

2004年7月10日北京局地暴雨数值模拟分析

毛冬艳 乔林 陈涛 徐辉 杨克明

(国家气象中心,北京 100081)

提 要: 利用中尺度数值模拟结果,对2004年7月10日北京局地暴雨的中尺度系统的结构特征及其发生发展的原因进行了初步分析,结果表明:MCS在对流层中低层表现为中尺度辐合线和低压,在其发展强盛阶段,具有低层辐合、高层辐散的高、低空最佳配置以及暴雨区上空垂直上升运动强烈发展的结构特征;暴雨发生前,地表感热、潜热通量等边界层非绝热过程造成气温升高、气压下降、湿度增大,影响对流层中低层风场的分布,对暴雨的发生发展起了重要的作用。

关键词: 局地暴雨 中尺度数值模拟 MCS 敏感性试验

Numerical Simulation and Analysis of a Local Storm in Beijing on 10 July 2004

Mao Dongyan Qiao Lin Chen Tao Xu Hui Yang Keming

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The mesoscale structure and development reasons for a local storm in Beijing on 10 July 2004 are investigated by using the mesoscale numerical simulation. The results indicate that the MCS are the mesoscale convergence line and low pressure system in the mid- and low-level, with the convergence in the low level, divergence in the high level and strong ascending motion during the strong development stage. Before the heavy rain, the surface sensible and latent heat fluxes resulted in the temperature increase, pressure decrease and the water vapor accumulation, which influenced the wind distribution and played an important role on the formation and development of the local storm.

Key Words: local heavy rainfall mesoscale numerical simulation MCS sensitivity test

引 言

2004年7月10日下午16—20时4个小时内,北京市出现了几十年以来罕见的局地强暴雨天气。超过50mm暴雨区和大暴雨区位于石景山、丰台、门头沟和中心城区,城区平均降雨量为57mm,雨量较大的地点有:紫竹院125mm、天坛109mm、丰台96mm、天安门95mm。其中丰台气象台1小时最大雨量达52mm,10分钟达23mm。这场暴雨强度大,雨势猛和降雨历时短并集中,为北京市20年来罕见的突发性局地暴雨。因此,造成城区道路积水严重,地势低洼路段和立交桥下积水较深,多辆汽车熄火浸泡水中,40多处地段交通严重受阻。

北京特殊的地理位置和复杂的地形造成了其天气的多样性,特别对于暴雨、强对流等尺度小、生命史短的天气,预报难度则很大。李津等^[1]对2005年6月25日夜北京城区由中尺度系统造成的大到暴雨过程进行了分析,提出了此类天气的预报着眼点。毕宝贵等^[2]研究指出,凝结潜热对北京暴雨的发生发展起了重要作用,而地形也起了主要作用,低层潜在不稳定能量的储备和输送是暴雨发生不可缺少的条件。对于北京“04710”局地暴雨天气过程,毛冬艳等^[3]利用地面加密观测资料和雷达、卫星探测资料,分析了暴雨的中尺度特征,指出这次暴雨是3个中 β 尺度雨团活动所造成的,地面中尺度辐合线和中低压是降水触发系统。孙继松等^[4]对该暴雨进行了诊断分析,揭示了城市边界层的作用。何立富等^[5]利用模式高分辨率输出资料,探讨了暴雨的 M_pCS 系统的结构及其触发机制。

本文之目的旨在这些研究的基础上,利用非静力MM5中尺度模式获取较高分辨率的资料,来分析中尺度系统的结构特征,并进

行不同的敏感性数值试验,以探讨引发这次强降水的可能因子及其物理机制,为实时暴雨预报提供参考依据。

1 模拟方案选择和试验设计

1.1 方案选择

利用中尺度非静力MM5 V3.7模式,对2004年7月10日北京突发性暴雨过程进行了数值模拟。模式设计主要技术要点如下:

模拟采用三重嵌套网格,模拟区域的中心位置定于北京暴雨中心附近($40^{\circ}N, 116^{\circ}E$),各区域水平分辨率分别为45km、15km和5km,网格点数分别为 120×120 、 121×121 和 100×100 。模式的地形和下垫面使用了 $30' \times 30'$ 地形资料和24类地表特征资料。垂直方向为 σ 坐标,共有23层。初始场资料来源于NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的再分析场,常规资料使用12小时间隔的探空资料和3小时间隔的地面加密观测资料,使用的非常规资料为天津塘沽新一代多普勒天气雷达资料。

微物理过程采用混合相方案和REISNER2方案,积云对流参数化方案分别使用BM、GRELL方案,最内重不使用积云对流方案。第一重的侧边界条件采用随时间变化边界方案,第二和第三重的侧边界条件采用松弛边界方案。行星边界层方案均使用BLACKADAR方案。辐射方案均采用TRMM方案。模拟时间步长为120s,模式积分起始时间是7月9日1200UTC。

1.2 试验设计

本研究设计的一些试验如表1显示,其中,控制试验使用真实初始场并包含“全”物理过程;地形试验与控制试验的唯一差别是将北京附近地形削去1/2;凝结潜热试验与控制试验的唯一差别在于没有考虑降水凝结潜热的作用;地表热通量试验与控制试验的差别是去

掉地表热通量的影响,试图揭示边界层非绝热 物理过程对强降水造成的可能影响。

表 1 数值模拟试验的设计

试验名称	地形	地表热通量	凝结潜热	试验目的
控制试验	有	有	有	再现天气过程
地形试验	削去 1/2	有	有	考察降水对地形的敏感程度
凝结潜热试验	有	有	无	考察凝结潜热对造成强降水的作用
地表热通量试验	有	无	有	考察地表热通量对降水造成的影响

2 控制试验的模拟结果与实况对比分析

模拟结果与客观分析对比表明,最外重网格域 D01 中模拟的 500hPa 高度场较好地再现了客观分析的大尺度环流特征(图 1a、1b),对流层中低层的西南风和偏东风也与观测实况非常相似(图略)。7 月 10 日 20 时的 6 小时降水模拟结果显示(图 1c、1d),模式基本模拟出了北京城区及其以南地区的降水落区和强度,但 $\geq 10\text{mm}$ 的降水范围偏小,中心强度偏强,其中,对于北京城区的强降水

位置偏西约 20km,中心强度超过了 100mm,实况观测最强为 86mm;同时,对城区东北部的降水区模拟也偏西偏强。从每小时模拟的结果来看,降水自 10 日午后 14 时前后开始,两个强降水区主要出现在城区东北部和西部,水平尺度约几十公里,中心强度 $\geq 50\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,其中城区的强降水出现在 18 时以后(图 1e),强降水出现的时间和强度与实况略有差异。总之,此次模拟的结果较好地再现了“7·10”北京局地暴雨过程,可为研究提供合理可用的高时空分辨率资料。

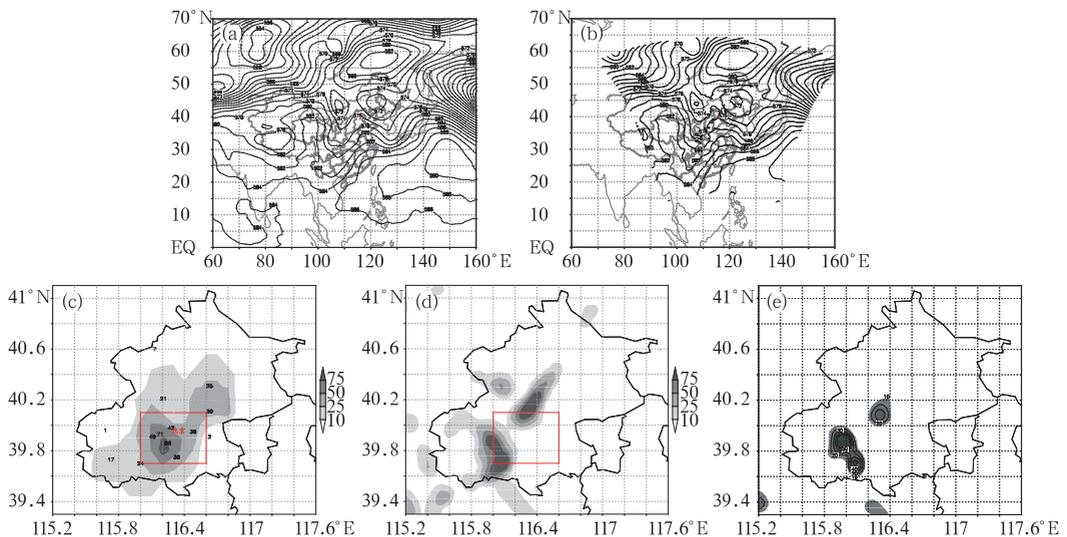


图 1 2004 年 7 月 10 日 08 时 500hPa 高度场(a)客观分析;(b)D01 模拟;14—20 时 6 小时降水量 (c)实况;(d)模拟;(e)18—19 时 1 小时模拟降水量(单位:mm)

3 中尺度系统的结构特征

3.1 水平结构

由模拟的较高分辨率的输出结果可看出,造成此次北京局地强降水主要是偏东和偏南两支气流在北京城区汇合并形成中尺度辐合线和低压,它们主要出现在对流层中低层。在模拟时段内过暴雨中心 u 风的演变可见,17 时之前,降水区上空 u 风很弱,18 时(图 2a),700hPa 以下东风迅速建立并加强,风速中心在 800~900hPa 之间,风速 $\geq 6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,东风带与暴雨区正好吻合。19 时,东风在垂直方向上进一步发展,顶层已接近 600hPa 附近,强风速中心的厚度也明显加大。该气流的建立并加强和北京城区降水出

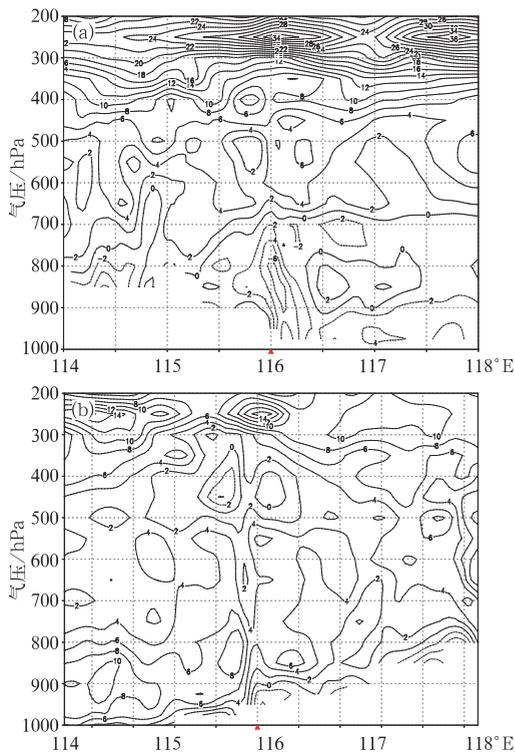


图 2 2004 年 7 月 10 日 18 时沿 39.9°N 的 u 风(a)和沿 116.0°E 的 v 风(b)垂直剖面图
单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 基线上实心黑三角代表暴雨区

现的时段相一致。可见,700hPa 以下偏东气流起了主要的作用^[6]。

与 u 风不同的是,降水前后北京附近一直被深厚的偏南气流控制,对流层低层南风分量平均是 $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。15 时开始,河北中部低层偏南风开始加强并向北推进。18 时(图 2b),在北京南部建立了一条中心强度超过 $8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的南风大值区,而在降水区附近低层出现了范围较小的东北风,与偏南气流在城区一带交汇,为降水发生发展提供了较好的动力和水汽条件。

从风场的水平分布可见,17 时开始,天津大部到北京中东部开始变为弱偏东气流,高空槽前从华北平原中部到北京中南部的偏南气流加强,上述两支气流在北京城区东北部汇合,形成一条水平尺度不足 50km 的暖式切变线,暴雨正好发生在切变线附近。18 时,偏东和偏南气流均明显加强,在城区西部再次出现这种辐合区,城区强降水发生,中心强度在 $50\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上。

3.2 垂直结构

对流层高、低层的环流配置能更清楚地揭示中尺度系统的结构及其发生发展。模拟结果显示,18 时在 925hPa 上偏南、偏东和偏北三支气流在北京城区附近汇合,形成一中尺度气旋性涡旋中心,城区降水开始。19 时(图 3a),北京南部与河北交界处出现一中尺度低空急流,急流带约 50km,范围较小,急流中心风速达 $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;在 200hPa 上(图 3b),北京西南部山区出现最大风速达 $32\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的中尺度高空急流,这种有利的高低空配置促使中尺度系统的发展加强,北京城区强降水发生在高空急流入口区右前方强辐散、低空急流出口区左前方的强辐合区中。

从沿 39.9°N 经北京城区暴雨中心的涡度垂直剖面图上(图略)可看出,19 时前,暴雨区上空整层为负涡度区,19 时,700hPa 以

下出现明显正涡度,中心位于950hPa上,强度大于 $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$;700hPa以上为负涡度区,中心在400hPa~500hPa之间,中心小于 $-8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,并呈垂直分布,中心在暴雨区东侧。20时,正涡度区向上发展,但强度明显减弱。

在散度的垂直分布图上,17时,900hPa的辐合区开始发展。以后,低层辐合、高层辐散进一步加强,19时达最强(图3c),其中,600hPa以下为强辐合区,强度大于 $-8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的中心出现在700hPa上,600hPa以上为辐散区,强度大于 $10 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 中心在

400hPa上。低层辐合、高层辐散有利于中低层高温高湿的气流被抽吸到高层,从而增大局地对流不稳定性^[7],辐合、辐散中心下方是暴雨区。

垂直速度也在17时以后迅速加强。19时(图3d),暴雨区上空的上升运动呈柱状分布,一直伸展至对流层顶,反映 β 中尺度对流发展旺盛,强中心位于600hPa上,极值达 $3 \text{ m} \cdot \text{ s}^{-1}$ 。其水平尺度约50km,与暴雨区范围相当。

由此可见,中尺度扰动源中低层中尺度辐合线和辐合中心触发了强暴雨的产生。

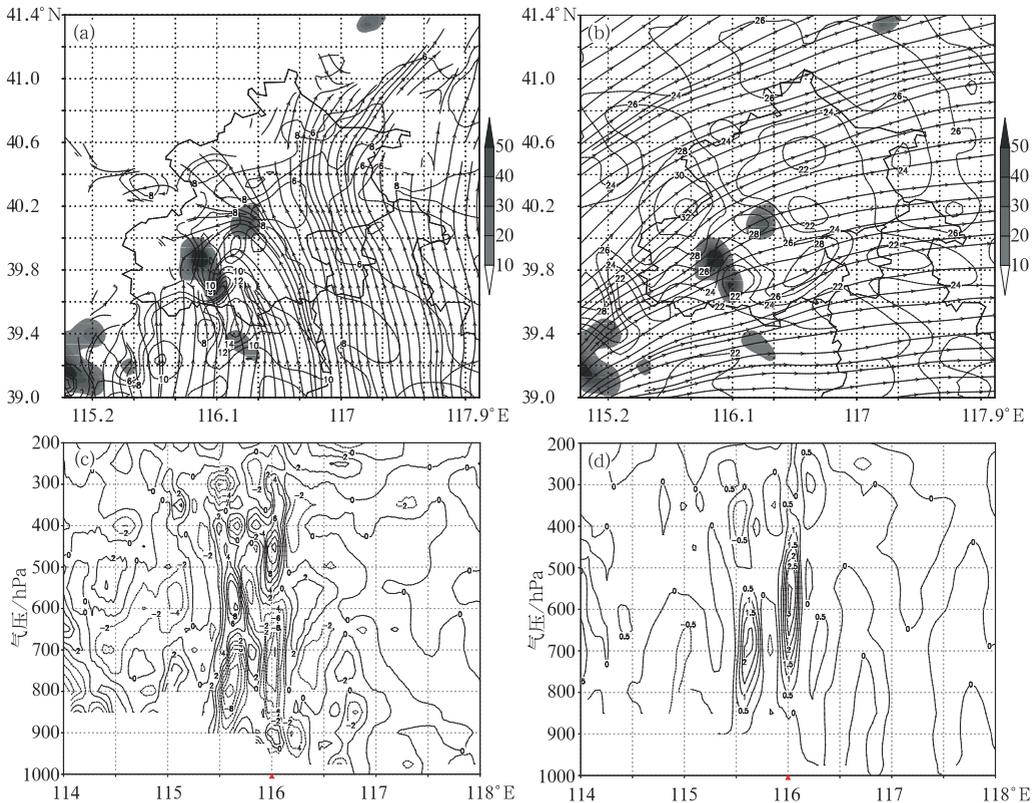


图3 2004年7月10日19时925hPa(a)和200hPa(b)流场和等风速线(阴影区为1h降水量);过暴雨区沿39.9°N的散度(c)和垂直速度(d)经度-高度垂直剖面(散度单位: 10^{-4} s^{-1} ;垂直速度单位: $\text{m} \cdot \text{ s}^{-1}$)

4 敏感性试验分析

从敏感性试验模拟的 24 小时降水量可看出,相对于控制试验(图 4a),将北京附近的地形削去 1/2 后(图 4b),对降水影响不大;不考虑凝结潜热的作用(图 4c),降水区域和强度都发生了较大的变化,北京城区的降水范围明显偏小,强度也有所减弱。试验表明,地表热通量对这次强降水的影响更为

明显,在不考虑地表感热和潜热通量的情况下(图 4d),北京强降水几乎模拟不出,说明地表热通量是北京局地强降水的主要影响因子。可见,地表通量等非绝热过程对暴雨中尺度系统的形成和发展具有重要的作用^[8-9]。它不仅影响地表能量和水分的平衡,还会影响深对流活动的因子发生,从而影响对流系统的发生发展。以下讨论有无地表热通量影响试验,来对比分析边界层非绝热过程对这次中 β 尺度系统发生发展的作用。

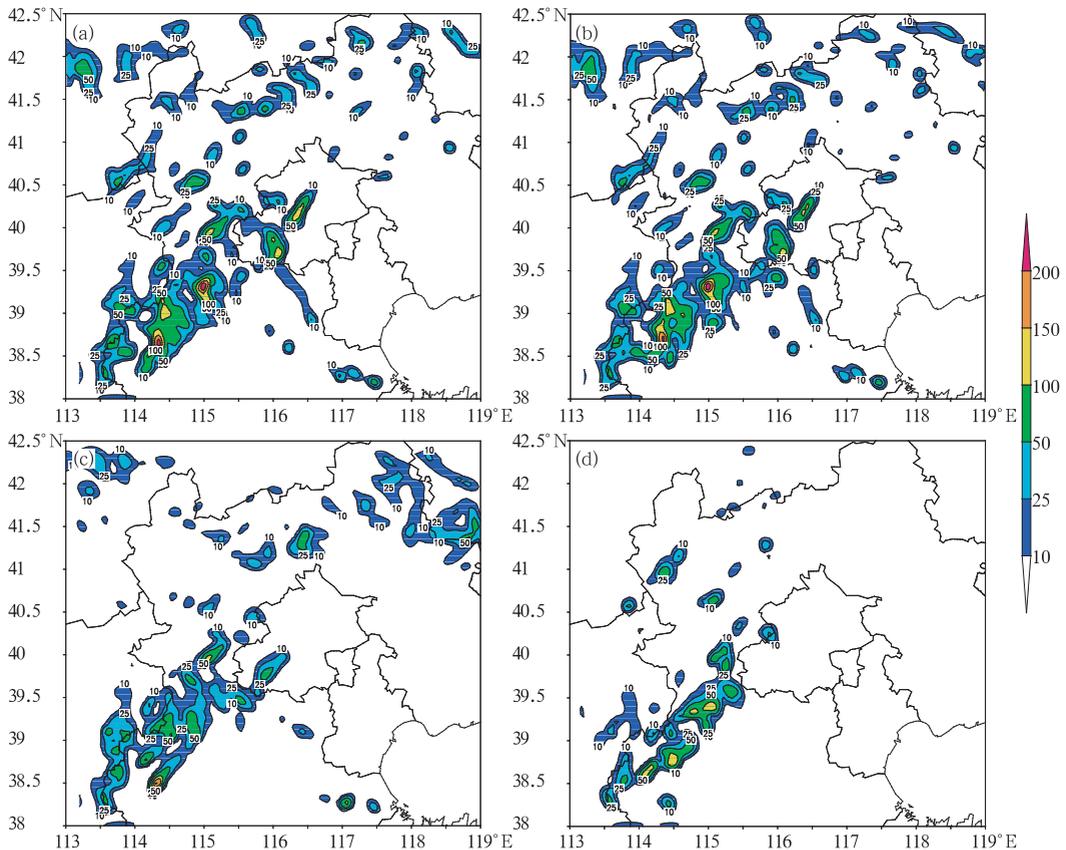


图 4 2004 年 7 月 10 日 20 时 24 小时降水量(单位:mm)

(a)控制试验;(b)地形试验;(c)凝结潜热试验;(d)地表热通量试验

4.1 与控制试验结果的对比

控制试验中边界层物理过程采用的是 Eta 边界层参数化方案,地表温度采用的是

Noah Land-surface Scheme 方案,对形势和降水的合理模拟说明这些物理过程对本次 MCS 发生发展具有很好的反映能力。在地表热通量敏感性试验中,模式积分一开始就

去掉了地表通量的影响。

由上述两试验模拟的降水对比分析可见,地表通量对MCS的发生发展有很大影响。由于地表热通量试验一开始就未考虑地表通量影响,该因子首先影响了前期近地层有利的环境场形成,进而对对流层中低层形势造成影响,使原有利的MCS发生发展的环境条件遭受破坏,使强降水不能发生。正如孙建华等^[10]指出的,边界层的物理过程对暴雨对流系统启动是不可缺少的。下面就其影响过程作进一步分析,以说明地表对中尺度系统的影响。

4.2 地表热通量对MCS影响的分析

图5是控制试验模拟的暴雨区附近 3×3 个网格点平均地表感热、潜热通量逐时演变图。图中,从7月9日20时到10日06时,地表感热为负值,起了冷却作用;然后其迅速增大,到11时达到峰值,强度约为 $160 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,此后开始逐渐减弱。而地表潜热一直为正值,表明主要起加热作用,白天其变化与地表感热一致,但在夜间却很弱。

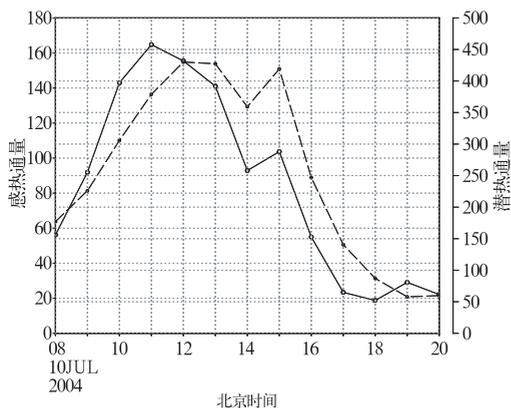


图5 控制试验模拟的暴雨附近 3×3 个网格点平均地表感热、潜热通量演变

实线为感热通量;虚线为潜热通量;单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

地表通量主要在降水发生前对近地面气压场和温湿场产生影响,对对流启动及中尺

度系统形成起重要作用。从控制试验的海平面气压和地表热通量试验海平面气压差值(图6a)可看出,7月10日午后14时,由于地表非绝热过程的加热作用,北京城区开始出现负压,变压值平均为 $1 \sim 2 \text{ hPa}$,并一直维持到18时强降水开始。从两个试验中海平面气压场逐时演变可知(图略),在14时前,两个试验模拟的气压场比较相近(图略),14时开始,控制试验中北京城区开始出现地面中尺度低压,低压中心约 1001 hPa ,在地表热通量试验中没有出现该形势,气压场无变化仍较高。降压区是地面非绝热加热过程致使气温偏高所致。由上述两试验的地表温差分布(图6b)可见,14时开始北京城区的正变温区同负压区相对应,平均变温幅度在 $2 \sim 4^\circ \text{C}$,伴随着降水的产生,正变温变为负变温。这是由于近地层气温升高,使空气膨胀,密度减小,造成气压降低,地表热通量使北京城区升温降压,导致城区南部和东部的气压梯度加大,偏南和偏东两支气流加强并在城区附近形成辐合线,两支气流使城区的水汽含量比地表通量试验中明显变大,城区一直为正比湿区控制,平均偏大约 $3 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

近地层温湿场和风场的变化将进一步影响大气垂直方向的发展。地表热通量的作用随高度增加而减小,以下主要分析对流层中低层的作用。与控制试验所模拟的 u 、 v 风场对比可看出(图略),不考虑地表热通量 u 、 v 风场的分布与控制试验差别较大,就 u 风场而言,无地表热通量时,19—20时仅在对流层低层北京西部山区出现了范围较小的偏东风,北京地区一直为偏南气流所控制,风速为 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,低层无偏北风。由此可见,地表非绝热加热的热力抬升作用,使得对流层低层建立偏东风,偏东和偏南两支气流不断加强并在北京城区交汇,加上弱偏北气流的入侵,触发了强降水的发生。

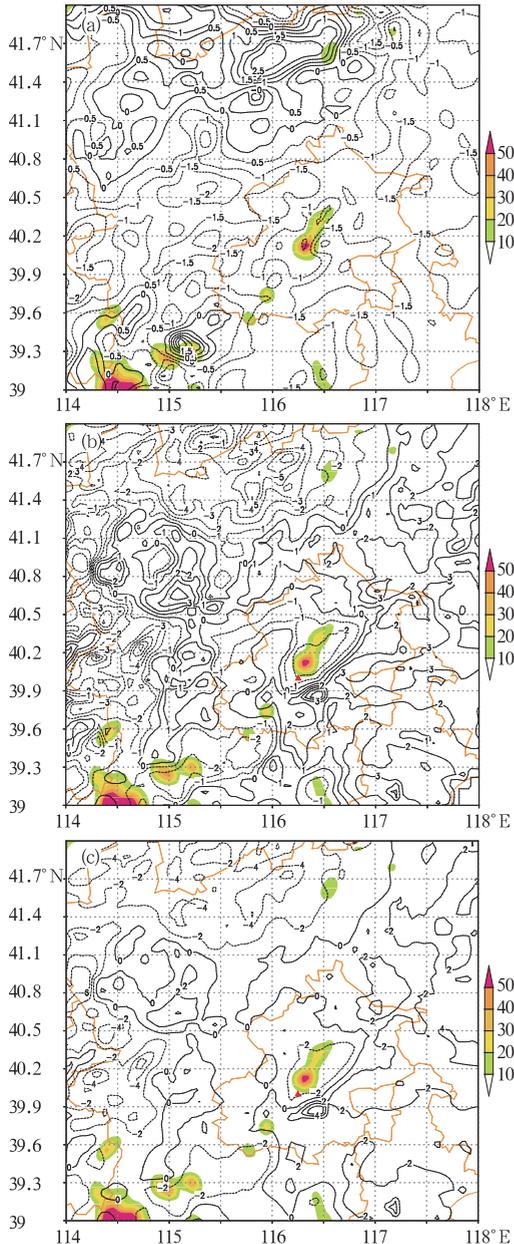


图 6 2004 年 7 月 10 日 18 时控制试验与地表热通量试验的气压差(a);地表温度差(b);2m 比湿差(c)分布(图中阴影区为 1 小时降水量)

5 小结和讨论

(1) 中尺度模式 MM5 的模拟结果较为真实地反映了天气形势和降水实况,较好地

再现了“7·10”北京局地暴雨过程,为研究提供了合理可用的高时空分辨率的资料。

(2) 造成这次北京局地强降水的中尺度系统在对流层中低层主要是由偏东、偏南两支气流组成的中尺度辐合线和低压,在其发展强盛阶段,具有低层辐合、高层辐散的高、低空最佳配置以及暴雨区上空垂直上升运动强烈发展的结构特征,暴雨产生在中尺度高空急流入口区右前方的强辐散、低空急流出口区左前方的强辐合区中。

(3) 对地形、凝结潜热和地表热通量的敏感性试验分析表明,地表热通量是影响本次暴雨的主要因子。暴雨发生前,地表感热、潜热通量等边界层非绝热过程造成气温升高、气压下降、湿度增大,进而影响对流层中低层的风场,对暴雨的发生发展起了重要作用。

参考文献

- [1] 李津,王华.北京城区一次大到暴雨的预报难点分析[J].气象,2006,32(2):92-97.
- [2] 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[J].气象,2004,30(6):18-23.
- [3] 毛冬艳,乔林,陈涛,等.2004年7月10日北京暴雨的中尺度分析[J].气象,2005,31(5):42-46.
- [4] 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.
- [5] 何立富,陈涛,李泽椿,等.2004年北京“7.10”暴雨中 β 尺度对流系统分析[J].气象与减灾研究,2006,29(1):7-16.
- [6] 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.
- [7] 李红莉,沈桐立,谢有才.一次梅雨锋暴雨的模拟与诊断分析[J].气象,2005,31(3):22-27.
- [8] 毕宝贵,刘月巍,李泽椿.地表热通量对陕南强降水的影响[J].地理研究,2005,24(5):681-691.
- [9] 蒙伟光,李江南,王安宇,等.凝结加热和地表通量对华南中尺度对流系统(MCS)发生发展的影响[J].热带气象学报,2005,21(4):368-376.
- [10] 孙建华,赵思雄.华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II—物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用[J].大气科学,2002,26(4):633-646.