监测结果显示,27日21时至21时30分,在北京门头沟区的东南部出现了较密集的闪电,21时30分至22时,闪电区东移至海淀区的西部

收稿日期:2009-05-01;定稿日期:2009-10-19

基金项目:国家公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY200706004)资助

作者简介:魏东,男,1980年生,工程师,从事天气预报与分析研究。E-mail: wei_dong888@163.com

(图略)。降水的主要时段为 27 日 20 时至 28 日 02 时,图 1 给出该时段降水量分布。由图可见,强降水主要位于海淀观测站附近,海淀、八大处和香山三个自动站降水量最大,分别为 67.7 mm、56 mm 和 45 mm。自动站逐时雨量变化显示(图 2),这三站降水自 21 时开始,21:00 至 22:00 的小时雨强最大。

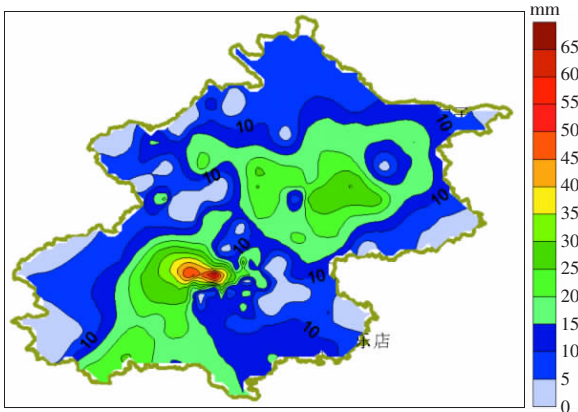


图 1 2007 年 10 月 27 日 20 时至 28 日 02 时北京地区自动站降水量分布图(单位:mm)

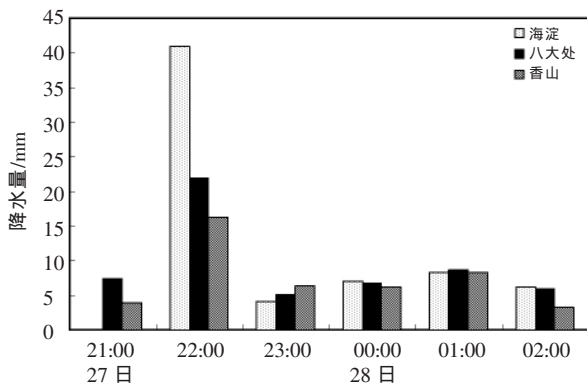


图 2 2007 年 10 月 27 日 20 时至 28 日 02 时降水量最大的三个自动站逐时雨量图(单位:mm)

3 大尺度环流背景

图 3 给出 10 月 27 日 20 时高空 200 hPa、500 hPa、850 hPa 高度场及温度场形势和地面环流形势。200 hPa 层,高空急流位于新疆至黄河下游一带,北京处于高空急流出口区左侧的辐散区中。对流层中层(500 hPa),河套和东北地区各存在一低槽,有对应的冷温度槽与

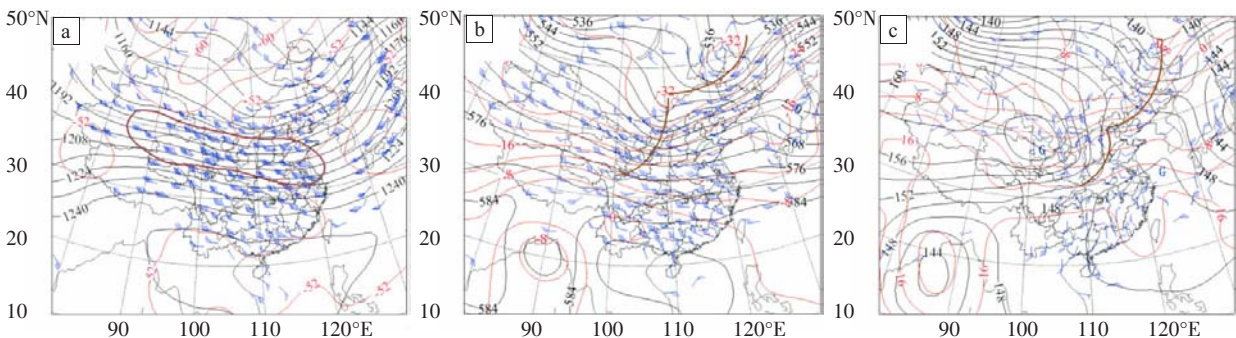


图 3 2007 年 10 月 27 日 20 时高空 200 hPa (a)、500 hPa (b)、850 hPa (c)等压面环流形势图

其配合。对流层低层(700 hPa (图略)和 850 hPa)也存在两支相应的高度槽和温度槽,不同的是 850 hPa 温度场上河北上空存在一个浅的暖脊。

从 27 日 20 时的海平面气压场上(图 4a)可见,新疆至河套西部为冷高压控制,高压中心的气压值超过 1 035 hPa。存在两条冷锋锋面,一条位于黑龙江东部至河北北部,另一条从河北西部至陕西南部地区,这两支锋面与高空的两支低槽相对应。此时,北京及河北南部处于地面倒槽辐合系统中,为暖区。与两条锋面对应存在两条降水带。到 28 日 02 时(图 4b),两条冷锋锋面和冷高压东移南压,原来位于东北的锋面扫过北京到达 41°N 以南,随着冷高压的南压,倒槽填塞减弱,北京地区转受冷高压控制。在锋面移动的过程中,北京出现了明显降水。

27 日 20 时,北京地区处于河套地区的低槽前、地面高压前部的倒槽辐合区中、地面冷锋前部,同时位于河套和东北低槽系统的交汇处,这为中尺度对流系统的发生发展提供了有利的大尺度环流背景。同时,高空冷、低层暖(500 hPa 为冷槽,850 hPa 为暖脊,北京地区高低层温差达 25 °C)的温度场配置为对流的发生提供了较为有利的热力条件。与夏季的强对流过程相比,冷空气势力较强,冷锋、冷槽等大尺度系统更明显,提供了更加有利的动力抬升条件,而热力条件相对较弱。

众所周知,暴雨往往是由中尺度系统造成的。引发这次对流性降水的中尺度系统发展过程怎样?中尺度系统与对流的触发、降水的落区及降水的发生发展过程的关系如何?下面利用高时空分辨的观测资料对其进行分析了探讨。

4 海淀站层结状况及中尺度系统特征

4.1 海淀站大气层结状况

位于海淀区车道沟的微波辐射计能够给出本站上空 10 km 内 47 个层次的温、湿度等数据,提供了高时间分辨率(逐分钟)的大气层结状态。通过利用这些观测数据和地面气压计算对流有效位能(CAPE)和 K 指

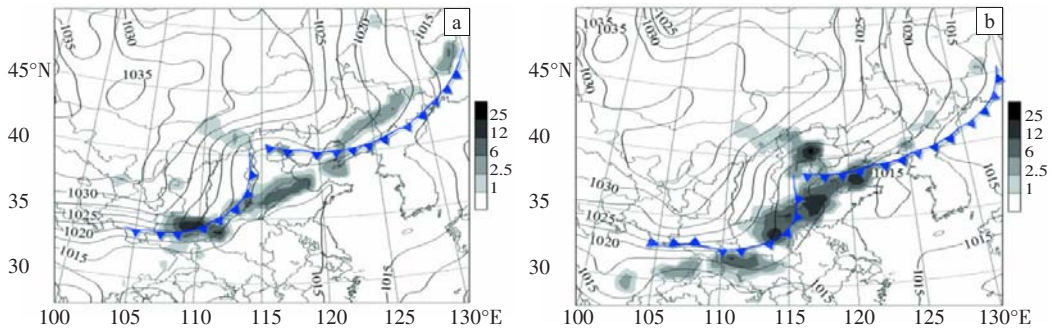


图 4 2007 年 10 月 27 日 20 时(a)和 28 日 02 时(b)海平面气压(单位:hPa)及过去 6 h 降水量(单位:mm)分布图

数等对流参数替代高密度的探空资料,同时结合总水汽量分析海淀站的大气温湿状态演变。

图 5 给出了海淀站 10 min 降水量、CAPE、K 指数和总水汽量随时间的演变。降水开始前,CAPE 逐渐增大、对流有效位能累积,K 指数变化不大,维持在 25~30 之间。降水开始,K 指数迅速减小,达到极小值,CAPE 减小至 0 J/kg,不稳定能量瞬间释放。

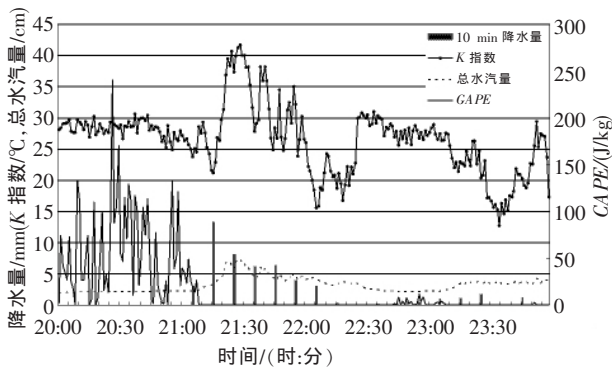


图 5 10 月 27 日海淀观测站 10 min 降水量(单位:mm)与 CAPE(单位:j/kg)、K 指数和总水汽量(单位:cm)随时间变化

从水汽条件看,降水前,总水汽量(PWV)一直维持在 2 cm 左右,降水过程中总水汽量有明显增加。另外,由海淀微波辐射计观测的 27 日 19—24 时相对湿度演变(图 6)可看出,降水前后高低空的湿度发生了明显变化。19:30 前,高空 3 km 以上的湿度大,而近地面层湿度较小。19:30 后,近地面层湿度明显增大至 90% 以上,且大湿度层逐渐加厚,21:00 左右,5 km 以下相对湿度接近 100%,此时开始有降水出现。21:15—22:00,10 km 以下层次相对湿度为峰值区,该时段也

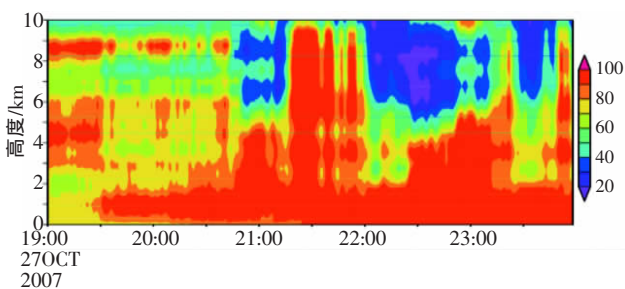


图 6 海淀微波辐射计观测的 27 日 19—24 时北京上空相对湿度(%)随高度(km)变化图

正是降水集中出现的时间。

4.2 地面中小尺度系统特征

图 7 给出了 27 日 21 时的自动站海平面温度、气压和风场以及 1 h 降水量。在温度分布图(图 7a)上,北京南部至城区为“几”字型的相对高温区,海淀观测站的观测温度最高,达到 14.4 °C,北部和西郊为相对低温区,城区与西郊存在明显的温度梯度。海平面气压场(图 7b)上在海淀附近为一局地低压,中心气压值比周围低几百帕,对应的风场上存在明显的风向辐合中心,1 h 的强降水(图 7c)也位于此处,这表明海淀附近形成的暖性低压辐合系统直接导致了 1 h 强降水的发生。

4.3 高空中小尺度系统特征

从 27 日 21 时 18 分北京南郊 SA 雷达的 1.5° 仰角的基本反射率因子图(图略)上可看到,西北象限存在一条东北—西南走向的强回波带,中心位于海淀附近,强度超过 55 dBz;径向速度图上对应存在速度辐合。在仰角 2.4° 的反射率因子图和径向速度图上也有明显的强回波和速度辐合存在。雷达反演的 VAD 风廓线显示(图略),在高度 2.7~3.0 km 处,存在一条明显的垂直风切变。

从 1.5° 仰角的反射率因子随时间的演变可看出,自 19:30 大于 30 dBz 的回波带从上游进入北京之后缓慢向东移动,强度变化不大。21:00 后回波明显增强,移速减慢。

5 强降水落区及系统发生发展的可能机制

孙继松等^[9]研究认为,直接造成北京夏季局地暴雨的三种可能机制是:(1)气流的垂直分布与地形的相互作用;(2)城市热岛效应;(3)重力波传播。前文分析表明,本次天气为孤立的系统造成,非重力波传播所致,故下文从前 2 个方面讨论。

5.1 偏东气流与地形的相互作用

从海淀观测站逐 6 分钟风廓线和 10 分钟降水量演变(图 8a)可以看出,降水发生前后 3 600 m 以下风场发生了明显变化。降水开始前,从高层至低层风速逐渐减小,高层 2 700 m 以上为 12 m/s 左右的偏西

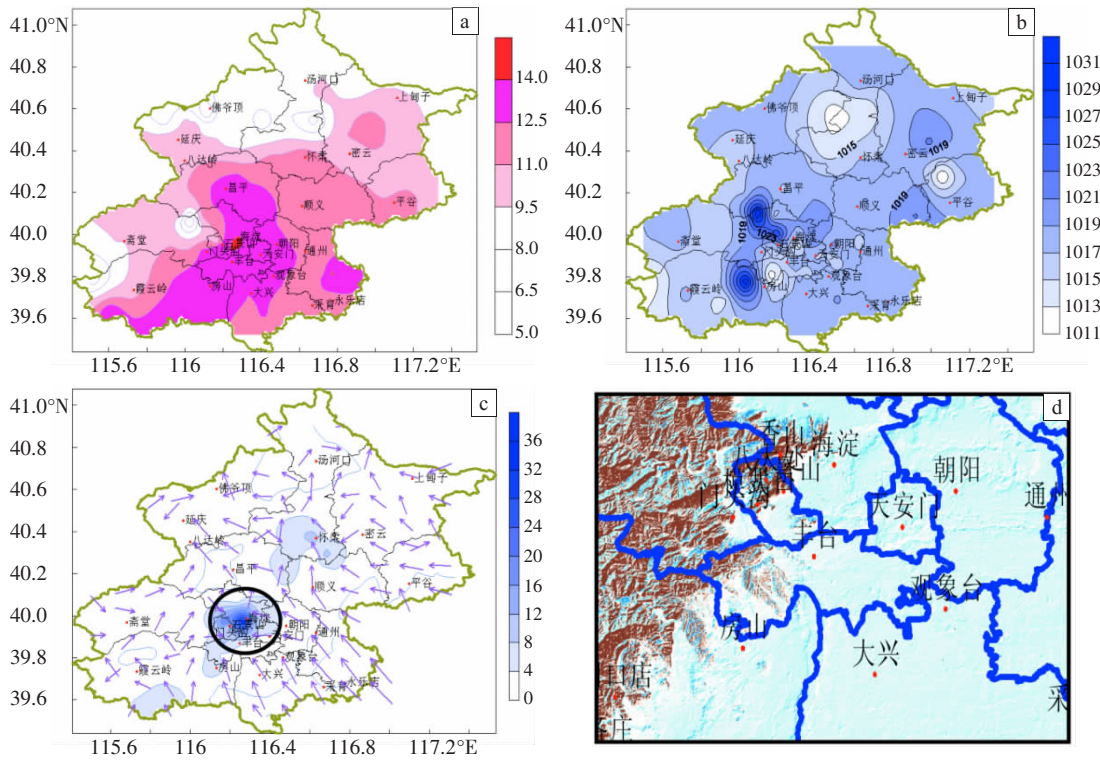


图 7 2007 年 10 月 27 日 21 时海平面温度(a, 单位: °C)、海平面气压(b, 单位: hPa)、
 风场与 21—22 时降水量(c, 单位: mm)分布及北京地形示意图(d)

风, 中层为偏北风, 边界层内为 8~10 m/s 的偏东风。随后, 偏东风层次逐步加厚, 21:10 以后偏东风层次增至 2 700 m, 21:30 前后在 500~900 m 层次和 2 100~2 700 m 层次内产生明显的垂直风切变, 在 1 200~1 800 m 层次出现低空急流, 同时南风气流不断加强上传; 21:40 左右, 1 500 m 上下的南风风速增至 12 m/s, 南风上传最高至 3 300 m; 在 21:40 前后 2 100 m 以上的风切变最为明显。此后高层逐渐转为偏西或偏北风, 偏

东风层次逐渐降低, 22:15 前后, 2 100~3 000 m 层内存在南风转北风、即有小波动过境, 对应有 3 mm 的降水出现。之后, 1 400 m 以上为西南风, 以下为东南风, 降水减弱。与海淀观测站逐 10 min 的降水量图对应分析可看出, 降水始于偏东风层次转至深厚时段, 而减弱于偏东风层次降低时段, 最大值出现在东风层次最深厚时刻。在此期间, 对流层低层和边界层内有垂直风切变存在。

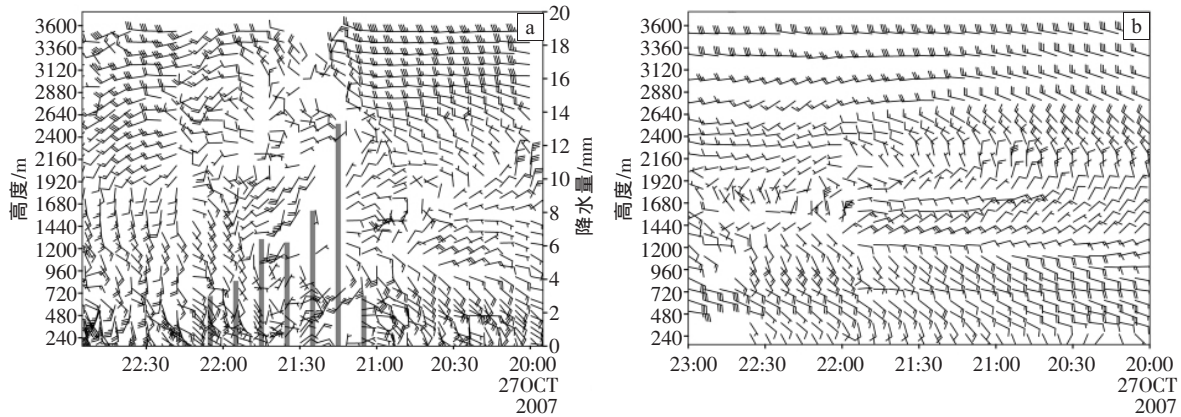


图 8 北京市海淀站风廓线和逐 10 min 降水量(a)与观象台风廓线(b)演变图

距离局地暴雨中心 40 km 左右的南郊观象台风廓线演变(图 8b)与降水发生地海淀站明显不同, 在暴雨过程前后边界层和对流层低层的风向、风速并没有发生明显改变。在降水开始前, 海淀站的东风高度达到 900 m, 而 400~700 m 的偏东风风速达到 6~8 m/s,

观象台的东风层次已至 1 200 m 左右, 但整层的风向风速比较一致, 无明显的风速垂直切变。降水开始后, 海淀站低层东风明显加强, 同时 600 m 左右和 1 000 m 以上的西南气流也明显加强, 而观象台的风廓线无明显变化。

海淀观测站从降水开始至结束,低层偏东风层次的逐渐抬高,中低层分别出现了风垂直切变,而此时出现的降水最强,这与孙继松^[10]的结论相符。他指出,当垂直于山体的气流随高度减小时,地形的作用表现为迎风坡上水平辐合,造成气旋式涡度增加,产生风场切变,对迎风坡降水产生明显的增幅作用。另外,对流性强降水与流场之间存在正反馈作用:局地强降水通过改变边界层环流,造成了降水一侧的风速垂直切变的加强,而且边界层风速的加大又增强了迎风坡一侧的上升运动,这在本此过程中有明显表现。

5.2 城市热岛效应的影响

北京地区夏季强降水往往与城市热岛效应也有密切关系。北京地区的地形特点鲜明,北部和西部为山脉,东南部地区为平原(图7d),而海淀和石景山一带正好是海拔几十米至几百甚至上千米高度过渡的山前地区。在夏季的白天,由于城市下垫面与郊区的

巨大差异产生的明显城郊温度差造成局地的热岛环流,从而引起局地暴雨^[11]。在本次降水开始前,海淀附近为明显的暖中心,城市热岛效应是否与造成本次降水的中尺度系统有关?

图9给出了降水发生前一小时(27日20时,图9a)和降水开始时(21时,图9b)海平面气温的距平分布。由图可看出,在降水发生前一小时,海淀观测站附近存在明显的温度正距平,中心距平值超过了 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,明显的负距平位于平谷和怀柔北部。临近降水发生时正负距平分布形势没有发生明显改变,但是房山-海淀-昌平一线的正距平明显加大,形成与西部山脉走向一致的带状分布,城市中心的近地面为一个暖中心,与西部山区构成明显的温度梯度。城市热岛形成的水平温度梯度可以在迎风坡强迫产生相对独立的中尺度垂直切变,此垂直切变是维系中尺度对流降水发生、发展的重要条件。

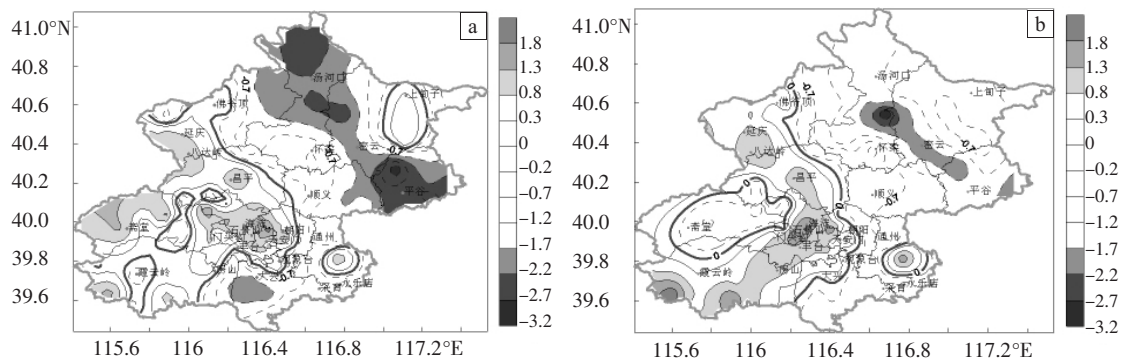


图9 2007年10月27日20:00(a)和21:00(b)海平面气温距平(单位: $^{\circ}\text{C}$)分布

(实线:正距平;虚线:负距平;粗实线:0线)

在降水发生前和发生时,由于在海淀观测站附近存在明显的正温度距平,形成了从城区指向西部山区的温度梯度,但强度与夏季相比显得偏弱。风廓线的连续演变表明东风气流从低层向高层扩展,在降水发生时高低层均产生了垂直风切变。且降水发生后城市与山前地区的水平温度梯度加大,边界层顶的东风气流加速将明显快于近地面层。这与孙继松等对盛夏强对流天气的研究结论^[12]相符:由城市热岛形成的水平温度梯度在迎风坡强迫产生相对独立的中尺度垂直切变,由此产生的低空垂直切变是维系中尺度对流降水发生、发展的重要条件;一旦迎风坡出现强降水,将形成吹向迎风坡的风速与降水强度之间的正反馈现象,这种正反馈过程是 β 中尺度暴雨中心形成的主要原因。

6 结论与讨论

使用常规和新型探测资料对2007年10月发生在北京地区的一次强对流局地暴雨天气过程进行了

详细分析,得到以下初步结论:

(1)在高空冷槽和地面冷锋系统等有利的大尺度环流背景下,地形和热岛效应共同作用产生的中尺度系统造成了此次强对流局地暴雨天气。

(2)偏东气流与北京西山的相互作用是造成对流层中低层和边界层内产生垂直风切变的可能原因。城市热岛形成的水平温度梯度在迎风坡强迫产生的相对独立的中尺度垂直切变是维系此次秋季暴雨过程的中尺度对流与强降水发生、发展的重要因素。吹向迎风坡的风速与降水强度之间的正反馈过程也是深秋季节局地暴雨形成的主要原因。

(3)深秋季节的对流性局地暴雨过程与夏季存在不同之处。很早期的研究就指出夏季强降水一般出现在暖湿的不稳定空气中^[13],平均情况下,暴雨发生时500 hPa的温度为 $-2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,850 hPa温度为 $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,900 hPa以下最高温度达 $27.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大比湿为 17.5 g/kg ^[14]。而此次秋季对流性局地暴雨过程则表现为较好的水汽条件(850 hPa温度露点差为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$)和较明显的冷空

气(500 hPa 温度为 $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$,850 hPa 温度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$)相配合。

文中分析的个例是深秋季节发生的较强的强对流天气过程,与夏季的强对流天气过程相比,秋季对流强度相对较弱,进入深秋后本地主要受较冷气团影响、湿度和热力条件较差可能是原因之一。深秋与盛夏的对流天气之间的差异及其深层次原因还有待进一步分析研究。

参考文献:

- [1] 高守亭.大气中尺度运动的动力学基础及预报方法[M].北京:气象出版社,2007.
- [2] 寿绍文.中尺度气象学[M].北京:气象出版社,1993.
- [3] 李银娥,谌伟,张萍萍.一次华北冷涡暴雨过程的诊断分析[J].暴雨灾害,2008,27(4):320-325.
- [4] 田秀霞,邵爱梅.一次河北大暴雨的华北低涡结构和涡度收支分析[J].暴雨灾害,2007,26(4):306-310.
- [5] 刘淑媛,陶祖钰.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J].热带气象学报,2003,19(3):285-290.
- [6] 张京英,漆梁波,王庆华.用雷达廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系[J].气象,2005,31(12):41-44.
- [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] 郭虎,段丽,卞素芬,等.利用加密探测产品对“06731”北京奥体中心局地暴雨结构特征的精细分析[J].热带气象学报,2008,24(3):219-227.
- [9] 孙继松.城市中尺度天气动力学研究中的一些问题[J].科学研究月刊,2006,22(10):8-12.
- [10] 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):62-69.
- [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] 孙继松,杨波.地形与城市环流相互作用下的 β 中尺度暴雨[J].大气科学,2008,32(6):1352-1364.
- [13] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980:8-10.
- [14] 丁一汇.高等天气学(第二版)[M].北京:气象出版社,2005:436-439.

Meso-scale Analysis of Heavy Rainfall Event Occurred in the Late Autumn 2007 in Beijing

WEI Dong, YANG Bo, SUN Ji-song

(Beijing Meteorological observatory, Beijing 100089)

Abstract: To analyse the characteristics of the synoptic system structure as well as the characteristics of the occurrence and development mechanism of a strong convective rainstorm process took place in Beijing in the late autumn (October 27, 2007) based on the AWS, microwave radiometer and wind profiler data. Analysis indicates that in the context of the favorable large-scale circulation background composed by upper cold trough and surface cold front, the meso-scale systems caused by the special topography and heat island effect leads to the heavy rainfall directly. Previous research achievements about the strong convection in summer can be used to explain the physical mechanism of occurrence and development of the severe convective weather. The interaction between the low-level easterly airstreams and the western mountains of Beijing increases the cyclonic vorticity. This results in the formation of the lower vertical wind shear and enhances the precipitation on the windward slope. The horizontal temperature gradient between the western suburbs and the down-town caused by the urban heat island effect leads to the vertical wind shear on the windward slope, and this is an important factor to enhance the local heavy rainfall. At the same time, the positive feedback process between the wind speed of the wind blowing to the windward slope and the precipitation intensity maybe also is a main factor to enhance the local precipitation. Comparing with the strong convection events in summer, there are some obvious differences on the occurrence and development of the weather systems, which happened in fall is mainly caused by the strong cold air and better water conditions, while the process is weak under the conditions of high temperature and humidity, as well as the invasion of weakly cold air in summer.

Key words: Strong convection; Local heavy rainfall; Meso-scale analysis