

地形和城市热力环流对北京地区 一次 β 中尺度暴雨的影响

吴庆梅 郭 虎 杨 波 孙继松

(北京市气象台,北京 100089)

提 要: 北京特殊的箕簸型地形和超大城市热力环流对北京局地暴雨的落区和强度有重要影响。利用北京地区丰富的地面和高空观测资料,对 2006 年 7 月 24 日的一次局地暴雨过程中温度、湿度、风场的演变和相互配置进行了详细的分析,揭示了一次系统性冷空气与地形和城市热力环流相互作用并激发产生 β 中尺度雨带中不同降水中心的精细过程。得出如下主要结论:受北京地形影响,此次冷空气以东北—西南路径影响北京城区,在冷空气明显的条件下,强降水容易发生在温度较高的城区,同时降水中心倾向于出现在温度距平等值线密集且靠近冷空气移动路径的方位,即冷暖交汇最剧烈的位置。地形辐合切变在冷空气到来时得到了迅速加强,为京西城区强对流提供了强有力的扰动源,同时近地面辐合切变的向上传播对强降水的持续提供了有利的动力支持。降水过程中的潜热释放造成风场垂直切变的改变,在一定程度上使风暴中心附近的东南风迅速加强,使得降水所需的水汽条件得以维持。

关键词: β 中尺度暴雨 多种观测资料 地形辐合切变 城市热力环流

Effects of Topography and Urban Heat Circulation on a Meso- β Torrential Rain in Beijing Area

Wu Qingmei Guo Hu Yang Bo Sun Jisong

(Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089)

Abstract: The west and north parts of Beijing are mountainous areas and the urban island effect is obvious in Beijing, which can influence the distributions and intensity of the rainfall. Using the intensified observation data including wind profile data, wind and temperature elements of surface automatic weather stations, the vertical vapor and temperature distributions

本文得到“环北京夏季暴雨观测系统研究与可预报性示范试验”项目(YHY200706042)和国家“十一五”科技支撑计划重点项目课题“城市群高影响天气预报系统的集成和业务示范”(2008BAC37B05)、2008 年度城市气象科学研究基金资助(UMRF200808)共同资助。

收稿日期:2009 年 3 月 17 日; 修定稿日期:2009 年 5 月 20 日

observed by surface microwave radiometer, the evolvement and interaction in the temperature, wind and humidity of the Meso- β torrential rain occurring in the afternoon on July 24, 2006, in Beijing area are studied and it shows how the system cold front is influenced by topography and urban island of Beijing, and then the different rainfall centers are formed. According to the analysis it is concluded that, the cold front influenced the central part of Beijing along a route from northeast to southwest because of the local topography, and when the cold air is obvious the strong rainfall always occurs at the central urban areas with higher temperature. Meanwhile the rainfall center is prone to form in the area of dense anomalous temperature isolines and in the direction the cold front moves. Wind shear convergence between the southeast wind from the plain and the north wind from the mountains becomes distinct when the cold front arrived near the west mountain, and at the same time the lifting effect of the southeast wind from the plain by mountains strengthened, which is the disturbance cause of the rainstorm. The upward propagation of surface shear convergence is the dynamical support for the rainstorm. The latent heat release changed the temperature distribution during the rainstorm, which led to the enhancement of southeast wind which brought vapor to the rainstorm.

Key Words: meso- β torrential rain multiple observation topographic convergence shear urban heat circulation

引 言

北京地处华北平原的西北部,北倚燕山,西临太行山,地势自西北向东南倾斜,地形极为复杂;同时北京作为超大城市,城市热岛作用显著。受上述因子影响,北京地区的暴雨有其独特性和复杂性^[1-4],这类局地暴雨过程往往具有明显的 β 中尺度特征,突发性强、时间短、强度大且分布不均这类暴雨的特点。北京作为超大城市和首都,此类局地暴雨对交通是一个严峻的考验,对其预报研究显得尤为重要。近年来,应奥运气象服务的需求,北京地区综合探测现代化建设得到了极大推动,尤其是可以实时获得高时空分辨率的地面自动站资料、多普勒雷达数据、风廓线数据、微波辐射计资料等。这些资料为北京暴雨的分析和研究提供了有利条件和基础。地形与超大城市的热力环流对北京局地暴雨的影响研究逐渐增多^[5-9],但还有待进一步继续和深入。孙继松等^[5]对广受社会关注的

2004 年 7 月 10 日的局地暴雨过程研究表明,城市与郊区下垫面物理属性造成的热力差异,不仅形成了城市中尺度地面风场辐合线,而且风速辐合线可能存在于整个边界层内,对对流单体具有明显的组织作用。郭虎等^[6]的研究表明,由地形造成的风场辐合及迎风坡辐合抬升作用对暴雨的形成有重要作用,近地面辐合扰动的向上传播是北京香山一次局地大暴雨的动力源;孙继松等^[7]利用 2006 年 3 次 β 中尺度暴雨个例,集中分析了地形和城市环流对 β 中尺度暴雨的作用,认为由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,且由此产生的低空垂直切变是维持中尺度对流降水发生发展的重要条件。以上分析在研究城市地形和热力环流对降水的影响时,与对应的天气系统结合较少,2006 年 7 月 24 日过程是一次明显冷空气受地形影响,从东北—西南路径影响北京而造成降水的过程,利用北京丰富的自动站资料及位于南郊观象台和海淀的两部风廓线雷达资料、微波

辐射计资料,揭示了一次大尺度天气过程对应的冷空气与地形和城市热力环流相互作用并激发产生 β 中尺度雨带中不同降水中心的精细过程,希望能加深对北京局地暴雨过程的认识,同时对临近预报有所启发和指导。

1 局地暴雨过程介绍和天气形势分析

2006年7月24日过程是一次比较典型的 β 中尺度降水过程,暴雨具有范围小、局地性强且雨量集中的特点。由于此次降雨过程发生在下班高峰期,多处积水对交通造成不同程度的影响,车道沟积水较深,交通一度中断;首都机场的航班延误150多架次,另有46个航班因北京地区雷雨过大被迫降落在外地,并有13个航班取消。本次过程城区降水量明显,城区5个人工观测站平均降水量为41mm,自动站过程雨量分布图上在城区存在3个50mm以上的降水中心(图1a),其

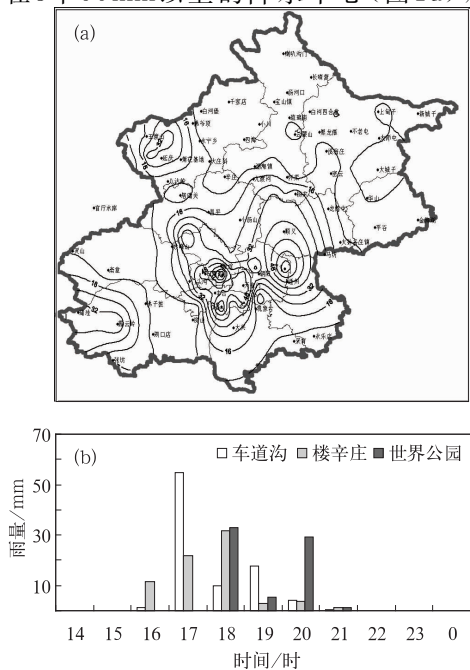


图1 2006年7月24日15—21时雨量分布图(a)和降水中心自动站雨量时序图(b)
横坐标标注的时间对应的雨量为当前时次和前一时次的累积雨量

中车道沟自动气象站为87mm,该站处于西山靠近城区的位置;楼辛庄自动气象站为71mm,该站位于城区东部朝阳区;城区南部的世界公园自动气象站为68mm。从3个降水中心自动站的雨量时序图(图1b)上可看出,主要降水时段集中在24日15—20时(北京时,下同),同时降水强度大,雨量最大中心车道沟自动站16—17时的降水量达到了54.7mm。降水首先在北京东部的楼辛庄产生,西部山前的车道沟站其次,南部的世界公园降水最晚,出现在17时以后。

暴雨过程是各种尺度天气系统相互作用的结果,有利的天气尺度环流是产生暴雨的背景条件。天气尺度的分析表明7月22日500hPa东北平原有冷涡生成(图略),7月24日08时北京处于冷涡后部的西北气流当中,在内蒙古中部存在横槽切变,意味着有冷空气南下影响北京地区。14时850hPa θ_{se} 和风场图上(图2),北京处于横槽切变线附近,冷空气主体位于东北平原,北京地区受弱的偏东气流影响。相应物理量诊断分析表明,700hPa和850hPa上北京地区水汽条件基本达到饱和,但水汽输送条件较差;850hPa存在弱的上升运动和弱辐合,700hPa上升运动也很弱,且散度场上表现为辐散。从本站条件来看,24日08点南郊观象台站的K指数为33,沙氏指数为-1.2,不稳定条件有利于

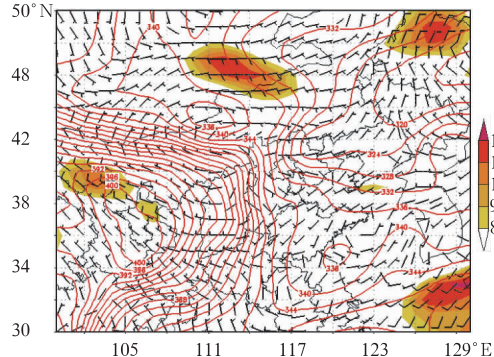


图2 2006年7月24日14时850hPa θ_{se} 和风场分布

对流天气的产生。总的看来,本次天气条件有利于对流性天气的产生,但降水的落区和量级是预报的难点,尤其是暴雨(50mm 以上)中心的落区更是无从把握。

2 自动站温度分析

为了分析冷空气的路径及其与下垫面的相互作用对降水的影响,利用北京地区 60 多个自动站资料作逐时温度距平等值线图(图 3)。为了尽可能地消除由于测站海拔高度产生的差异,将测站的温度均按照 $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的垂直递减率统一订正到平原地区的平均海拔高度,然后再将所有测站温度平均,用测站气温减去平均气温就得到温度距平图。同时给出了北京海拔高度图(图 4),便

于分析地形对冷空气路径的影响,图中标出了北京 60 多个自动站的分布,密集的自动站资料为分析提供了强有力的支持。

13—14 时冷空气到达北京北部汤河口区并进一步南压,受西部佛爷顶及周边山地影响,冷空气在西北部山区被阻塞,形成等值线密集区,由于东部上甸子至密云一带为海拔较低值区,在燕山南麓形成了喇叭口开口地形,冷空气在此很快南下并由此造成冷空气偏东南下的形势,14 时图上北京城区存在明显的暖中心(图 3b 椭圆区),为降水在城区加大提供了有利的热力条件。16 时图上,温度距平等值线轴线表明冷空气主体为向南略偏东移动(图 3c 中箭头),由于城区温度较高,在朝阳城区温度距平等值线非常密集(图 3c 中椭圆区),降水于 16 时前后首先在密

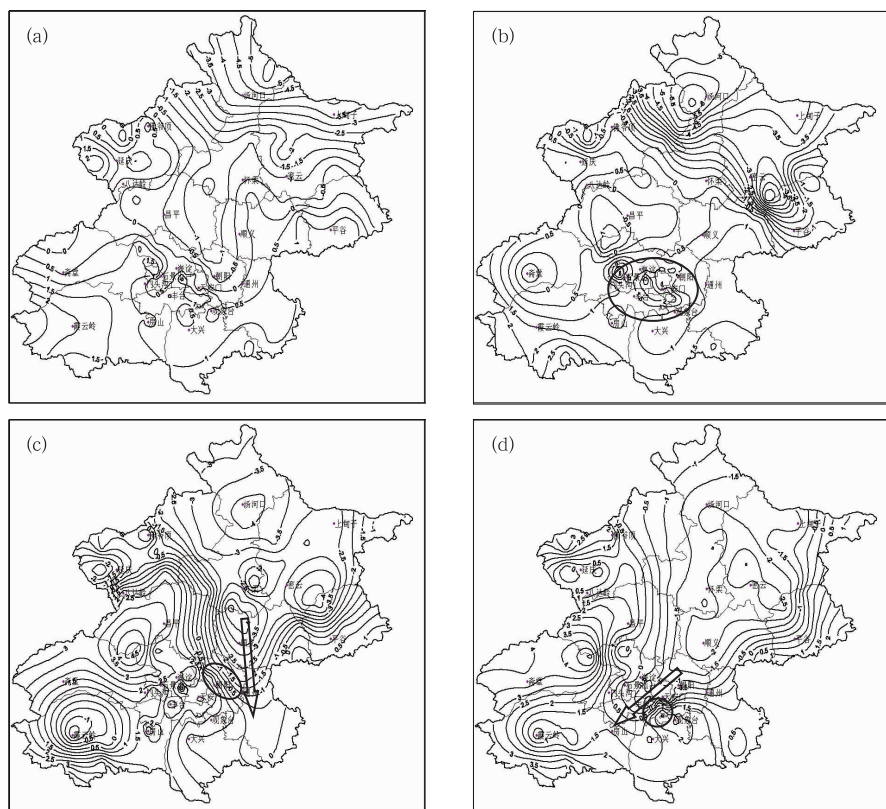


图 3 2006 年 7 月 24 日 13—17 时自动站温度距平分布

(a)13 时; (b)14 时; (c)16 时; (d)17 时

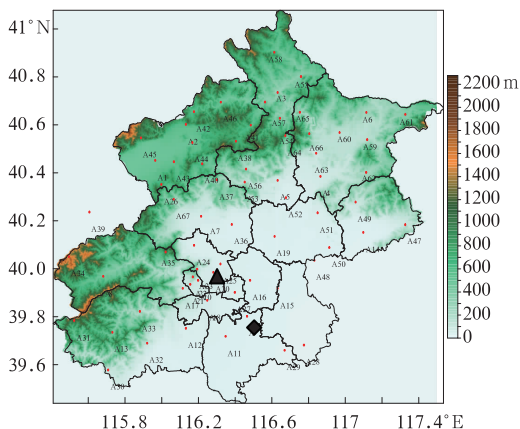


图 4 北京市海拔高度和自动站分布图
(图中三角形和菱形分别为海淀站和南郊观象台风廓线雷达位置)

集区开始,并在等值线密集区靠近冷空气移动路径的方向上产生了图 1 所示 71mm 的暴雨中心,虽然在东部平谷和西部延庆—怀柔一带也存在温度距平等值线密集区,配合地形图可知,是由于山脉的阻挡,冷空气堆积的结果,相应地区的降水较少或没有。17 时城区大部分地区有大雨产生,冷空气势力有所减弱并继续南压,受上游城区降水造成的温度下降和地形的共同影响,等值线的轴向转为西南方向(图 3d),在丰台—朝阳交界处存在明显的等值线密集区,同样在等值线密集区靠近轴向上,世界公园的降水于 17 时后开

始并形成了 68mm 的暴雨中心。

以上分析表明:本次降水过程与冷空气的入侵密切相关,受北京地形影响,此次冷空气以东北—西南路径影响北京城区,由于城区温度较高,冷暖交汇剧烈,城区普降大—暴雨,强降水容易发生在温度距平等值线密集且靠近冷空气移动路径的方位。

3 自动站风场和风廓线雷达资料分析

在西部山前的海淀地区,车道沟站的雨量最大,虽然其降水量比另外两个中心偏多不到 20mm,但其小时雨量达到了 50mm 以上,降水强度明显偏强,利用自动站风场和风廓线雷达资料分析了可能的原因。

逐时自动站风场表明,13 时前后受山谷风的影响,北京平原地区风场逐渐由东北风转为东南风^[10](图略),15 时自动站风场图上北京平原地区一致为东南风(图 5a),其与西部山区的西北风在海淀—石景山一带形成了一条地形辐合线,但东南风风速较小;16 时虽然北部冷空气还在朝阳附近(图 3c),但受其影响,下游风场已出现明显变化,平原地区东南风风速明显加大(图 5b),这一点从逐 6 分钟的风廓线资料也可以得到进一步证实。

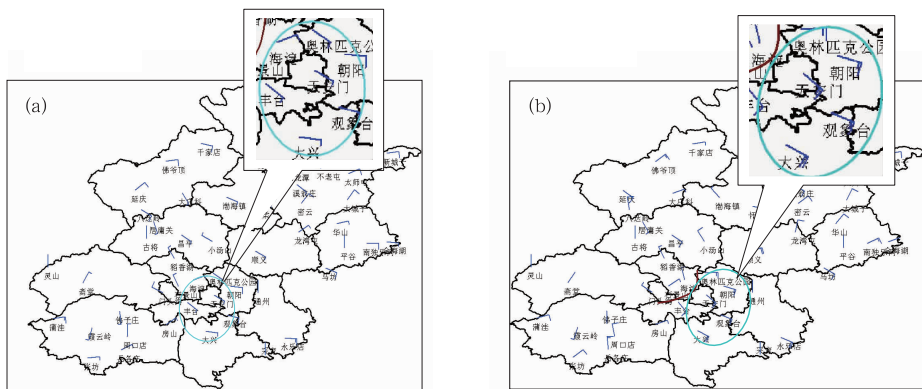


图 5 2006 年 7 月 24 日北京地区自动站风场
(a) 15 时; (b) 16 时

从海淀站和南郊观象台风廓线时序图来看(图 6),由于海淀站处于山区和平原的交界处,低层风场表现较为复杂,降水前低层风场出现了东南风和东北风交替出现的现象,15:12,500m 高度以下出现较为一致的东北风,与南郊观象台的东南风形成明显的辐合切变,与自动站风场表现一致,这种由于地形造成的中尺度辐合切变为局地对流天气的触发提供了有利条件;16 时前后低层冷空气逐渐影响海淀地区,海淀站东北风明显加强,而南郊观象台低层的东南风与自动站观测一致,也表现出明显加大,地形造成的低层辐合随冷空气的到来迅速得到加强;同时平原地区东南风的加强使得山前地形抬升作用也加强,在低层为强降水提供了足够的扰动源。

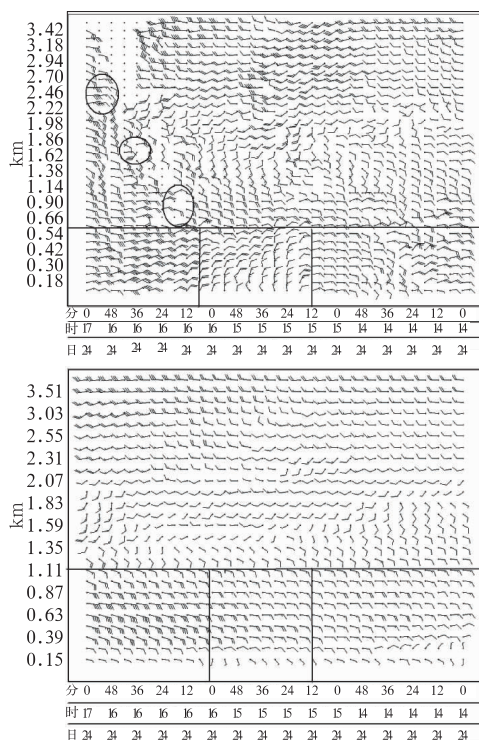


图 6 风廓线雷达 2006 年 7 月 24 日

14—17 时时序图

(a) 海淀雷达; (b) 观象台雷达

风场辐合和地形抬升加强的同时,出现了雷达回波的突然加强,两者在时间上基本

同步。从南郊观象台雷达回波强度图上(图 7,见彩页)可以清楚看到,17:48 北京西部有大片回波出现,但结构比较零散,回波强度较弱;16:13 回波迅速加强,并出现了 50dBz 以上的强回波区(图中圆圈所示),风场辐合和地形抬升的加强与雷达回波的突然加强在时间上具有一致性。由地形造成的风场辐合和地形抬升作用在冷空气到来时得到迅速加强为强对流天气迅速发展提供了触发条件。

进一步比较海淀和南郊观象台风廓线雷达资料,海淀站 14:54,3000m 高度上开始出现 $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的低空西南急流并向下扩展,2000m 以上明显高空槽在 15:18—15:36 影响海淀地区。正是受高空槽影响,低层冷空气影响海淀区造成了低层东北风的增大,16:18 左右降水开始后低空急流和高空槽再次出现。而南郊观象台没有观测到上述低空急流,高空切变也很弱。当海淀站降水开始后,近地面层的偏东风有迅速上传的现象,同时上传过程中出现了更小尺度的东北风与东南风的切变(图 6a 中椭圆所示切变),这种 γ 中尺度的切变与上述近地面层平原地区东南风和海淀站东北风辐合切变有关,近地面辐合提供扰动源并上传促进了局地暴雨发展和维持,这一点与郭虎等^[6]的研究结果是一致的。

4 微波辐射仪资料分析

微波辐射计可以用来探测大气中的水汽总量,以及温度、湿度和水汽垂直分布廓线,地基微波辐射计测量水汽总量与常规探空的对比分析表明其测量值是准确的^[11]。所用微波辐射计位于车道沟,正好处在本次过程中降水中心位置。微波辐射计提供了逐分钟垂直方向上的水汽和温度信息,对分析暴雨前后温湿变化极为有利(图 8,见彩页)。从温度变化来看,16 时左右强降水开始后,可以看到由于降水的潜热释放导致了降水云层内温度的明显增加,孙继松等^[7]通过推导中尺度 Boussinesq 近似的扰动方程组,指出在

低层是东风气流的条件下,温度水平分布和风的垂直切变的关系为: $\frac{\partial}{\partial t}[\frac{\partial u}{\partial E}] = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}$,这样由于潜热释放,在对流层中层必然造成山前一侧的气温将高于城市一侧的气温,即 $\frac{\partial \theta}{\partial x} < 0$ 。由上面公式可知对流层中层上部将出现东风气流减速(或西风气流加速)、底部东风气流加速的现象,风廓线资料时序变化图上(图 6a),16 时后 500m 高度以上随降水的开始出现了东南风的快速加大和上传,就是风场对温度场改变响应的结果。

从相应相对湿度和大气含水量来看,降水前中层的水汽条件已基本具备;在降水时段内,湿度变化剧烈,时间序列图上呈明显干湿相间交替出现,在湿度较大时段,水汽扩展的层次较高,饱和区升高至 10km 左右。降水时段内,湿度的波动与温度变化呈明显的反位相关关系,说明降水潜热释放导致空中温度的升高同时造成了水汽含量的迅速下降,而东南风的加大又起到了迅速汇集水汽的作用,结果使强降水所需的水汽条件得以维持。

5 结论与讨论

(1) 低涡后部冷空气的入侵是本次天气产生的关键,但地形和热力作用对 50mm 以上的暴雨中心有明显影响。

(2) 受北京地形影响,此次冷空气以东北—西南路径影响北京城区,在冷空气明显的条件下,强降水容易发生在温度较高的城区,同时降水中心倾向于出现在温度距平等值线密集且靠近冷空气移动路径的方位,即冷暖交汇最剧烈的位置。

(3) 由于北京地形造成的山谷风环流的影响,北京西部山前地区存在地形辐合切变,由地形造成的风场辐合和地形抬升作用在冷空气到来时得到了迅速加强为京西城区强降水提供了触发条件。低空急流和明显高空槽影响为降水中心提供了水汽和动力条件,近

地面辐合切变提供扰动源并上传传播对强降水的持续提供了有利的动力支持。

(4) 降水过程中的潜热释放造成对流层中层风场垂直切变的改变,在一定程度上使风暴中心附近的东南风迅速加强,使得降水所需的水汽条件得以维持。

地形和城市热力作用对北京降水的雨量 and 落区的影响,离不开当时的天气系统,其受冷空气的路径、强度以及由此激发的中小尺度系统等的影响,对不同的降水天气系统的影响以及两者的相互作用是不同的,这方面的工作还有待进一步的深入。

参考文献

- [1] 王迎春,钱婷婷,郑永光,等.对引发密云泥石流局地暴雨的分析和诊断[J].应用气象学报,2003,14(3):277-286.
- [2] 郭虎,季崇萍,张琳娜,等.北京地区 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的波动分析[J].大气科学,2006,30(4):703-716.
- [3] 段丽,卞素芬,俞小鼎,等.用 SA 雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成的精细分析[J].气象,2009,35(3):21-29.
- [4] 赵玮,王建捷.北京 2006 年夏季接连两场暴雨的观测对比分析[J].气象,2008,34(8):3-14.
- [5] 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):1-14.
- [6] 郭虎,段丽,杨波,等.0679 香山局地大暴雨的中尺度天气分析[J].应用气象学报,2008,19(3):265-275.
- [7] 孙继松,杨波.北京与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J].大气科学,2008,32(6):1352-1364.
- [8] 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.
- [9] 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):221-227.
- [10] 钟跻芹,张朝林,范水勇.北京稳定天气条件下城市边界成环流特征数值研究[J].气象科技,2005,33(6):481-486.
- [11] 刘红燕,李炬,曹小彦.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):222-229.

吴庆梅等:地形和城市热力环流对北京地区一次 β 中尺度暴雨的影响

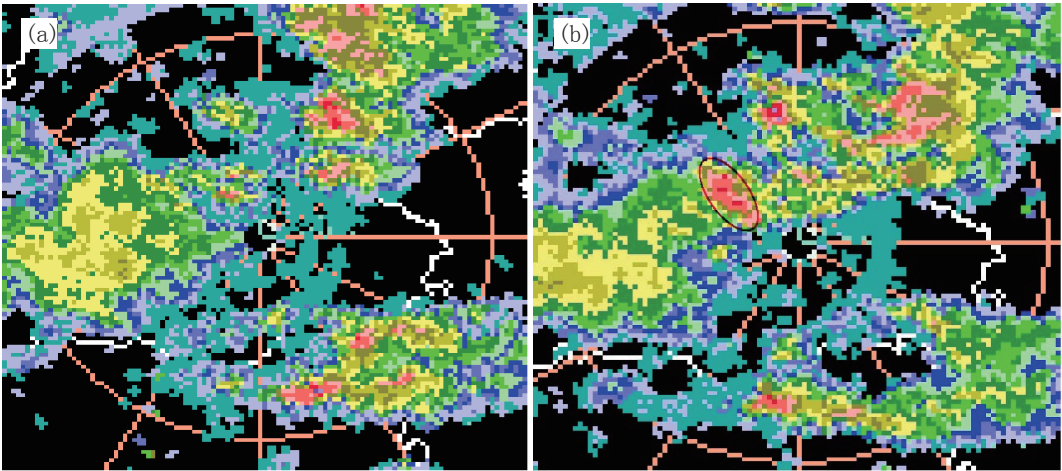


图 7 2006年7月24日南郊观象台3km高度雷达回波强度图
(a) 15:48; (b) 16:13

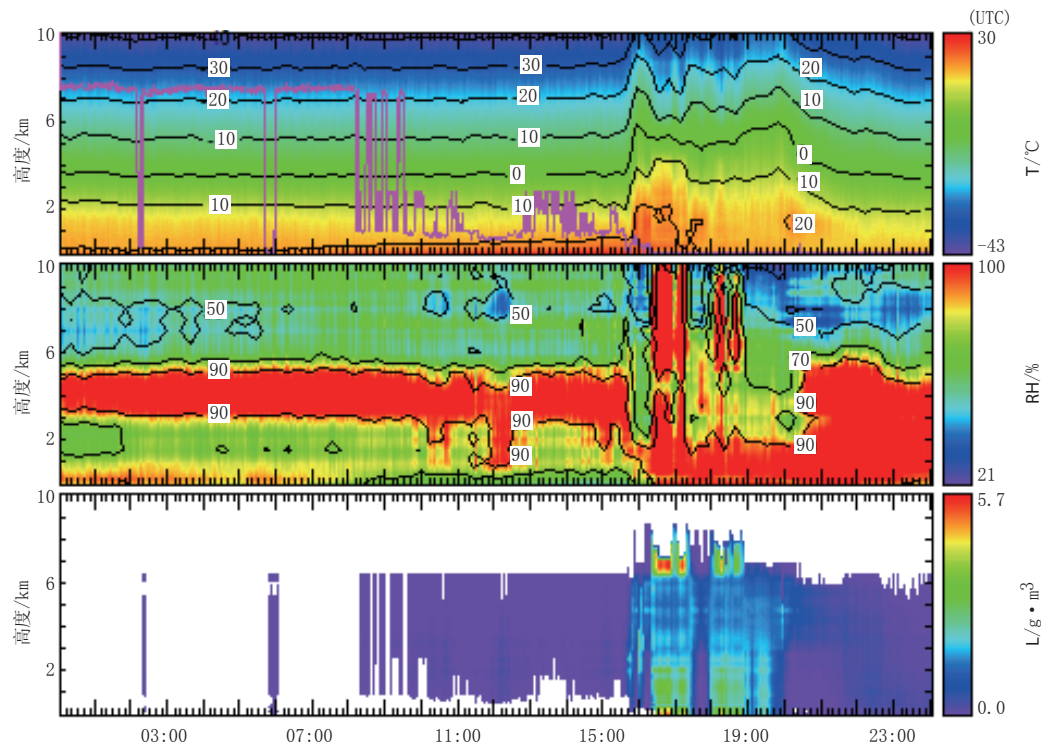


图 8 2006年7月24日微波辐射计温度、相对湿度及含水量时序分布