

孟雪峰,孙永刚,萨日娜,等. 2013. 河套气旋发展东移与北京 721 暴雨的关系. 气象,39(12):1542-1549.

河套气旋发展东移与北京 721 暴雨的关系^{* 1}

孟雪峰¹ 孙永刚² 萨日娜³ 袁慧敏¹ 哈 斯⁴

- 1 内蒙古自治区气象台,呼和浩特市 010051
- 2 内蒙古自治区气象局,呼和浩特市 010051
- 3 内蒙古气象服务中心,呼和浩特市 010051
- 4 内蒙古包头市气象局,包头市 014030

提 要: 对河套气旋发展东移引发的北京 2012 年 7 月 21 日特大暴雨天气过程(简称“北京 721 暴雨”)进行了诊断分析。结果表明:河套气旋是北京 721 暴雨的直接影响系统,高空辐散区的强迫作用和对流层低层锋区走向“引导”河套气旋改变了北上的常规路径,迫使其东移直接影响河北、北京地区。河套气旋在沿着锋区东移过程中,由暖心正压气旋转变为斜压性气旋,同时,将锋区的势能转变为动能使河套气旋迅速发展,形成正反馈效应,使得本次暴雨天气过程降水强度自西向东不断增强。河套气旋在北京特大暴雨中的作用表现为:动力抬升、增强水汽输送、触发不稳定能量等三方面。午后,河套气旋暖锋触发不稳定能量释放,在北京地区产生强对流系统,形成中尺度对流辐合体(MCC),使得降水强度成倍增长,是北京地区产生特大暴雨的主要原因,东南气流中地形抬升作用对降水有增幅作用,北京 721 暴雨是多种有利因素叠加所致。

关键词: 河套气旋, 特大暴雨, MCC, 诊断分析

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.12.002

Correlation Between Eastward Developing of Hetao Cyclone and the Severe Rainstorm in Beijing on 21 July 2012

MENG Xuefeng¹ SUN Yonggang² Sarina³ YUAN Huimin¹ Hasi⁴

- 1 Inner Mongolia Meteorological Observatory, Hohhot 010051
- 2 Inner Mongolia Meteorological Bureau, Hohhot 010051
- 3 Inner Mongolia Meteorological Service Center, Hohhot 010051
- 4 Baotou Meteorological Office of Inner Mongolia, Baotou 014030

Abstract: This paper diagnostically analyzes the 721-Beijing rainstorm weather process caused by eastward shift of Hetao cyclone. The results show that: Hetao cyclone is the main impact system on the rainstorm in Beijing on 21 July 2012, and the forcing effect of upper divergence zone and the trend of lower troposphere frontal zone “guide” the Hetao cyclone to change the conventional path to the north, forcing its eastward shift and directly affecting the region of Hebei and Beijing. In the process of Hetao cyclone’s moving eastward along the frontal zone, the warm-heart barotropic cyclones change to be baroclinic cyclones. Meanwhile, the potential energy of frontal zone is changed into kinetic energy to promote the rapid development of the Hetao cyclone, forming a positive feedback effect, and making the intensity of precipitation continuously enhance from west to east. The effects of the Hetao cyclone in the Beijing rainstorm are dynamic lifting, enhancing water vapor transport and triggering unstable energy. In the afternoon, warm front of the Hetao cyclone triggers the release of potential instability energy, generating strong

^{*} 内蒙古科技厅公益项目(突发性气象灾害短临预警系统建设和突发性气象灾害预报方法研究)、内蒙古气象局科研项目(短时临近预报预警业务系统)共同资助
2013 年 1 月 5 日收稿; 2013 年 5 月 3 日收修定稿
第一作者:孟雪峰,主要从事天气预报和气象灾害研究.Email:xiaoxuehua_9@126.com

convective system, forming mesoscale convective complexes (MCC) in the Beijing area, and finally, intensifying the precipitation further more. There are the main causes of the severe torrential rains in Beijing on 21 July. In addition, the topographic lifting in the southeast airflow strengthens the rainstorm as well. Therefore, this severe rainstorm is caused by a variety of superimposed favorable factors.

Key words: Hetao cyclone, torrential rain, mesoscale convective complexes (MCC), diagnostic analysis

引 言

2012 年 7 月 21 日北京遭遇新中国成立以来最大的暴雨灾害,全市平均降水量达 170 mm,城区平均降水量达 215 mm,最大雨量点发生在房山河北镇为 460 mm,最强降雨出现在平谷挂甲峪,20—21 时达 $100.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,全市受灾人口 160.2 万人,紧急转移 9.7 万人,因灾死亡 77 人,成灾面积 $3.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$,绝收 $0.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$,停产企业 761 家,公路中断 4 万余条次,损害路面 448 处,累计 90 km,损害水闸 230 处,因灾造成直接经济损失 116.4 亿元。这次暴雨是内蒙古河套地区形成气旋并发展东移造成的,河套气旋发展东移过程中,在内蒙古河套地区、山西北部、河北、北京和天津等地出现大范围暴雨,特别是北京出现了特大暴雨。

河套气旋是指发生在内蒙古河套“几”字弯中的暖性气旋,是黄河气旋的一种,是华北地区暴雨的主要影响系统之一。关于华北暴雨的研究工作已有很多(赵宇等,2011;张守保等,2009;史小康等,2012;骆凯等,2010;高霞等,2009;陈艳等,2006;孙建华等,2006;梁萍等,2007;李津等,2006;边清河等,2005)。陶诗言等(1980)根据移动路径将黄河气旋分为 3 类,并分析了气旋内中尺度雨带的活动;蒋尚城(1990)、李修芳(1997)研究表明在黄河气旋的发生发展过程中,往往有大尺度斜压不稳定和水汽凝结潜热释放两种不同尺度的相互作用,并常常伴有沿低空急流带状 MCC 的发生发展;田生春等(1988)、梁丰等(2006)研究发现,气旋区的垂直环流具有不对称性,这种不对称的结构可使水滴快速增长,是气旋暴雨的一种产生机制;丁一汇等(1993)、张杰英等(1987)对这种陆地爆发性气旋进行了数值模拟,发现槽前正涡度平流和大尺度凝结加热对气旋的发展有促进作用;孙永刚等(2006)研究表明河套气旋为暖心结构的浅薄系统,但其对流深厚,发展具爆发性,以暖锋降水为主,雨强大。河套气旋的生成与青藏高原东北侧地形加热、河套地形关系密切。

有关北京 721 暴雨的研究已有很多,主要集中在对新观测资料的精细分析、中尺度对流系统的环境场条件及其发生发展特征、强降水特征等方面。湛芸等(2012)对引发特大暴雨的中尺度对流系统的环境场条件及其发生发展过程进行了全面的观测分析。孙军等(2012)从影响降水的因子:降水效率、水汽、上升运动、持续时间等方面进一步探讨极端性降水的成因。俞小鼎(2012)对此次极端降水过程,从中尺度对流系统发展环境场条件、演变特征等方面进行了详细分析探讨。方翀等(2012)利用新探测资料和 NCEP 再分析资料对暴雨中尺度对流条件和对流系统特征进行了探讨,将北京 721 暴雨过程分为前期、强烈发展、显著减弱三个阶段。对本次暴雨过程分析可见,受河套气旋影响,暴雨天气在内蒙古河套地区已经开始发生,随着河套气旋东移发展,影响北京地区造成了极端强降水事件,类似过程历史上较为少见。本文重点分析河套气旋东移持续发展的原因及其对北京 721 暴雨的贡献,对河套地区暴雨天气与下游北京特大暴雨天气的关系进行初步探讨,为提前预报该类北京特大暴雨事件提供参考和依据。

1 暴雨过程的大尺度环流特征

2012 年 7 月 20—22 日,内蒙古河套地区、山西北部、河北、北京、天津等地出现大范围暴雨,尤其是北京出现了特大暴雨。本次降水过程自西向东逐渐加强,降水量明显增大,东胜 90 mm、偏关 126 mm、朔州 116 mm、固安 364 mm、霞云岭 338 mm、门头沟 305 mm、房山河北镇 460 mm,超历史极值。

从大尺度环流场可见(图 1),500 hPa 贝加尔湖冷涡强盛稳定少动,底部有浅槽东移,冷平流明显,副热带高压强盛,西伸北抬呈块状,588 线已经过 35°N ,贝加尔湖冷涡与副热带高压之间为西南气流。相对应 700 和 850 hPa 冷涡位置偏东,冷涡随高度向西倾斜明显,700 和 850 hPa 槽后冷平流旺盛,温度线密集,锋区压在河套北部,河套“几”字弯内已经形成暖性低涡,随高度没有倾斜,为正压结构即河套气旋。形成“北槽南涡”的形势,对暴雨的形

成极为有利。可见,以贝加尔湖冷涡槽后冷中心为代表的北方冷空气东移南下,与副热带高压东侧季

风涌带来的暖湿空气交汇,导致了河套气旋强烈发展东移过程中的暴雨天气。

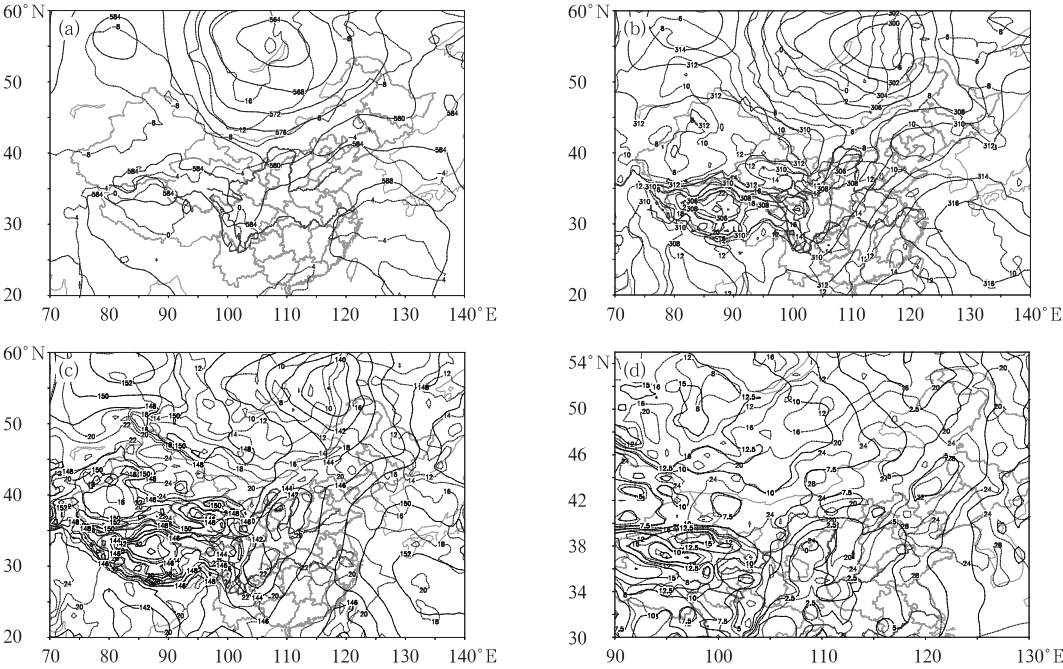


图 1 2012 年 7 月 21 日 08 时形势图
(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 地面

Fig. 1 Synoptic charts at 08:00 BT 21 July 2012
(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) the surface

2 河套气旋发展特征

2.1 河套气旋发展的规律

河套气旋是内蒙古暴雨的主要影响系统之一,其发展演变具有爆发性,引发的暴雨具有强度大和突发性强的特点,正是由于河套气旋的频繁活动,使得鄂尔多斯成为内蒙古的两大暴雨中心之一。普查了 1971—2008 年 38 年内蒙古河套地区大雨、暴雨天气过程共计 79 次,其中 70 次与河套气旋活动相关。河套气旋发展演变对下游影响统计结果表明(表 1),有大约一半的河套气旋在移出河套地区后立即减弱消亡,对下游影响较小;另一半河套气旋移出河套地区后持续发展,在下游地区形成大雨、暴雨

天气,但其绝大多数向东北方向发展(90%以上),向正东、东南方向发展的较为少见。

2.2 河套气旋东移原因的初步分析

本次华北暴雨过程河套气旋是直接影响系统,其发展东移引发河北、北京特大暴雨(图 2)。河套气旋生成后,有一半会移出河套地区继续发展,受下游华北高压脊阻挡,90%以上是向东北方向移动,翻越阴山山脉,影响蒙古高原,在内蒙古中东部地区形成大雨、暴雨天气(顾润源等,2012),也会影响到山西、河北和北京地区,但河套气旋向正东移动,直接影响北京地区较为少见(6%)。在本次暴雨过程中,河套气旋没有翻越阴山山脉,而是穿过太行山脉直接影响河北、北京地区形成极端降水事件。因此,对河套气旋移动路径控制因子的分析和预报是做好本

表 1 引发大雨暴雨的河套气旋发展演变对下游影响统计

Table 1 Impact of evolution of the Hetao cyclone on the heavy rains in the downstream

河套气旋发展演变		减弱消亡			持续发展			合 计
河套气旋移动方向	原地	东北	东	东南	东北	东	东南	
次数	14	12	1	10	30	2	1	70

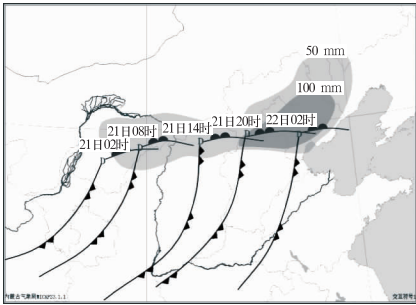


图 2 2012 年 7 月 21—22 日河套气旋时间演变及暴雨落区图

Fig. 2 Temporal evolution and rainstorm falling area of Hetao cyclone during 21—22 July 2012

次暴雨落区预报的关键问题,也是一个复杂问题。

2.2.1 高空急流动力强迫

在华北暴雨过程中大尺度环流背景稳定,200 hPa 高空急流演变表现为稳定东移(图 3)。急流入口区右侧高空辐散区强盛,在高空抽吸作用的强迫下,对流层低层河套气旋形成并不断发展加强,并在高空急流辐散区抽吸作用的引导下向东移动。20 日 20 时,高空辐散区影响河套地区,在这一强迫作用下河套气旋生成,21 日 08 时,随着高空急流东移,高空辐散区向东移出河套地区,河套气旋随之东移并加强,21 日 14 时,高空辐散区开始移入河北、北京地区,河套气旋在其“引导”下东移影响河北、北京地区,21 日 20 时,高空辐散区向东北移出北京地

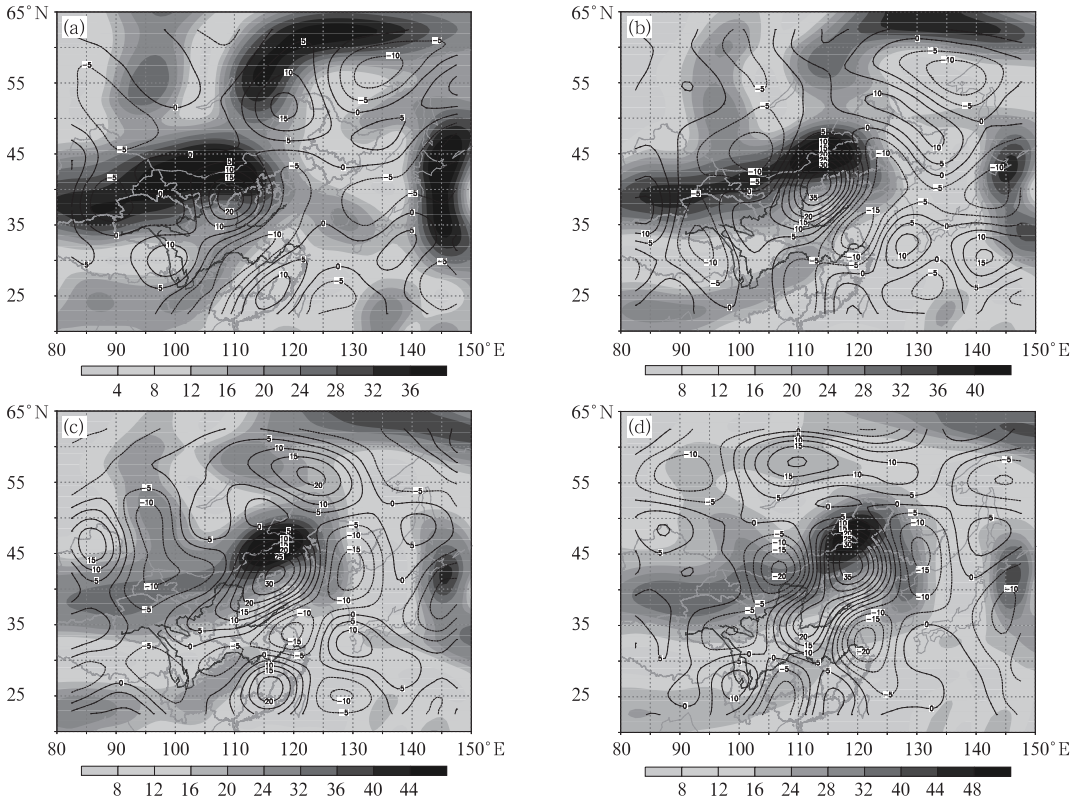


图 3 2012 年 7 月 20 日(a)20 时,(b)21 日 08 时,(c)21 日 14 时和(d)21 日 20 时 200 hPa 全风速(阴影)及辐散场(等值线)

Fig. 3 The 200 hPa wind speed (shaded) and divergence fields (line) at 20:00 BT 20 (a), 08:00 BT 21 (b), 14:00 BT 21 (c), and 20:00 BT 21 (d) July 2012

区,河套气旋也开始向东北移去。可见,高空急流辐散区的强迫作用对河套气旋的东移起到了关键作用。

2.2.2 对流层低层锋区作用

在华北暴雨过程中冷暖空气都异常活跃,从 20 日 20 时的 700 hPa 温度平流分布可见(图 4a),在内

蒙古河套地区向东一直到渤海湾的华北地区都受到暖平流的影响,不断增暖,在阴山北麓及大兴安岭西的蒙古高原地区受冷平流的影响,不断降温。在这样的温度平流作用下,从河套地区至北京一线有利于形成南暖湿北干冷的锋区,这一线温度、湿度梯度加大,大气势能不断积累增强(图 4b)。此时,河套

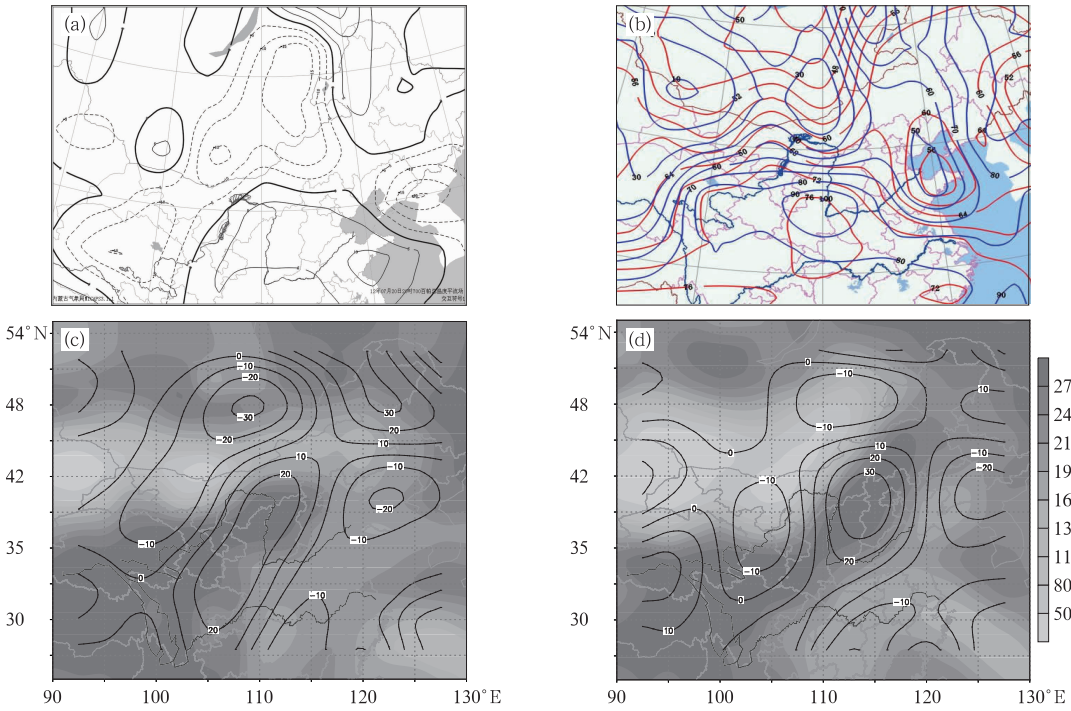


图 4 2012 年 7 月 20 日 20 时(a)700 hPa 温度平流;(b)925 hPa 温度(实线),相对湿度(虚线);
(c)21 日 08 时,(d)21 日 20 时 850 hPa 绝对温度×相对湿度(阴影),850 hPa 涡度(线)
Fig. 4 700 hPa temperature advection (a), 925 hPa temperature (thick solid line) and relative
humidity (dotted line) (b) at 20:00 BT 20; 850 hPa absolute temperature × relative humidity
(shaded) and vorticity (line) at 08:00 BT 21 (c), 20:00 BT 21 (d) July 2012

气旋已经在内蒙古河套地区开始生成,伴有降水,河套气旋逐渐形成并沿着锋区东移发展,21 日 08 时(图 4c)河套气旋已经移出河套地区进入山西北部并继续东移。河套气旋在沿着锋区东移过程中,气旋前部偏南风、后部偏北风产生波动使得南部的暖湿空气与北部的干冷空气交汇,能量发生转换,锋区强大的势能转变为河套气旋发展的动能,河套气旋迅速发展进一步增强了冷暖交汇,形成正反馈效应。在这一过程中,河套气旋依靠锋区提供的能量迅速发展并沿着锋区东移。21 日 20 时之后(图 4d),气旋前部强盛的偏南风突破了锋区延伸至东部地区,锋区走向也转为东北方向,河套气旋的移动方向随之转向东北。可见,对流层低层锋区的形成、分布及其走向对河套气旋的发展和移动起着关键作用。

2.3 河套气旋东移过程中内部结构的变化

河套气旋形成初期为正压结构的热低压,是具有暖心结构的浅薄系统(孙永刚等,2006)。气旋中心配合暖平流(图 5a),暴雨通常出现在河套气旋中心区域,大雨、暴雨通常是伴随河套气旋的形成而产生的,这类降水具有突发性、强度大的特点,预报难度大(顾润源等,2012)。河套气旋形成后受西南暖

湿气流的推动向北移动,维持热低压性质,越过阴山山脉后受西北路冷空气侵入,变性为斜压气旋,移动速度加快。在这次暴雨过程中,河套气旋沿着锋区东移迅速变性为斜压气旋,在对流层中低层正涡度中心对应冷暖平流的等值线密集过渡带(图 5b)。河套气旋形成初期,位于内蒙古河套地区就沿着锋区发展,冷空气侵入开始变为斜压性气旋,河套气旋产生的强降水始终在其前部暖区中。可见,较强冷空气从河套西部侵入河套地区,推动河套气旋东移,是这次暴雨过程河套气旋发展的重要特性。

3 河套气旋在北京 721 暴雨中的作用

3.1 动力抬升作用

从河套气旋发展演变过程来看,在东移过程中有明显的发展加强。地面气旋中心气压从 21 日 02 时的 1002.5 hPa 降低到 22 日 02 时的 997.5 hPa; 850 hPa 的涡度从 21 日 02 时的 $15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增加到 22 日 02 时的 $35 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$;河套气旋的性质由正压转变为斜压性气旋;系统的厚度由 700 hPa 以下增长到 500 hPa 以上;降水中心强度随着河套气

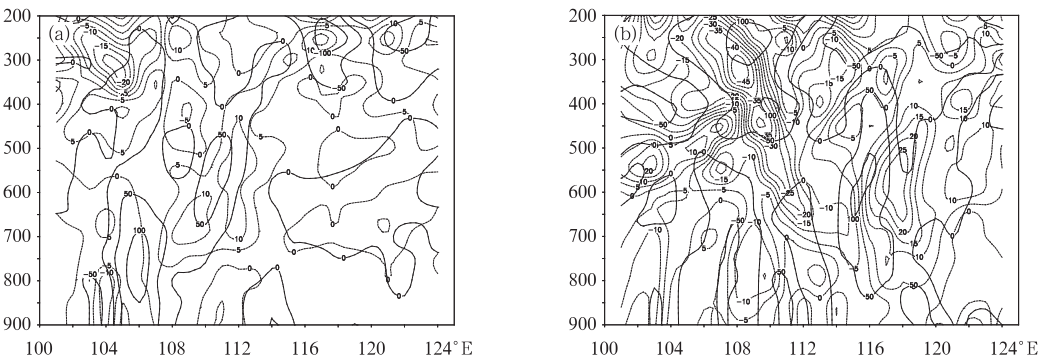


图 5 2012 年 7 月 21 日(a)02 时和(b)08 时沿 40°N 涡度(实线)、温度平流(点线)剖面图
Fig. 5 Vorticity (solid line), temperature advection (dotted line) and profile along 40°N
at 02:00 BT (a), 08:00 BT (b) 21 July 2012

旋发展由 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 增长到 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上。可见河套气旋的发展加强影响北京地区,其自身的动力抬升作用对特大暴雨的形成有着重要作用。

3.2 水汽输送作用

河套气旋的生成与南支暖湿气流活跃强盛关系密切,本次河套气旋发展的全过程,自 21 日 02—20 时都配合着充沛的暖湿气流和水汽输送,低空急流大值区与相对湿度大值区相吻合,水汽输送条件好(图 6)。随着河套气旋东移发展,其与副热带高压间的 700 hPa 低空急流由内蒙古河套地区的 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强到北京地区的 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,低空急流的加强对北京地区暴雨的加强有重要作用。可见,河套气旋发展东移对北京 7.21 暴雨的水汽输送的增强具有一定的影响。

3.3 触发不稳定能量作用

3.3.1 不稳定条件

21 日 08 时,700 和 850 hPa 内蒙古河套以东至

河北、北京地区为一宽广的高温、高湿区(图 7a),北京(54511)站 $T-\ln p$ 图显示整层存在正能量区,CAPE 值达到 $1075\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,大气对流条件较好,在 700~600 hPa 存在一逆温层(图 7b),有利于对流层低层能量的聚集。到 14 时,CAPE 值显著增大到 $2089\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (方翀等,2012),北京地区水汽条件和不稳定层结条件都非常好,有利于短时强降雨和特大暴雨的发生。

3.3.2 河套气旋触发条件

大气中存在的热力和动力不稳定性表明,若有某种机制(触发条件)导致低层辐合抬升,对流将迅速发展。21 日 14 时河套气旋东移发展,其暖锋已经影响到河北、北京地区,在河北中部到北京南部具有显著的暖锋风切变和风速辐合区,从暖锋锋区结构剖面图(图 8)可见,河套气旋暖锋向北倾斜达到 500 hPa 以上,其北部大气为干冷性质,暖锋及南部大气为暖湿性质,暖湿空气沿暖锋抬升,强中心已经达到 700~350 hPa,足以突破 700~600 hPa 的逆温层,触发暖区的对流系统发生,对后期中尺度对流复

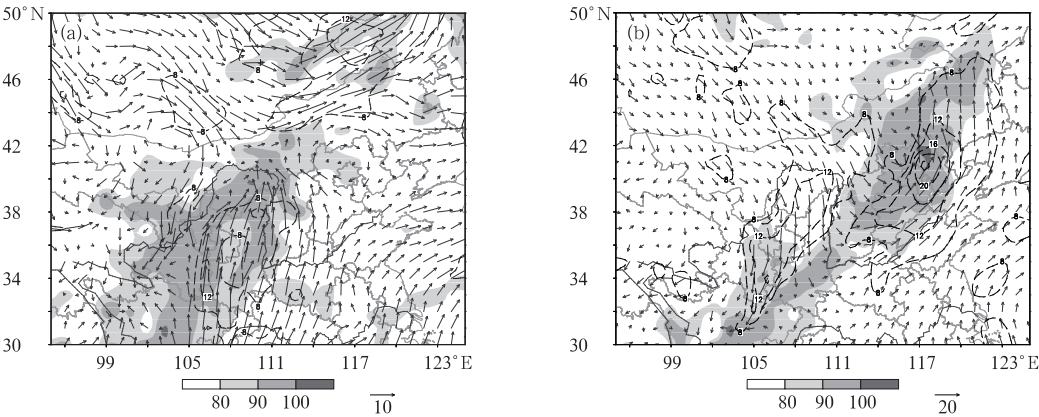


图 6 2012 年 7 月 21 日(a)02 时,(b)20 时 700 hPa 全风速(线)和相对湿度(阴影)
Fig. 6 700 hPa wind speed (line) and relative humidity (shaded) at 02:00 BT (a), 20:00 BT (b) 21 July 2012

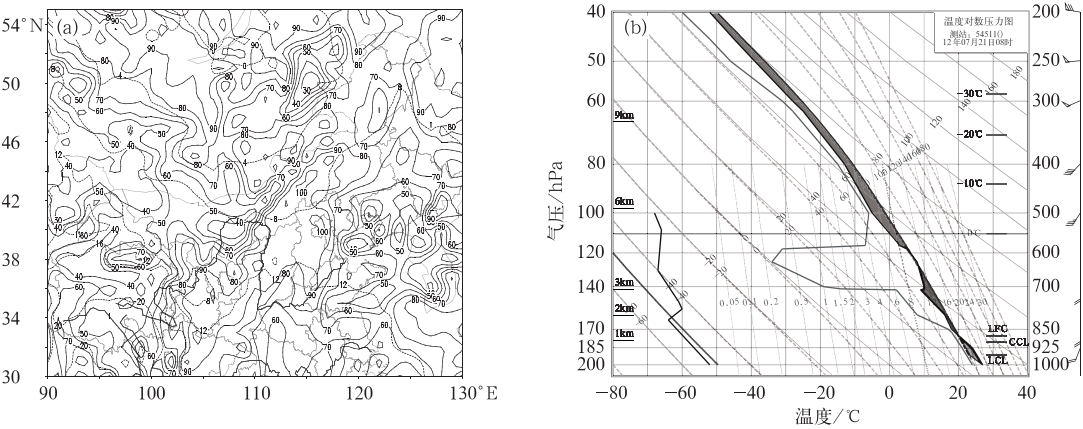


图 7 2012 年 7 月 21 日 08 时(a)700 hPa 温度(虚线)、相对湿度(黑线), (b) T - $\ln p$ 图

Fig. 7 700 hPa temperature (dotted line) and relative humidity (black line) (a), T - $\ln p$ (b) at 08:00 BT 21 July 2012

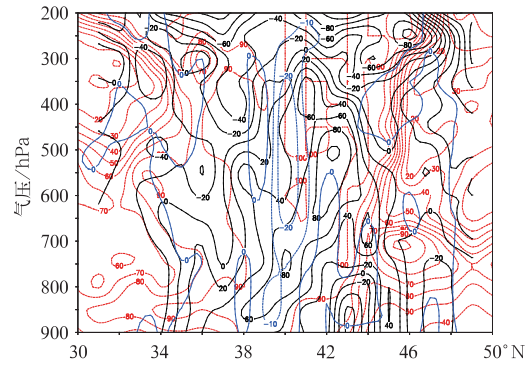


图 8 沿 115°E 暖锋南北剖面图

[涡度(粗实线),垂直速度(点虚线),相对湿度(细实线)]

Fig. 8 Warm front north-south profile along 115°E

[vorticity (thick solid line), vertical velocity (dotted line), relative humidity (thin solid line)]

合体(MCC)的发生和发展有重要贡献。

3.3.3 中尺度对流复合体(MCC)发展

河套气旋东移发展过程中,卫星云图呈逗点云系,河套气旋始终有对流云配合(图 9),午后河套气旋移入河北,北京地区,开始有较强的分散对流云团生成(图 9c),云团迅速发展合并加强形成 MCC(图 9d),此时北京市区降水强度达到最强。可见,河套气旋东移发展是引发北京特大暴雨的主要影响系统,在其暖区中暖锋触发不稳定能量释放,形成强对流 MCC,强对流的爆发使降水强度成倍增长,是北京发生特大暴雨的主要原因。关于中尺度对流发展演变特征已经有许多研究结论(湛芸等,2012;孙军等,2012;方翀等,2012),这里不再赘述。

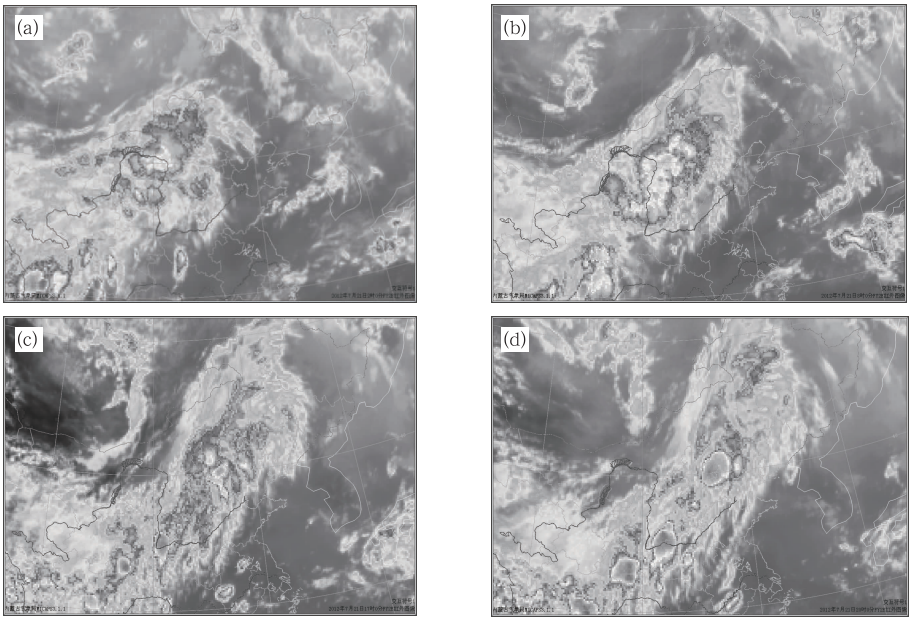


图 9 2012 年 7 月 21 日(a)02 时,(b)08 时,(c)17 时和(d)20 时红外云图

Fig. 9 Infrared cloud images at 02:00 BT (a), 08:00 BT (b), 17:00 BT (c), and 02:00 BT (d) 21 July 2012

总之,河套气旋东移发展影响北京地区,是特大暴雨形成的直接影响系统。河套气旋决定着大的降水背景,其本身产生的降水贡献应该在 $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (按线性外推),午后其触发 MCC 使降水强度翻倍,是产生极端降水事件的关键因素。另外,地形对此次特大暴雨的落区也有影响,由于暴雨过程中北京地区对流层低层为东南风,西部山区对东南风气流的抬升和阻挡使降水有增幅。可见,北京 721 暴雨不是某一项天气条件好而产生的,它是由多方面的有利条件相叠加的结果。

4 结 论

(1) 河套气旋是北京 721 暴雨的直接影响系统,河套气旋改变了北上的常规路径,向正东移直接影响河北、北京地区,引发了北京 721 暴雨。

(2) 在稳定的大尺度环流背景下,高空急流辐散区东移,其动力强迫作用对河套气旋的发展和移动起到关键作用。在对流层低层温度平流作用下,河套地区至北京一线形成南暖湿、北干冷的对流层低层锋区,该锋区是河套气旋发展的能量来源,其强度和走向对河套气旋的移动和发展有重要作用。

(3) 河套气旋在沿着锋区东移过程中,由暖心正压气旋转变为斜压性气旋,同时,将锋区的势能转变为动能使河套气旋迅速发展,形成正反馈效应,使得本次暴雨天气过程降水强度自西向东不断增大。

(4) 河套气旋对北京特大暴雨的主要作用有:河套气旋发展加强的动力抬升作用、暖湿气流加强的水汽输送作用、午后河套气旋暖锋触发不稳定能量释放作用。午后,河套气旋暖锋触发不稳定能量释放,在北京地区产生强对流系统,形成中尺度对流复合体(MCC),使得降水强度成倍加强,是北京地区产生特大暴雨的主要原因。东南气流中地形抬升作用对降水有增幅作用,北京 721 暴雨是多种有利因素叠加所致。

参考文献

边清河,丁治英,吴明月,等. 2005. 华北地区台风暴雨的统计特征分

析. 气象,31(3):62-66.

陈艳,宿海良,寿绍文. 2006. 华北秋季大暴雨的天气分析与数值模拟. 气象,32(5):88-94.

谌芸,孙军,徐瑶,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考. 气象,38(10):1255-1266.

丁一汇,朱彤. 1993. 陆地爆发性气旋发展的动力学分析和数值模拟. 中国科学(B辑),23(11):1226-1232.

方翀,毛冬艳,张小雯,等. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象,38(10):1278-1287.

高霞,王宏,于成文,等. 2009. 近 45 年来河北省极端降水事件的变化研究. 气象,35(7):12-17.

顾润源,孙永刚,韩经纬,等. 2012. 内蒙古自治区天气预报手册. 北京:气象出版社.

蒋尚城. 1990. 8. 26 黄河气旋暴雨分析. 科学通报,35(19):1481-1483.

李津,王华. 2006. 北京城区一次大到暴雨的预报难点分析. 气象,32(2):92-97.

李修芳. 1997. 影响华北地区的黄河气旋过程分析. 气象,23(1):17-22.

梁丰,陶诗言,张小玲. 2006. 华北地区一次黄河气旋发生发展时所引起的暴雨诊断分析. 应用气象学报,17(3):257-265.

梁萍,何金海,陈隆勋,等. 2007. 华北夏季强降水的水汽来源. 高原气象,26(3):28-33.

骆凯,李耀东,秦丽. 2010. 一次华北暴雨过程的数值模拟及水汽过程分析. 暴雨灾害,29(4):13-20.

史小康,李耀东,刘健文,等. 2012. 华北一次暴雨过程的螺旋度分析. 自然灾害学报,20(4):50-58.

孙建华,齐琳琳,赵思雄. 2006. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究. 气象学报,64(1):59-73.

孙军,谌芸,杨舒楠,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考. 气象,38(10):1267-1277.

孙永刚,吴学宏,孟雪峰. 2006. 一次河套地区突发性暴雨成因分析. 气象,32(s):16-20.

陶诗言,等. 1980. 中国之暴雨. 北京:气象出版社.

田生春,刘苏红. 1988. 一次快速发展气旋的诊断分析. 气象学报,46(3):285-293.

俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. 气象,38(11):1313-1329.

张杰英,杨梅玉,姜达雍. 1987. 考虑大尺度凝结加热的数值模拟试验. 中国气象科学研究院院刊,2(2):123-132.

张守保,张迎新,郭品文. 2009. 华北回流强降水天气过程的中尺度分析. 高原气象,28(5):125-132.

赵宇,崔晓鹏,高守亨. 2011. 引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统结构特征研究. 大气科学,35(5):157-174.