

夏季北京地区强地形雨中尺度结构分析<sup>①</sup>

矫梅燕 毕宝贵

(国家气象中心,北京 100081)

## 提 要

利用卫星、雷达资料,分析了2002年6月24日北京地区大暴雨的降水云团演变特征,结果表明:中 $\alpha$ 尺度对流系统减弱过程中经历了中 $\beta$ 尺度云团的发展过程,中 $\beta$ 尺度对流云团是北京西部局地暴雨的影响系统;在观测分析的基础上进行了数值模拟分析:低层东风气流向西移动遇太行山东坡辐合抬升,黄土高原低层偏西风向东移动,受太行山脉强迫倾斜上升,与太行山东坡的地形抬升叠加,在太行山及其东坡产生强烈的上升运动,并形成垂直次级环流圈,同时,低层的偏南气流在燕山南坡上升,而冷空气偏北气流在燕山南坡半山腰下沉,该次级环流圈是北京西部山区强降水产生和维持的主要物理机制。

**关键词:** 地形 中尺度 暴雨 次级环流

## 引 言

北京所处的地理环境很特殊,东南是平缓地向渤海倾斜的平原,西靠太行山余脉,北有燕山和军都山,从西向东,地形分布依次为山地、丘陵和平原,海拔高度从二千多米降到几十米,山地和平原之间过渡急剧,界限清晰。太行山、燕山、军都山对北京天气的影响早已被预报员所重视。夏季北京地区低层盛行的东南风和西南风,携带大量水汽从海洋输送到大陆,其方向几乎与太行山、燕山的走向垂直,所以当水汽到达北京之后由于受到平均高度近千米的弧形山脉的阻挡,迫使水汽向太行山东麓、燕山南麓爬升,常使暴雨中心落在山前地区。地形的复杂多变造成了北京地区天气状况的多样性,特别是暴雨等强对流天气,由于其尺度小,生命史较短,形成的物理机制复杂,对他们的准确预报难度很

大。

虽然一些作者对北京地区暴雨<sup>[1~4]</sup>和长江流域暴雨<sup>[5]</sup>进行了分析和研究,但是本次局地强降水的中尺度结构还是值得做深入分析,从而使得预报员以后遇到类似的天气时能够较好的把握。因此,本文试图用双向嵌套MM5中尺度模式对2002年6月24日(简称“0624”)强降水个例进行高分辨率模拟分析,并与实况进行对比研究。

## 1 “0624”北京地区强地形雨的降水特征

2002年6月24日08时~25日08时,太行山东侧的迎风坡上出现了强降水,尤其在北京西部山前地区24日半夜至25日08时出现了暴雨,局地出现了大暴雨,北京地区有5站大于50mm,最大雨量出现在门头沟(158mm)。本次降水局地特征非常明显,距门头沟仅30km的西斋堂的降水量不足

① 本文由北京市自然科学基金重点项目:北京城市化发展对气象条件影响的机理研究(项目编号:8051002)资助。

1mm。多个大降水中心分布在向东南开口的局地山坡上,表现为强地形雨特征。另外门头沟的单站逐时降水主要集中在24日23时至25日02时的4个小时内,22时开始降水,1小时后,降水量猛增到 $27.7\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $42.8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $44.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水强度,24日24时~25日02时的降水强度达 $114.8\text{mm}\cdot(3\text{h})^{-1}$ 。此局地大暴雨水平尺度不足100km,具有典型的中小尺度特征,并且具有一定的突发性、阵发性。

## 2 中尺度暴雨云团的 TBB 分析和雷达回波特征

首先用GMS卫星每小时一次的卫星云图来考察一下造成这次暴雨的中尺度系统。为了突出云图上的中尺度对流系统,绘制了红外云图的云顶黑体辐射温度(TBB)等值线图,图中只绘出 $\text{TBB}\leq -20^{\circ}\text{C}$ 的等值线。

GMS红外云图表明(图1),中 $\beta$ 尺度对流云团是给北京西部带来局地暴雨的影响系统。在24日14时至25日05时这段时间

内,中 $\alpha$ 尺度对流系统减弱过程中经历了中 $\beta$ 尺度云团的发展过程。24日14时,在内蒙古西部高地和太行山脉各有一个对流云团(A和B)。A云团在14~17时基本没有得到发展,但B云团在此期间迅速发展( $\text{TBB}\leq -50^{\circ}\text{C}$ ),从随后的云图发现,B云团是导致此次局地强降水的主要云团,因此,以下着重分析B云团的演变过程。B云团的有效直径在100km以上,按照Orlanski中尺度系统分类法,属于中 $\alpha$ 尺度,B云团中存在多个中 $\beta$ 尺度云团。本次强降水发生在B云团总体减弱,但其中中 $\beta$ 尺度云团发展过程中。从逐时TBB演变可说明这个观点,17时以后,B云团范围增大,但云顶温度逐渐升高,这说明B云团呈减弱趋势。20时(图1a)开始,B云团范围缩小,在太行山东坡有中 $\beta$ 尺度对流云团发展,随后的几个小时(图1b、c)内云团范围略有扩大,强度未有发展( $\text{TBB}\leq -45^{\circ}\text{C}$ )。25日02时(图1d)以后,中 $\beta$ 尺度云团强度减弱,25日04时云顶温度高于

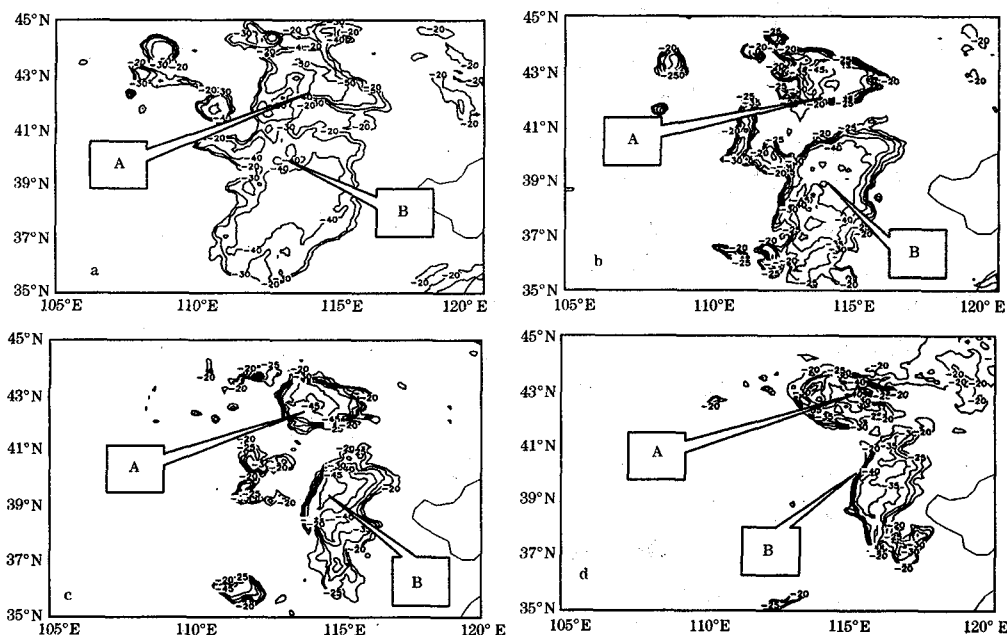


图1 2002年6月24日14时~25日02时TBB( $\text{TBB}\leq -20^{\circ}\text{C}$ )演变图  
(a)20:30; (b)22:30; (c)00:30; (d)02:30

-40℃,强降水明显减弱。

雷达回波观测表明(图略),北京地区长时间维持云顶较低的片絮状的层状云降水回波,回波顶高度限制在中层逆温层顶附近(5~6km)。但是在山坡地区有发展较高的对流回波顶的块絮状回波,雷达观测揭示出门头沟大暴雨回波发展最强时刻,最高云顶虽然曾一度达到近8km,突破了中层逆温层顶,但40dBz强回波高度却始终在4km以下。

上述 TBB 和雷达资料分析显示,引起此次强降水的对流并不旺盛,因此,可以推测,地形和低层的动力抬升可能发挥重要作用。

### 3 数值模拟分析

为了进一步分析此次强地形雨的发生发展过程,以下将采用数值模拟手段研究其形成机理,并就太行山、燕山地形对强降水的影响进行深入分析。

本文利用 MM5 模式,采用双向三重嵌套网格对这次过程进行模拟研究。模式区域的中心位置是 39°N、116°E,模式区域在垂直方向分 24 层,三重区域的水平格点数分别为:95×120、91×91、82×91;相应的水平格距分别为:45km、15km、5km。

#### 3.1 暴雨的中尺度结构分析

在 850hPa 流场上,24 日 17 时(图 2a),东南气流向北运动遇燕山山脉阻挡转向偏西方向移动,偏西气流遇太行山阻挡向南运动,从而形成中尺度涡旋,这种气旋的生成是由气流方向和地形决定的。随着偏南气流的加强,中尺度涡旋逐渐减弱,于 23 时(图 2b)消失,导致东南开口的迎风坡上的辐合加强。25 日 02 时在燕山北坡产生背风气旋,25 日 05 时以后,东南风转为西南风,山前辐合抬升作用减弱,导致山前局地强降水减弱。在

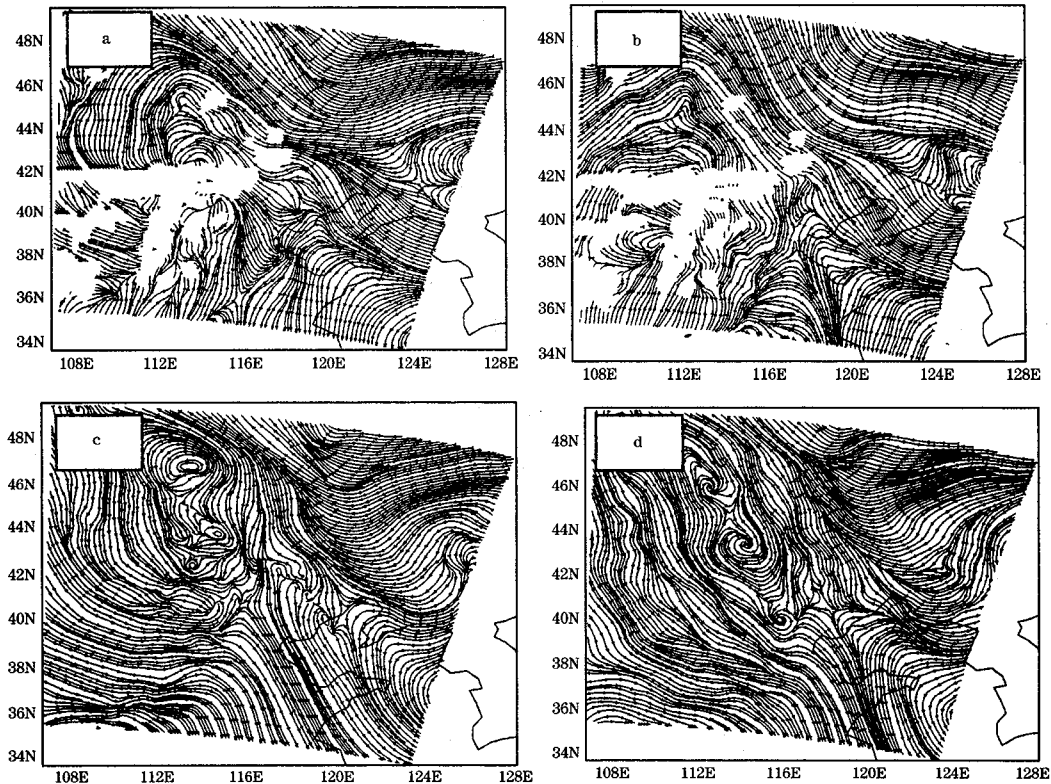


图2 控制试验 850hPa 流场和 700hPa 流场

(a)24 日 17 时 850hPa,(b)24 日 23 时 850hPa,(c)24 日 17 时 700hPa,(d)24 日 23 时 700hPa

700hPa流场上,24日17时(图2c),中尺度辐合中心在燕山南坡发展加强,24日23时(图2d),该中尺度辐合中心发展成为中尺度气旋,导致了山前强降水的爆发。25日05时,中尺度气旋减弱消失,对应强降水减弱。在500hPa上也有中尺度气旋生成,但生成时间偏晚(25日02时),强度偏弱,持续时间偏短(1h)。从以上三层流场可发现,暴雨是发生在大涡旋基础上的,由大涡旋分裂产生的小涡旋是产生降水的直接原因,与上述云团分析是对应的。 $\alpha$ 尺度云团对应大涡旋,而 $\beta$ 尺度云团对应小涡旋。同时还发现,涡旋向高层减弱,这说明系统发展并不深厚。

### 3.2 动力条件分析

从散度的经度-高度剖面图可知,24日17时,太行山区上空中层辐散加强,低层辐合也略有加强,24日20时(图3a),辐合、辐

散区向高层伸展,强度迅速加强,在太行山及其东坡出现低层强辐合。25日02时,低层辐合、中层辐散都有所减弱。在涡度剖面图上(图略),24日20时,太行山顶有正涡度强烈发展,并在山麓处有正涡度生成。23时,山顶上的正涡度中心爆发性增长,并移向半山腰,同时,在山麓处的正涡度中心也快速发展。25日02时,山前400hPa以下为强涡度柱,05时以后,强涡度中心移向下层的中层,导致山前的强降水减弱。在垂直速度剖面图上,24日20时(图3b),垂直上升运动在太行山脊及东坡强烈发展,最大上升运动达到 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在随后的3h内,上升运动有所减弱,但23时以后,垂直上升运动在山前迎风坡上发展加强。25日05时以后上升运动减弱,对应的强降水减弱。

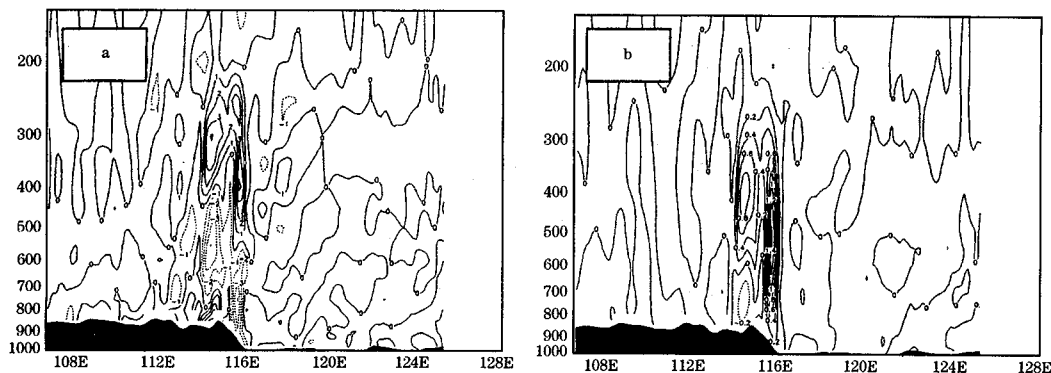


图3 24日20时控制试验过暴雨中心沿 $39.92^{\circ}\text{N}$ 经度-高度垂直剖面图

(a)散度(单位: $10^{-4}\text{s}^{-1}$ );(b)垂直速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 3.3 位涡分析

从850hPa、700hPa和500hPa位涡分析可见,太行山东侧是位涡的大值中心,位涡演变过程与降水发展有很好的—致性。从位涡的垂直剖面图(图4)可知,中低层位涡是从高层下传而来,24日17时,中低层位涡很小,18时(图4a)高层位涡快速下传至中低层,中低层位涡在向东移动中加强,24日20时(图4b),位涡强度达到4.0PVU,该强位涡中心一直维持在太行山东坡的中低层,使

迎风坡出现局地大暴雨。25日05时以后,低层位涡逐渐减弱,中层位涡中心向东移动,强降水迅速减弱。从位涡分析可知,低层位涡在降水中的作用很大,对降水预报具有很好的指导意义。

### 3.4 地形对强降水的作用

从风场的经度-高度剖面图(图5a)可知,太行山以东700hPa以下为一致的偏东风,东风气层高度向太行山逐渐降低,而在东风气层之上为较强的西风气流,低层东风气流

向西移动遇太行山东坡辐合抬升,与此同时,黄土高原低层偏西风向东移动,受太行山脉强迫倾斜上升,与太行山东坡的地形抬升叠加,在太行山及其东坡产生强烈的上升运动,并形成垂直次级环流圈,该次级环流圈是北京西部山区强降水产生和维持的主要物理机制。

在风场的纬度-高度剖面图(图 5b)上也

有一个垂直次级环流圈。低层的偏南气流在燕山南坡上升,而冷空气偏北气流在燕山南坡半山腰下沉,这样就形成了在燕山山前上升、半山腰下沉的南北向的垂直次级环流,该次级环流决定了强降水发生在山麓下而非山坡上,这可以部分解释门头沟降水量 158mm,而西斋堂降水量不足 1mm 的原因。

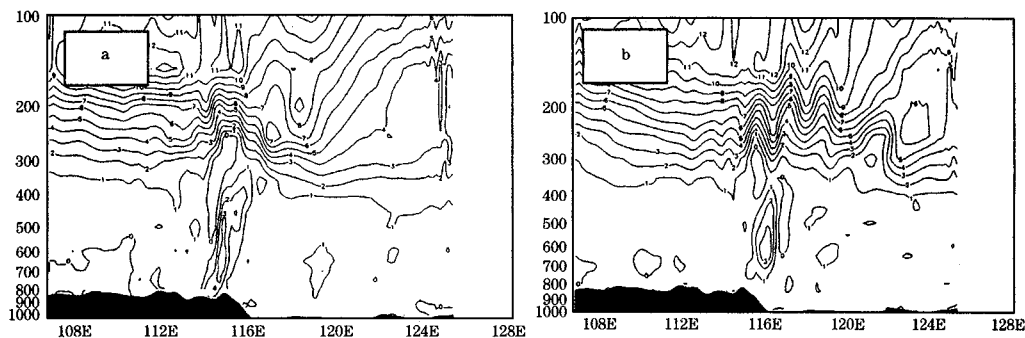


图 4 控制试验过暴雨中心沿 39.92°N 位涡经度-高度垂直剖面图  
(a)24 日 18 时;(b)24 日 20 时(单位:PVU)

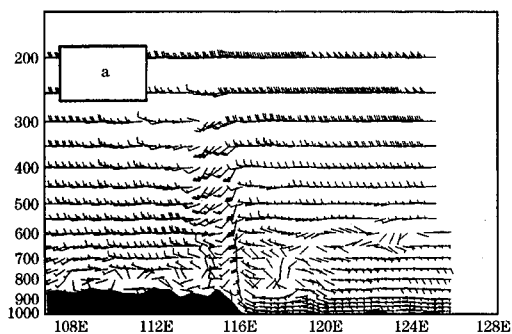


图 5a 2002 年 6 月 24 日 20 时过暴雨中心沿 39.92°N  $u, w * 25$ (垂直速度  $w$  放大 25 倍和水平  $u$  风)合成流场经度-高度垂直剖面图

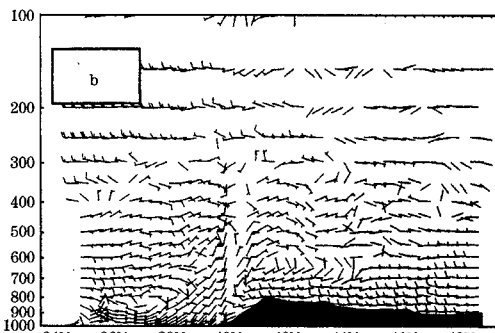


图 5b 2002 年 6 月 24 日 20 时过暴雨中心沿 116.12°E  $v, w * 25$ (垂直速度  $w$  放大 25 倍和水平  $v$  风)合成流场纬度-高度垂直剖面图

#### 4 小结与讨论

综合以上分析,可得到以下结论:

(1) 2002 年 6 月 24 日 20 时北京地区降水局地特征非常明显,多个大降水中心分布在向东南开口的局地山坡上,表现为强地形雨特征。具有典型的中小尺度特征,并且具有一定的突发性、阵发性。

(2) 中  $\alpha$  尺度对流系统减弱过程中经历了中  $\beta$  尺度云团的发展过程,中  $\beta$  尺度对流云团是此次北京西部带来局地暴雨的影响系统。TBB 和雷达资料分析显示,引起此次强降水的对流并不旺盛,因此,可以推测,地形和低层的动力抬升可能发挥重要作用。

(3) 在 850hPa 流场上东南气流向北运

动遇燕山山脉阻挡转向偏西方向移动,偏西气流遇太行山阻挡向南运动,从而形成中尺度涡旋,导致东南开口的迎风坡上的辐合加强,这种气旋的生成是由气流方向和地形决定的。

(4) 太行山以东 700hPa 以下为一致的偏东风,东风气层厚度向太行山逐渐降低,而在东风气层之上为较强的西风气流,低层东风气流向西移动遇太行山东坡辐合抬升,与此同时,黄土高原低层偏西风向东移动,受太行山脉强迫倾斜上升,与太行山东坡的地形抬升叠加,在太行山及其东坡产生强烈的上升运动,并形成垂直次级环流圈,该次级环流圈是北京西部山区强降水产生和维持的主要物理机制。同时,低层的偏南气流在燕山南坡上升,而冷空气偏北气流在燕山南坡半山腰下沉,这样就形成了在燕山山前上升、半山

腰下沉的南北向的垂直次级环流,该次级环流决定了强降水发生在山麓而非山坡上,这可以部分解释门头沟降水量 158mm,而西斋堂降水量不足 1mm 的原因。

#### 参考文献

- 1 李志楠,李廷福. 北京地区一次强对流大暴雨的环境条件及动力触发机制分析. 应用气象学报, 2000, 11(3): 304~311.
- 2 王迎春,钱婷婷,郑永光等. 对引发密云泥石流的局地暴雨的分析和诊断. 应用气象学报, 2003, 14(3): 277~286.
- 3 毕宝贵,李晓莉,李泽椿. 1997年7月19日影响北京地区的暴雨个例分析. 气象, 2004, 30(6): 18~23.
- 4 郭金兰,杜辉,刘凤辉等. 一次地形作用产生的强降雨过程分析. 气象, 2004, 30(7): 12~17.
- 5 程麟生,冯伍虎. “98.7”突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟. 大气科学, 2001, 25(4): 465~478.

## Mesoscale Structure Analysis of Topography-induced Heavy Rainfall in Beijing in Summer

Jiao Meiyun Bi Baogui

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

#### Abstract

The characteristics of cloud cluster which brought the heavy rainfall in Beijing on June 24th 2002 is studied by use of satellites and radar data. The results show that during the weakening of meso- $\alpha$  convective systems, they may go through the evolution of meso- $\beta$  scale convective cloud cluster systems which directly led to the heavy rainfall in the west of Beijing. Numerical simulation is done on the base of observational data analysis. Low-level eastern wind converged and rose on the eastern slope of Taihang Mountain where the low-level eastern wind moving westward from the Loess Plateau also rose slantwise by effects of topographic forcing, so strong vertical ascending motion generated on the Taihang Mountain and its eastern slope a secondary vertical circulation appeared. At the same time, low-level southern wind was ascending along the south slope of Yan Mountain where the cold air brought by northern wind was subsiding on the hillside, the forthcoming of this secondary vertical circulation was the main physical mechanism leading and maintaining the heavy precipitation on the west mountainous region of Beijing.

**Key Words:** topography mesoscale heavy rainfall secondary circulation