

# 2004 年 7 月 10 日北京暴雨的中尺度分析

毛冬艳 乔 林 陈 涛 杨克明

(国家气象中心,北京 100081)

## 提 要

利用常规探测、地面加密观测、NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的 6 小时资料和雷达资料对 2004 年 7 月 10 日北京罕见的局地暴雨进行了天气动力学和中尺度分析。结果表明:这次暴雨是在比较有利的天气背景条件下产生的,造成强降水的 3 个雨团在时空尺度上具有中  $\beta$  尺度系统的特征,不断移入的对流回波是降水的直接制造者,中尺度辐合线和小低压为降水发生提供了有利的触发条件。

关键词: 暴雨 中尺度分析 雨团

## 引 言

暴雨是我国主要的灾害性天气之一,常给国民经济和人民生命财产造成严重的损失。暴雨是各种尺度天气系统相互作用的结果,大尺度环流为暴雨的产生提供有利的背景,中尺度系统则是暴雨的直接制造者。近年来,对于长江流域、华南和西北地区东部等地的暴雨有过不少的研究,尤其在中尺度方面的分析研究工作较深入<sup>[1~3]</sup>。

2004 年 7 月 10 日北京经历了一场历史上罕见的局地暴雨过程。该暴雨具有历时短、突发性强、强度大等明显中尺度特征。本文试图从大尺度环流背景和物理量场诊断分析入手,重点分析暴雨的中尺度特征,以了解这场暴雨的成因,为此类突发性暴雨预报提供一些预报依据。

## 1 雨情

北京市城区罕见的暴雨主要出现在 7 月 10 日 16~20 时,暴雨区和大暴雨区主要位于石景山、丰台、门头沟东部和中心城区,其中丰台气象站 1 小时最大雨量达 52mm,10 分钟最大达 23mm;中心城区降雨中心在紫竹院、天坛和天安门附近;平谷、密云和延庆基本上无雨。

由于这场暴雨强度大、雨势猛、降雨时间集中,给北京市交通带来极为严重的影响,部分城区路段严重积水 and 交通瘫痪。

## 2 环流背景和物理条件分析

### 2.1 500hPa 环流形势特征和主要影响系统

这次暴雨发生前期,500hPa 上在西西伯利亚维持一个高空冷涡,从冷涡中不断分裂短波槽沿中纬度锋区东移。9 日 08 时,从冷涡中分裂的本次暴雨影响槽已抵达蒙古国中部到黄河上游地区,并与逐日东移的一高原槽同位相叠加形成一个槽线长达 20 个纬度的大槽。10 日 14 时(图 1a),大槽的北端在河套北部生成一个低涡。随着大槽的东移,逐渐替换了原位于我国东部地区的长波槽,此槽北段减弱致使西太平洋副热带高压西伸加强并北抬,副高西北侧与大槽之间建立了一支低空西南急流,是暴雨水汽主要携带和输送者。在暴雨发生前西南暖湿气流逐渐加强,急流北界由  $30^{\circ}\text{N}$  伸展至  $35^{\circ}\text{N}$  附近(图 1b),与贝加尔湖大陆高压西南侧的东南气流之间在黄淮北部形成一条暖切变线,切变线北侧的偏东气流为北京局地暴雨提供了有利的东风条件<sup>[4]</sup>。暖切变线与河套北部低涡相接,10 日 08 时在华北等地建立低涡切变形势。地面图上,与低涡相配合的有一温带气旋,北京位于气旋冷锋前部暖区中,渤海湾至北京东南部盛行一致的东南气流。至此,500hPa 上的西风槽、对流层中低层的低涡切变线、地面冷锋是北京暴雨天气尺度的主要影响系统。

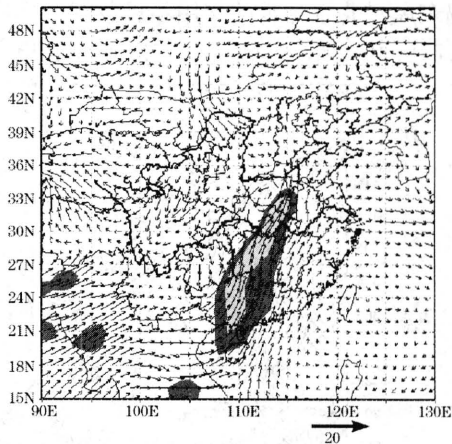
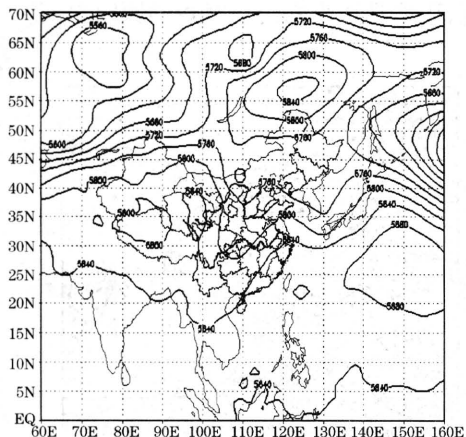


图1 2004年7月10日14时500hPa高度场(a)和850hPa风矢量场(b)

图中阴影区表示风速 $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,等值线间隔 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

## 2.2 动力条件分析

从沿北京附近( $40^\circ\text{N}$ 、 $116^\circ\text{E}$ )的涡度时空剖面图(图2a)上可看出,降水发生前期,北京上空受高压脊控制,整层都为负涡度。10日14时后,500hPa以上逐渐转为弱的正涡度,而中低层的负涡度却略有增强,不利于降水的发生。从散度的变化来看(图2b),降

水前,北京整层的散度都较弱,辐合主要发生在600~700hPa之间,低层为辐散区,不利于气流辐合上升;随着降水的发生,辐合区进一步向低层扩展,主要在对流层中低层。由此可见,动力条件并不利于降水的发生,这可能与动力条件建立的时间以及资料的时空分辨率相对于降水系统尺度小有关。

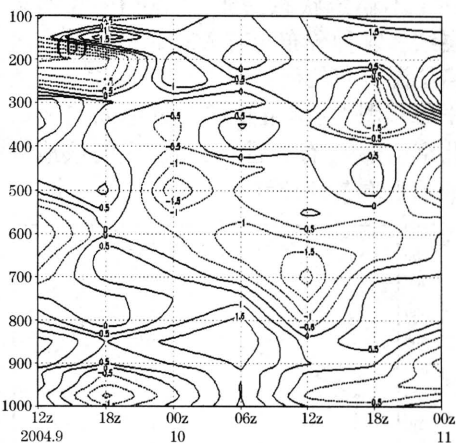
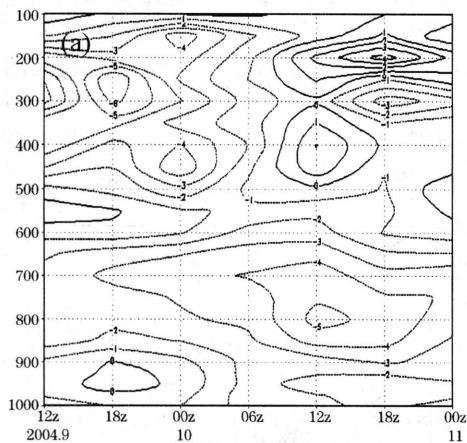


图2 沿北京附近( $116^\circ\text{E}$ 、 $40^\circ\text{N}$ )涡度(a)和散度(b)时空剖面图(单位: $10^{-5}\text{s}^{-1}$ )

## 2.3 水汽条件分析

水汽条件是影响降水强度的关键。图3a给出了7月10日14时850hPa比湿的水平分布,从图中可清楚地看出,华北西北部有一明显的干区,华北其它地区为大范围的湿区,北京正好位于干湿交界的比湿水平梯度大值区的前部,水汽含量为 $11\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

水汽输送是降水得以维持的重要因素。

从水汽通量的时空剖面图(图略)上可以看到,水汽的输送主要集中在800hPa以下层,以925hPa最为明显。该层上(图3b)北京的水汽输送主要有两个通道,一支与西南急流相配合,但水汽通量大值区主要位于 $35^\circ\text{N}$ 以南,对北京的水汽贡献不大;另一支是暖切变线北侧的东南气流,将北部海区的水汽输送到北京。以往的研究认为,对流层低层的

偏东风对北京降水的作用不可忽视。本次暴雨西南和东南两支气流的水汽输送并不显

著,可能是该次暴雨历时短的原因之一。

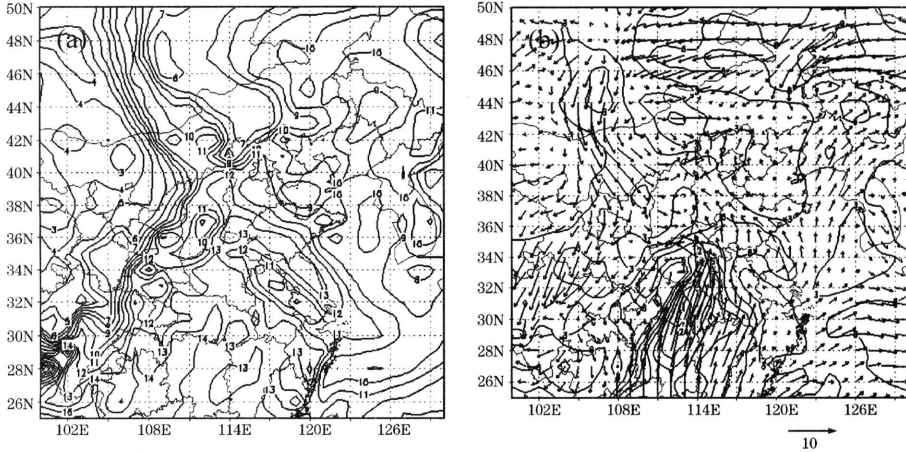


图3 2004年7月10日14时850hPa比湿场(a)和925hPa水汽通量和风场(b)  
比湿单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,水汽通量单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$

## 2.4 不稳定能量分析

在暴雨前,北京上空 $\theta_{se}$ 的廓线呈弓形分布(图4a),900hPa以下 $\theta_{se}$ 随高度变化较小,向上到750hPa $\theta_{se}$ 明显减小,反映该层次内大气处于不稳定状态,750~600hPa基本是中性层结。这种分布与有人对北京雷暴大风日相当位温分布的研究结果是一致的<sup>[5]</sup>。从 $\theta_{se}$ 水平分布图上(图略)可知,近地面层从山西到北京西部 $\theta_{se}$ 有一舌状凸起,说明该地区的能量和水汽条件较好。

从对流有效位能(CAPE)的分布来看(图4b),10日08时,北京及以西地区的CAPE值很小,此后6小时,该区域CAPE值显著增大,14时达最大,但中心位于北京以西约1~2个经度内。随着降水的发生,能量开始释放。这说明强降水发生之前,对流有效位能是在短时之内快速累积起来的,能量释放主要在14时之后,而由能量释放所产生的较强上升运动也应在14时之后,这与暴雨产生前动力条件欠佳是一致的。

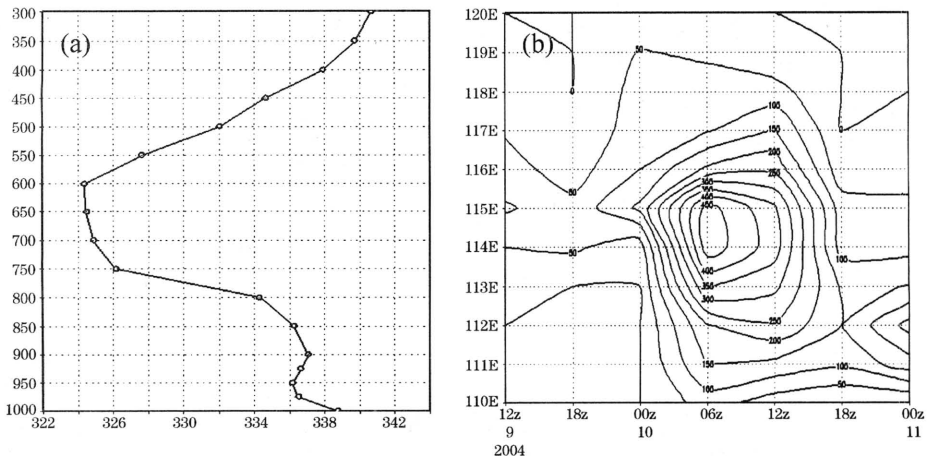


图4 2004年7月10日14时沿北京附近(116°E,40°N)假相当位温垂直分布(a)和沿40°N对流有效位能时间-经度分布(b)(假相当位温单位:K,对流有效位能单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

### 3 地面要素的中尺度特征分析

选用 Barnes 客观插值方法<sup>[6]</sup>对逐时降水和地面加密观测场进行了分析,地面降水的时空分布极不均匀,具有明显的中尺度特征,是地面中尺度辐合线及辐合线上小低压造成的。

#### 3.1 地面降水的中尺度特征分析

分析北京市自动站逐时雨量得知,降水随时间的变化比较显著,并且即使在同一时段相邻两站的降水量相差悬殊,说明这次降水时空分布具有明显的中尺度特征。

技术规定:将 1 小时降水量 $\geq 10\text{mm}$ 、生命史 $\geq 1$ 小时、范围达到或超过几十公里的雨区定义为中尺度雨团。据此,我们对 7 月 10 日 15~20 时自动站雨量进行了分析。15~16 时北京不仅降水范围小,而且雨区分散,其中在城西有一中尺度雨团,致使门头沟出现  $31.0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的强降雨,在城东的东直门也出现了  $2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降雨;17 时,城区降水范围明显增大,强度增强,城西的中尺度雨

团明显减弱,城东生成一范围约  $25\text{km}\times 15\text{km}$  的中尺度雨团,最大降水中心出现在该雨团中心的天安门,降水强度达  $42.2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ;18 时,降水区分为东、西两部分,其中东部降水区的位置偏东偏北,范围有所缩小,降水中心出现在雨团北部的青年湖,强度为  $40.5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,西部又新生一个中尺度雨团,雨团范围虽不大,但强度较强,使丰台 1 小时降雨量达到  $51.9\text{mm}$ ,创 1 小时雨量的极大值;19 时,东部降水区的范围进一步缩小,强度减弱,西部中尺度雨团的范围变化不大,但降水中心北移,在雨团西北部的石景山,1 小时雨量为  $33.5\text{mm}$ ;20 时,整个城区降水减弱,南部的大兴县却出现了一个强度为  $29.6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降水中心。综上所述,整个降水过程中城区有 3 个中尺度雨团活动(表 1),生命史约 2~3 小时,具有明显的中  $\beta$  尺度系统的特征。它们不断的生消发展,并在小范围内的重复出现,造成了北京城区局部强降雨。

表 1 2004 年 7 月 10 日 15~20 时北京城区中尺度雨团的概况

| 序号 | 范围(经纬度)                        | 生消时间    | 生命史/小时 | 最大降水中心位置               | 降水中心强度/ $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ |
|----|--------------------------------|---------|--------|------------------------|---------------------------------------|
| 1  | 39.87~39.97°N, 116.08~116.21°E | 15~17 时 | 2      | 门头沟(39.92°N, 116.12°E) | 31.0                                  |
| 2  | 39.85~40.02°N, 116.26~116.51°E | 16~19 时 | 3      | 天安门(39.9°N, 116.38°E)  | 42.2                                  |
| 3  | 39.83~39.97°N, 116.14~116.28°E | 17~19 时 | 2      | 丰台(39.87°N, 116.25°E)  | 51.9                                  |

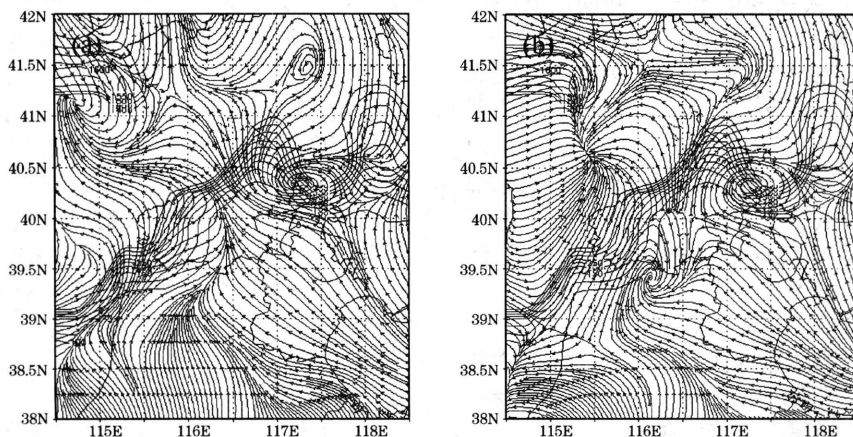


图 5 2004 年 7 月 10 日 17 时(a)、18 时(b)地面流场图

虚线:海拔高度,等值线间隔 50m

#### 3.2 地面流场的中尺度特征分析

图 5 给出了用逐时地面加密观测资料分析暴雨过程的地面流场。14 时,北京南部平

原地区为一致的偏东气流,其后,东风气流的偏南分量逐渐增大,在河北西部为一支偏南气流,其北界伸到北京西南部,以东南气流形



式与东风汇合;17时,在北京南部平原地区形成一条南北向的东南风和西南风的中尺度辐合线,长约100km;18时,在辐合线南部,即北京南部与河北交界处,产生一个风场上辐合的小低压环流,对应1小时最大的降水量。由此可见,中尺度辐合线和辐合线上的小低压为降水提供了有利的触发条件。18时以后,地面转为辐散流场,降水趋于结束。

#### 4 雷达资料的分析

雷达在中尺度天气系统研究方面具有很大的优势,能够在其扫描范围内,充分发挥高时空分辨率的优势,对局地强对流天气的演变进行很好的监视和跟踪。根据北京市气象局多普勒雷达约5分钟一次、扫描半径为150km的回波强度图像分析,发现:

(1)15:00,在测站正西约7km处出现一尺度很小、呈细胞状的对流回波,在测站西南方有多个零散的对流回波,这两处回波的最大强度都已达到或超过50dBz;此后,本地的对流回波逐渐发展增强,与中尺度雨团1相对应,而西南方向的对流回波则先向西北方向移动,然后转为东北方向,并在移动的过程中合并增长。

(2)16:05,测站的东南方约8km处出现一小的对流回波,并与从廊坊移来的回波合并增强,其最大强度达50dBz,并向西北方向移动,该回波与中尺度雨团2相对应。

(3)16:32,从测站西南方移动的回波和本地对流回波合并,并与东南方向的对流回波组成NE—SW向和NW—SE向的两条回波带(图略),西部的回波带逐渐减弱,而东部的则继续加强北上,于17:10合并为一条更强的回波带,对应地面1小时最大降水量,形成了中尺度雨团3。

(4)16:43和17:48,在河北涿州一带分别有两次对流回波北上,约1小时后到达北京西南部开始造成北京降水,但降水均较弱。

与回波强度相对应,在径向速度图上,16:43测站以西约6km处出现一条中尺度辐合线,17:10达到最强(图略),与此时两条回波带合并增强是一致的。

由上述分析可见,降水过程中虽然在雷达站的东、西方向都有小的局地对流回波生

成,但主要以移入型的回波为主,其中自河北省涿州一带先后有三次,廊坊北部有一次回波北上影响北京,以NE—SW向和NW—SE向的两条回波带的合并产生的降水最强,中尺度辐合线为强降水的发生提供了有利的触发条件。

#### 5 小结与讨论

(1)这次北京局地暴雨过程是在比较有利的天气背景条件下发生的,500hPa的西风槽、对流层中低层的低涡切变线、地面冷锋是天气尺度的主要影响系统,暴雨发生前,大气的不稳定和当地的水汽条件比较有利,但动力和水汽输送条件欠佳。

(2)发生在北京城区的降水时空分布极不均匀,主要是3个中尺度雨团活动所致,雨团水平尺度约100km,生命史2~3小时,具有明显的中 $\beta$ 尺度系统的特征。由于雨团在较小范围内重复出现,造成了北京城区短时局部强降水。

(3)整个暴雨过程伴随着雷达强对流回波的初生、发展、合并和减弱,降水主要由移入型的回波造成,其中河北涿州有3次、廊坊有1次回波移入北京,而以NE—SW向和NW—SE向的两条回波带的合并产生的降水最强,中尺度辐合线为强降水的发生提供了有利的触发条件。

这次降水过程,无论是主观预报还是客观预报均预报出,但量级明显偏小,这说明对于这类由中尺度系统所引发的局地暴雨的预报还存在很大的困难,仅凭常规的观测资料和数值预报产品还远远不能满足业务的需要,必须充分利用雷达等提供高时空分辨率的探测资料,进行实时监测和跟踪,争取提前1~2小时作出预报,并通过合理畅通的渠道发布预警,为防灾减灾提供及时准确的信息。

#### 参考文献

- 1 齐琳琳,赵思雄.一次热带低压引发上海特大暴雨过程的中尺度系统分析.大气科学,2004,28(2):254~268.
- 2 毕宝贵,刘月巍,李泽椿.2002年6月8~9日陕南大暴雨系统的中尺度分析.大气科学,2004,28(5):747~761.

(下转第58页)

- 3 杨克明,张守锋,张建忠等.“0185”上海特大暴雨成因分析.气象,2004,30(3):25~30.
- 4 李廷福,廖晓农,俞连芬.“98·7”北京大暴雨的中尺度分析.气象,1999,25(5):44~48.
- 5 胡邦辉,张维桓,孙志斌.几种滤波器对地面飏线场的中尺度滤波试验.气象科学,1996,16(2):165~172.
- 6 廖晓农,王华,石增云等.北京地区雷暴大风日  $\theta_e$  平均廓线特征.气象,2004,30(11):35~37.

## A Mesoscale Analysis of a Heavy Rainfall Event on 10 July 2004 in Beijing

Mao Dongyan Qiao Lin Chen Tao Yang Keming

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

### Abstract

A dynamical and mesoscale analysis of a heavy rainfall event on 10 July 2004 in Beijing is made with the routine and densified observation, NCEP data and radar images. It's found that the heavy rainfall occurred under the favorable environmental conditions. Three rain clusters that brought heavy rainfall have the features of meso- $\beta$  system and the convective echoes are the direct producer. The mesoscale convergence line and the mesoscale low provided favorable triggering effect for the occurrence of the heavy rainfall.

**Key Words:** heavy rainfall mesoscale analysis rain cluster

# 《2004年7月12日上海飑线天气过程分析》附图

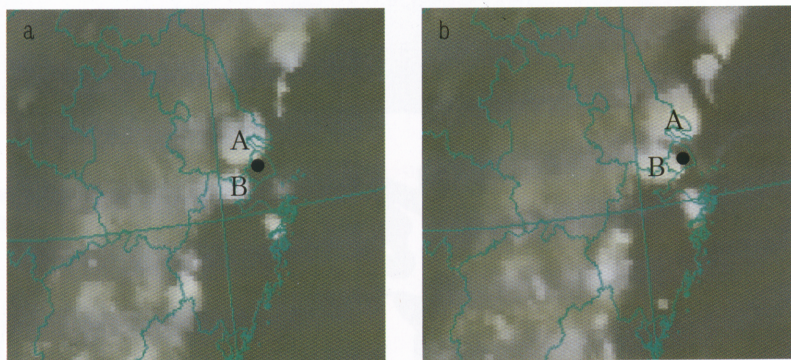


图2 2004年7月12日17时(a)、18时(b)长江下游地区GOES-9水汽云图  
实心圆点是上海, A、B分别为两个对流云团

