

高空急流在北京“7.21”暴雨中的动力作用^{*1}

全美兰^{1,2} 刘海文^{1,3} 朱玉祥⁴ 程 龙¹

QUAN Meilan^{1,2} LIU Haiwen^{1,3} ZHU Yuxiang⁴ CHENG Long¹

1. 成都信息工程学院 大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都, 610225

2. 辽宁省抚顺市气象台, 抚顺, 113006

3. 重庆气象科学研究所, 重庆, 401147

4. 中国气象局气象干部培训学院, 北京, 100081

1. *College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China*

2. *Fushun Meteorological Observatory in Liaoning Province, Fushun 113006, China*

3. *Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China*

4. *China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China*

2013-04-15 收稿, 2013-08-05 改回.

全美兰, 刘海文, 朱玉祥, 程龙. 2013. 高空急流在北京“7.21”暴雨中的动力作用. 气象学报, 71(6): 1012-1019

Quan Meilan, Liu Haiwen, Zhu Yuxiang, Cheng Long. 2013. Study of the dynamic effects of the upper-level jet stream on the Beijing rainstorm of 21 July 2012. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(6): 1012-1019

Abstract Based on the data from the conventional meteorological observation, including the surface hourly precipitation and the NCEP reanalysis data, using the weather diagnosis and analysis methods, the dynamic processes of the upper-level jet stream for the torrential rainfalls in Beijing, both increased suddenly at the time of 14:00 BT and of the biggest amount at 19:00 BT 21 July 2012 (named simply as 7.21 hereafter) are studied. The results show that the upper-level jet stream moved from the west to over Beijing is related to the Beijing 7.21 rainstorm, and the upper-level jet stream and its divergence field, and the secondary circulation associated with the upper-level jet play an important role in the Beijing 7.21 rainstorm. At 14:00 BT 21, along with the upper-level jet stream northward spreading, the range of the upper-level divergence, which is situated at the right side of the entrance region of the upper level jet stream, expanded significantly. The Beijing region is under the influence of the deep convective motion and affected by the favorable moisture conditions, which was associated by the southeast flow, and thus caused the precipitation of the Beijing area to increase abruptly. At 20:00 BT 21, the upper-level jet stream further northward spreads, and the low-level convergence generated by the northwest vortex, resulted in the strong upper-level divergence over Beijing. The vertical motion enhanced by the strong upper-level divergence over Beijing, which combined with the impact of warm air from the south-east, leading the precipitation of Beijing region to reaching the maximum at 19:00 BT 21. The ascending motions appeared in the right side of entrance region of the upper-level jet, while the descending motions occurred in the southeastern part of Beijing, at either the precipitation-increased suddenly time or the precipitation maximum time of Beijing 7.21 rainstorm. This is an important feature of the secondary circulation of the 7.21 Beijing rainstorm.

Key words Beijing, Upper-level jet stream, Divergence, Secondary circulation

* 资助课题: 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206042)、重庆市气象局开放式研究基金项目(KFJJ-201102)、重庆市博士后科研项目。

作者简介: 全美兰, 主要从事中尺度数值模拟和暴雨研究. E-mail: 858496251@qq.com

通讯作者: 刘海文, 主要从事暴雨和东亚季风等方面的研究. E-mail: lhw499@126.com

摘 要 利用常规观测、加密自动气象站降水资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料等,使用天气动力学诊断方法,重点研究了高空急流对北京 2012 年 7 月 21 日(“7.21”)暴雨中降水突然增强时刻 14 时(北京时)和降水最强时刻 19 时的动力作用。结果表明,“7.21”暴雨的发生和西来的高空急流东移至北京上空有关,高空急流及其散度场和与高空急流相伴随的次级环流对“7.21”暴雨的发生起重要的动力作用。7 月 21 日 14 时,高空急流轴的经向度开始增大,高空急流入口区右侧的散度场南北范围明显扩大,北京上空为深厚的对流运动,受来自低层的东南气流带来的暖湿空气的影响,北京地区降水量突然增大;20 时,对流层高空急流轴的经向度进一步增大,此时由于北上西北低涡导致的低层辐合,使得北京上空对流层高层出现强辐散区,北京上空出现强烈的上升运动,加之来自东南的暖湿气流的影响,使得北京地区降水量在 19 时达到最大值。“7.21”暴雨中降水突然增强时刻和降水最大时刻,上升支均出现在高空急流入口区右侧,但是,次级环流的下沉支均发生在北京的东南部,这是影响“7.21”暴雨次级环流的一个重要特征。

关键词 北京,高空急流,散度,次级环流

中图法分类号 P458.1+21.1

1 引 言

Tao 等(1987)指出,200 hPa 高空西风急流是影响东亚天气、气候的重要系统。Matsumoto 等(1971)根据高空急流的位置,认为暴雨主要发生在高空急流轴南侧 300 km 附近。Whitney(1977)通过研究 1975 年春季的 5 个局地风暴和副热带高空急流的关系,认为强雷暴天气发生在高空急流轴的南侧。Chen(1982)则研究了重力惯性波的不稳定性和低空急流与暴雨的关系,认为如果在高空急流入口区满足重力惯性波不稳定的条件,则会在高空急流入口区激发强热力直接环流,导致高空急流入口区南侧产生强上升运动。Brill 等(1985)通过个例研究表明,在高空急流出口区产生的次级环流,可导致 700—400 hPa 深厚的垂直运动。Uccellini 等(1984)通过研究 1979 年 2 月 18—19 日发生在美国东海岸的暴雪天气过程,认为与高空急流相伴随的辐散场和次级环流为该次暴雪提供了强烈的上升运动。Hakim 等(1992)通过研究 1989 年 3 月 17 日美国中北部的一次暴雪过程,认为该次过程受南北两个高空急流的影响,当南部的高空急流间接力管环流圈的上升支与北部高空急流直接力管环流圈的上升支叠加时,暴雪过程明显增强。Shin 等(2005)通过研究 2002 年 8 月 6—7 日发生在朝鲜半岛中部的暴雨天气过程,认为暴雨发生在高空急流入口区的右侧强辐散区下方。Prezerakos 等(2006)通过研究 1998 年 3 月 12 日一次气旋发展过程,认为副热带急流出口区左侧间接环流的上升支在气旋发展中重要的作用。Lee 等(2008)对 1998 年 8 月 17—31 日影响韩国南部地区的暴雨过程进行了分析研究,揭示出暴雨主要发生在高空急流的南侧,高空急

流及其相伴随的次级环流的上升支使得暴雨强度增强。Hassan 等(2011)以 1974 年 2 月 21—23 日天气为例,研究了副热带急流及其相伴随的次级环流在地中海中部深厚气旋形成中的作用。最近, Hirahara 等(2012)通过数值模拟试验,也发现对流层高层西风急流对降水有重要影响。

上述研究表明,高空急流及其附近散度场和与高空急流相伴随的次级环流对低层气旋(Prezerakos, et al, 2006; Hassan, et al, 2011; 程正泉等, 2012)、强对流(Whitney, 1977)、暴雨(Lee, et al, 2008; 廖移山等, 2011)、暴雪(Uccellini, et al, 1984; Hakim, et al, 1992; 李兆慧等, 2011)以及强上升运动(Brill, et al, 1985)等均有重要的影响。但是,一些研究认为,在急流出口区的左侧是辐散上升运动区(Uccellini, et al, 1979; Cressman, 1981; 伍荣生, 1999; Hassan, et al, 2011),而陶祖钰等(1994)、徐海明等(2001)研究认为,一旦高空急流轴经向度增大,暴雨将发生在高空急流轴出口处右侧强辐散区的下方。这显然是两种不同现象的两种不同结论。

北京 2012 年 7 月 21 日经历了自“63.8”暴雨以来最强的一次降水过程(俞小鼎, 2012)。对于“7.21”暴雨而言,对流层高层是否存在有高空急流,“7.21”暴雨究竟位于高空急流的什么位置,与高空急流相伴随的次级环流具有什么样的特征,这就是本研究的主要内容。

2 资料和方法

所用资料包括:

(1)降水资料,取自中国气象局业务系统 Micaps(Meteorological Information Combine Analysis

and Process System), 包括常规台站降水资料和加密自动气象站降水资料, 选取 7 月 21 日 08 时—7 月 22 日 08 时(北京时, 下同)北京出现降水的加密自动气象站和常规气象观测站共 183 个站作为北京地区降水的分析台站。

(2) 大气环流资料, 选自一天 4 次的 NCEP/NCAR 再分析资料, 其水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直分辨率为 26 层, 气象要素包括风场、温度场、相对湿度场、垂直速度场等。文中的其他物理量均由 NCEP/NCAR 再分析资料计算得到。

使用的天气诊断分析方法见丁一汇(1989)。

3 “7. 21”暴雨降水过程概述

图 1 给出了 2012 年 7 月 21 日 08 时—22 日 08 时北京地区逐时降水量。从 7 月 21 日 09 时开始降水量逐渐增大, 在 21 日 14 时降水量突然增大, 直到 19 时降水量达到最大值, 而后降水强度逐渐减弱, 至 7 月 22 日 06 时整个降水过程结束, 降水维持近 20 h。这是自东亚夏季风开始恢复增强后(Liu, et al, 2012; 程龙等, 2013), 降水量达到了自“63. 8”暴雨以来最强的一次降水过程(俞小鼎, 2012)。由于受 NCEP/NCAR 再分析资料一天只有 4 次的时间分辨率限制, 且北京地区降水量 21 日 20 时和 19 时相差无几, 因此, 下面用 21 日 20 时的 NCEP/NCAR 再分析资料作为分析该次降水过程最大降水时刻的资料。

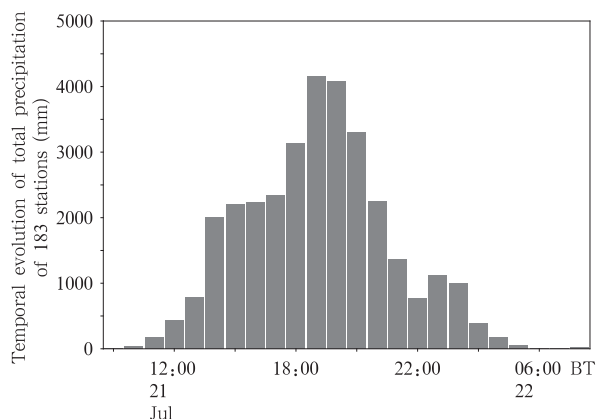


图 1 2012 年 7 月 21 日 08 时—22 日 08 时北京地区 183 测站降水量之和的时间演变

Fig. 1 Temporal evolution of total precipitation of the 183 stations over the Beijing region during 08:00 BT 21 – 08:00 BT 22 July 2012

4 高空急流对“7. 21”暴雨的影响

为了揭示高空急流对“7. 21”暴雨的影响, 图 2 给出了“7. 21”降水前几个时次 200 hPa 高空急流位置和所经地区降水实况的空间分布。可以明显看出伴随着高空急流核向东北方向移动, 在其入口区右侧均有降水发生, 充分说明高空急流是导致所经地区产生降水的一个重要原因。7 月 20 日 20 时(图 2a), 高空急流核位于蒙古国南部($44^\circ\text{N}, 107^\circ\text{E}$), 位于高空急流入口区右侧的甘肃东北部有较弱的降水产生。21 日 02 时(图 2b), 高空急流核向东北方向移动至($45^\circ\text{N}, 114^\circ\text{E}$)附近, 此时降水区也明显向东北移动到内蒙古中部地区, 降水中心仍位于高空急流入口区的右侧。21 日 08 时, 高空急流核明显加强, 其东移至($45^\circ\text{N}, 115^\circ\text{E}$)附近, 急流核强度达到 50 m/s, 降水中心随之增强, 并东移至陕西、山西和内蒙古交界地区(图 2c)。14 时, 高空急流核继续增强并向东北方向移动, 此时其强度达到 55 m/s, 降水中心则向东移动, 表明高空急流开始影响北京地区(图 2d)。

图 3 给出了北京“7. 21”暴雨期间 200 hPa 高空急流、散度和流场分布。伍荣生(1999)指出, 在高空急流大风核左侧为气旋性涡度中心, 其左前方和右后方为正涡度平流区和辐散区, 而在大风核的右前方和左后方为负涡度平流区和辐合区。因此, 通过入口区的垂直环流圈为暖空气上升、冷空气下沉的直接环流圈, 而在出口区相反, 为暖空气下沉, 冷空气上升的间接环流圈。21 日 08 时(图 3a), 200 hPa 高空急流轴呈准东西向分布, 伴随的强辐散区位于高空急流入口区右侧, 这与 Cressman(1981)所揭示的高空急流与散度场的配置基本一致。此时强辐散区还未到达北京地区, 北京地区尚未出现降水。至 14 时, 高空急流及其辐散场发生了明显变化(图 3b)。高空急流核向北移动了约 3 个纬距, 强度明显加强, 最强风速中心值达到 55 m/s, 且高空急流轴经向度明显增大, 此时, 高空急流的入口区南部的强辐散和山西南部的辐散是由不同的天气系统所导致, 其中, 山西南部的辐散区与西北低涡(孙建华等, 2013)的北上有关。北京上空 200 hPa 的强辐散区, 一部分是由高空急流入口区右侧非地转风分量所引起, 另一部分则由对流层低层西北低涡“人”字形暖

切变线的低层辐合作用所引起,北京在这两个不同高度的不同天气系统的影响下,产生了强烈的上升运动,导致14时北京地区降水量突然增大。21日20时(图3c),高空急流经向度进一步增大,高空急流核减弱东移,与高空急流相伴随的辐散场也明显东移,但北京上空的强辐散中心强度已达到最大值,这一强辐散中心主要是西北低涡低层的强辐合作用

所致,使得北京19时降水量达到最大值。需要指出的是,尽管14和20时高空急流轴经向度明显增大,但是,在这两个时刻上升运动均发生在高空急流入口区右侧,这与陶祖铎等(1994)、徐海明等(2001)揭示的一旦高空急流轴经向度增大,暴雨将发生在高空急流轴出口处右侧下方的结论明显不同。

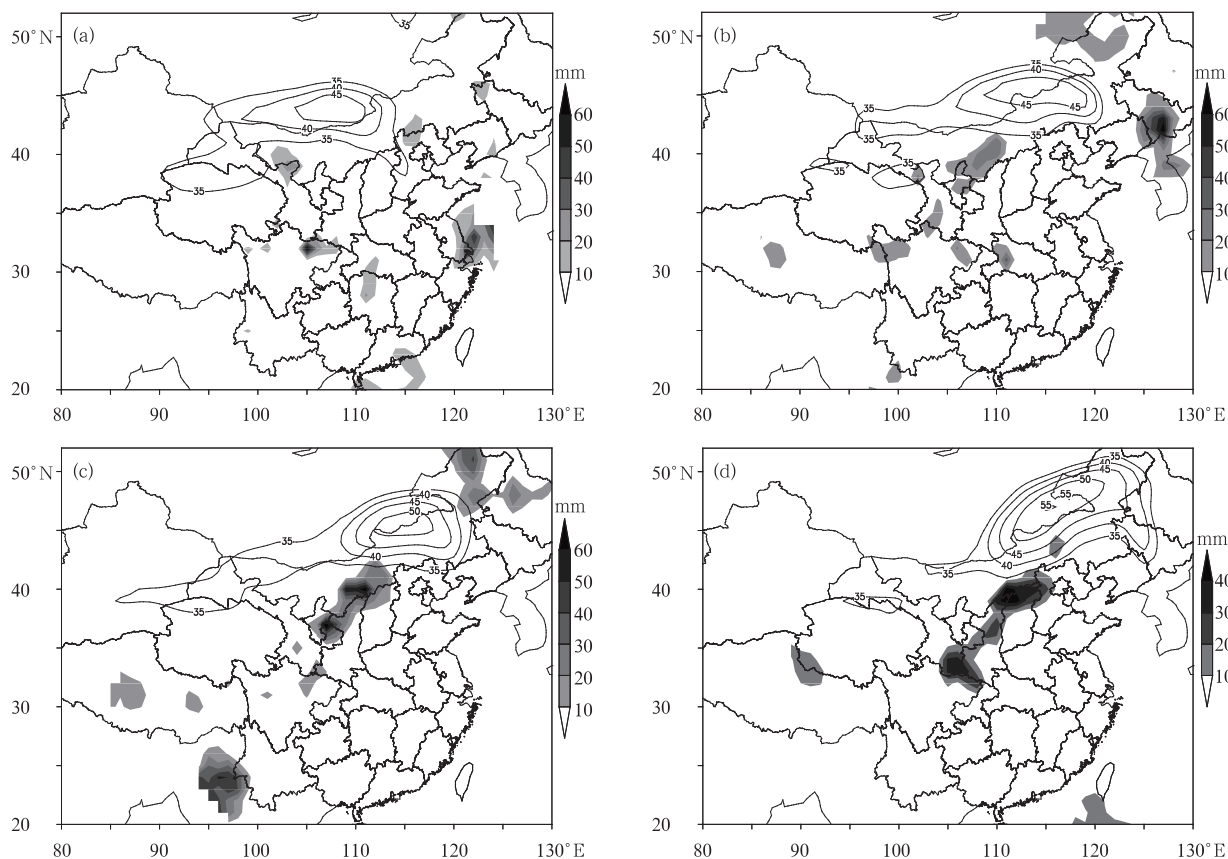


图2 200 hPa 高空急流(实线,单位:m/s)和6 h 累积降水量(阴影)分布

(a. 20:00 BT 20, b. 02:00 BT 21, c. 08:00 BT 21, d. 14:00 BT 21)

Fig. 2 Upper-level jet stream at 200 hPa (solid line, unit:m/s) and 6-hours accumulated precipitation (shaded)

(a. 20:00 BT 20, b. 02:00 BT 21, c. 08:00 BT 21, d. 14:00 BT 21)

为了分析高空急流及其散度场对“7.21”暴雨的动力作用,图4给出了21日08、14、20时沿116°E的假相当位温、温度、垂直速度、200 hPa 水平风速和散度的垂直剖面。可见08时(图4a),约在250 hPa高度上的高空急流核位于北京北部,与高空急流相伴随的是其南侧为一辐散区,在45°N附近有高空锋区存在,高空锋区的上边界可伸展至对流层顶;在700—600 hPa有一个 θ_{se} 低值中心, $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$,表明此时北京处于对流不稳定状态(伍荣生,

1999);在北京南部地区上空900—800 hPa有一范围较小的上升运动,此时北京地区并没有出现降水。14时(图4b),250 hPa 高空急流核缓慢北移,急流南北范围明显变大,对流层高层的辐散区范围也明显扩大,北京正处于对流层高层强辐散区的下部,北京上空大范围的辐散区的存在,使得北京上空产生强烈的上升运动,图4b中的垂直速度也充分地说明了这一点,14时北京地区从地面至200 hPa 高度均为上升运动,北京上空出现这样的深厚对流运动,致

使北京 14 时降水开始突然增大。至 20 时(图 4c), 整个北京上空垂直运动无论从范围还是从强度而言, 均比 08、14 时有所扩大和增强, 北京上空对流层中低层 800 hPa 有一强烈的辐合区, 这是西北低涡

(孙建华等, 2013) 已经到达北京上空的表現, 此时 500—200 hPa 为强辐散区, 地面冷锋已经移过北京的大部分地区, 北京地区降水量也达到了最大(图 1)。

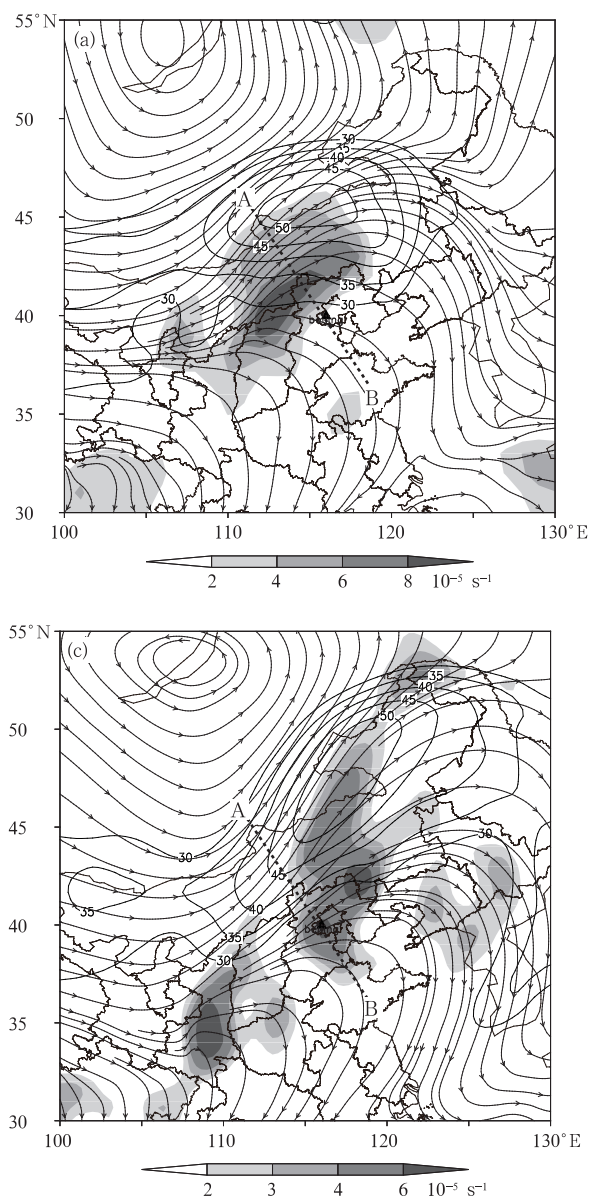


图 3 2012 年 7 月 21 日 200 hPa 高空急流(实线, 单位: m/s)、散度(阴影)和流场(矢线)分布

(a. 21 日 08 时, b. 14 时, c. 20 时)

Fig. 3 Upper-level jet stream (solid lines, unit: m/s), divergence (shaded) and streamline (lines with vector) fields at 200 hPa on 21 July 2012

(a. 08:00 BT, b. 14:00 BT, c. 20:00 BT)

为了进一步分析与高空急流相伴随的次级环流对“7.21”暴雨的动力作用, 图 5 给出了通过图 3 中的 AB 基线垂直剖面的散度和流场分布。21 日 08 时(图 5a), 与高空急流相伴随的强辐散区将要到达北京, 此时北京上空的上升运动并不强, 因此, 北京并没有出现降水。至 14 时(图 5b), 在 400—300 hPa 高度有一个明显的反环流中心, 250 hPa 附

近的辐散中心明显向东南方向移动, 北京受西北低涡“人”字形暖切变线影响, 对流层低层 1000—850 hPa 出现了范围较大的强辐合区。这种低层辐合、高层辐散作用, 使得北京上空出现了可伸至对流层顶的深厚的垂直运动区, 这支深厚的上升气流在 200 hPa 附近流向东南方向, 构成了 400—300 hPa 反环流中心的一部分, 此反环流圈低层的东南气流

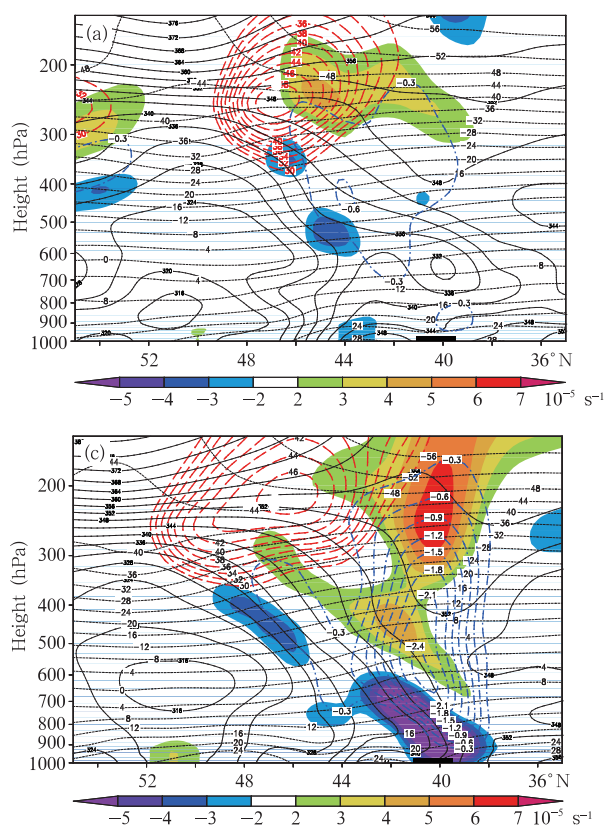


图4 沿116°E的假相当位温(黑实线,单位:K)、温度(短虚线,单位:°C)、垂直速度(蓝色点划线,单位:Pa/s), 200 hPa水平风速(红色长虚线,单位:m/s)和散度(阴影)的垂直剖面

(a. 21日08时, b. 14时, c. 20时; 底端的水平黑粗线表示北京地区的南北范围为39.5°—41°N)

Fig. 4 Vertical cross section of θ_{se} (solid lines, unit: K), temperature (short broken lines, unit: °C), vertical velocity (dot dashed lines, unit: Pa/s), horizontal wind velocity at 200 hPa (long dashed lines, unit: m/s) and divergence (shaded) fields along 116°E (a. 08:00 BT 21, b. 14:00 BT 21, c. 20:00 BT 21; The horizontal bar at the bottom represents the latitudinal range of Beijing)

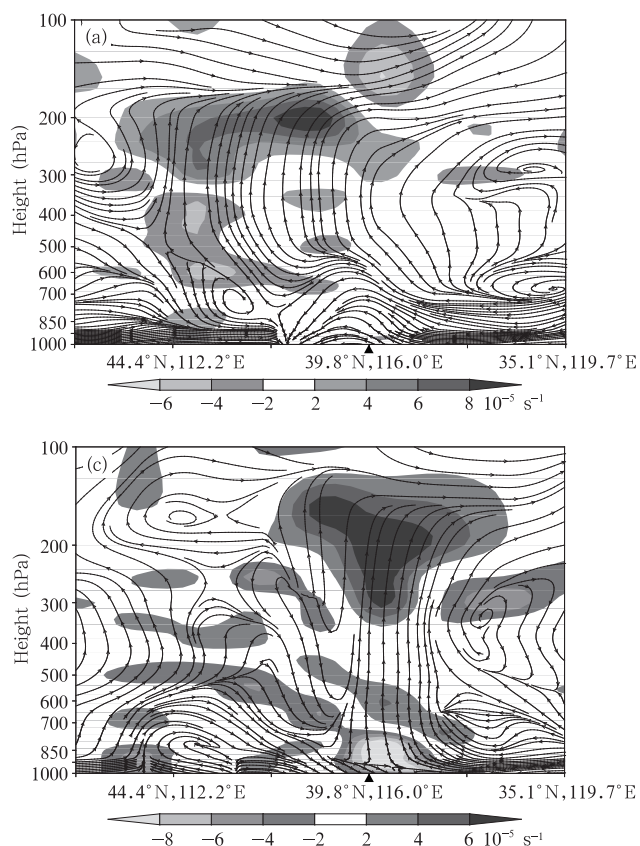


图5 通过图3中的AB基线垂直剖面的散度(阴影)和流场(矢线,为垂直速度 $\omega \times (-100)$ 、 u 和 v 的合成)分布 (a. 7月21日08时, b. 14时, c. 20时; ▲表示北京站位置)

Fig. 5 Divergence (shaded) and streamline on the vertical cross section along the AB in Fig. 3

(The vectors denote the combination of u and v with $\omega \times (-100)$; ▲ stands for the Beijing station; a. 08:00 BT 21, b. 14:00 BT 21, c. 20:00 BT 21 July)

向北京地区提供了有利的水汽条件,导致北京地区 14 时降水量明显增大(图 1)。至 20 时(图 5c), 400—300 hPa 反环流中心范围开始变小,但是,对流层低层 1000—800 hPa 强辐合区明显增强,北京上空强烈的上升运动超过 200 hPa 高度以后才开始向东南方向流去,在对流层低层的东南气流继续为北京地区提供水汽,加上此时北京受其上空大气强烈的上升运动影响,导致北京地区 19 时降水量达到了最大值(图 1)。需要指出的是,整个降水过程中,北京上空为强上升气流,其与北京的东南部的下沉气流形成一个反环流圈,这是影响“7. 21”暴雨次级环流的一个重要特征。

5 结论和讨论

利用常规观测、加密自动气象站降水资料、NCEP/NCAR 再分析资料等,用天气动力学诊断方法,研究了高空急流及其散度场和与高空急流相伴的次级环流对“7. 21”暴雨的动力作用,得到以下结论:

(1)“7. 21”暴雨有明显的阶段性,14 时为降水突然增强时刻,19 时为降水最大时刻。

(2)“7. 21”暴雨的发生和西来的高空急流东移至北京上空有关,“7. 21”降水的两个不同时刻的高空急流、散度场和次级环流的配置明显不同。在整个降水过程中,高空急流轴缓慢东移,且经向度不断增大。降水突然增强的 14 时,高空强辐散区是由高空急流所导致的高空辐散与低层西北涡“人”字形暖切变的低层辐合共同作用的结果,加上此时高空辐散区南北范围明显扩大,来自东南方的暖湿气流在北京上空上升,使得北京 14 时降水量突然增大。

(3)在降水最大时刻,高空急流轴经向度进一步加大,此时高空辐散主要是由对流层低层的西北低涡所导致,北京上空为深厚的上升运动区,来自东南的暖湿气流为北京地区提供了良好的水汽条件,使得 19 时北京降水量达到最大。

(4)“7. 21”暴雨中降水突然增强时刻和降水量最大时刻,上升支均出现在高空急流入口区右侧,但是,次级环流的下沉支均发生在北京的东南部,这是影响“7. 21”暴雨的次级环流的一个重要特征。

需要指出的是,由于影响“7. 21”暴雨的主要天气形势和影响系统已有文献(俞小鼎,2012;孙继松

等,2012)对其进行了详细研究,因此,本研究仅从高空急流对“7. 21”暴雨的动力作用进行了分析。至于影响高空急流变化的原因,可参照 Zhang 等(2003)通过计算动量收支的方法,来解释“7. 21”暴雨中高空急流变化的可能原因和机理。

参考文献

- 程龙, 刘海文, 周天军等. 2013. 近 30 余年来盛夏东亚东南季风和西南季风频率的年代际变化及其与青藏高原积雪的关系研究. *大气科学*, 37(6): 1326-1336
- 程正泉, 陈联寿, 李英. 2012. 登陆热带气旋海马(0421)变性加强的诊断研究. *气象学报*, 70(4): 628-641
- 丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析方法. 北京: 科学出版社, 253pp
- 李兆慧, 王东海, 王建捷等. 2011. 一次暴雪过程的锋生函数和急流-锋面次级环流分析. *高原气象*, 30(6): 1505-1515
- 廖移山, 冯新, 石燕等. 2011. 2008 年“7. 22”襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响. *气象学报*, 69(6): 945-955
- 孙继松, 何娜, 王国荣等. 2012. “7. 21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探. *暴雨灾害*, 31(3): 218-225
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明等. 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征. *大气科学*, 37(3): 705-718
- 陶祖钰, 黄伟. 1994. 大暴雨过程中与急流相关气块的三维运动分析. *气象学报*, 52(3): 359-367
- 伍荣生. 1999. 现代天气学原理. 北京: 高等教育出版社, 319 pp
- 徐海明, 何金海, 周兵. 2001. “倾斜”高空急流轴在大暴雨过程中的作用. *南京气象学院学报*, 24(2): 155-161
- 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
- Brill K F, Uccellini L W, Burkhart R P, et al. 1985. Numerical simulations of a transverse indirect circulation and low-level jet in the exit region of an upper-level jet. *J Atmos Sci*, 42(12): 1306-1320
- Chen Q S. 1982. The instability of the gravity-inertia wave and its relation to low-level jet and heavy rainfall. *J Meteor Soc Japan*, 60(5): 1041-1057
- Cressman G P. 1981. Circulation of the west Pacific jet stream. *Mon Wea Rev*, 109(12): 2450-2463
- Hakim G J, Uccellini L W. 1992. Diagnosing coupled jet-streak circulations for a northern plains snow band from the operational nested-grid model. *Wea Forecasting*, 7(1): 26-48
- Hassan E M, Azadi M, Meshkatee A H, et al. 2011. The role of the subtropical jet stream in cyclogenesis over the central Mediterranean sea: A case study of February 1974. *Int J Phys Sci*, 6(12): 2983-2988
- Hirahara S, Ohno H, Oikawa Y, et al. 2012. Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. *J Meteor Soc Japan*, 90(5): 663-671

- Lee D K, Park J G, Kim J W. 2008. Heavy rainfall events lasting 18 days from July 31 to August 17, 1998, over Korea. *J Meteor Soc Japan*, 86(2): 313-333
- Liu H W, Zhou T J, Zhu Y X, et al. 2012. The strengthening East Asia summer monsoon since the early 1990s. *Chinese Sci Bull*, 57(13): 1553-1558
- Matsumoto S, Ninomiya K, Yoshizumi S. 1971. Characteristic features of Baiu front associated with heavy rainfall. *J Meteor Soc Japan*, 49: 267-281
- Prezerakos N G, Flocas H A, Brikas D. 2006. The role of the interaction between polar and subtropical jet in a case of depression rejuvenation over the Eastern Mediterranean. *Meteor Atmos Phys*, 92(1-2): 139-151
- Shin C S, Lee T Y. 2005. Development mechanisms for the heavy rainfalls of 6 - 7 August 2002 over the middle of the Korean Peninsula. *J Meteor Soc Japan*, 83(5): 683-709
- Tao S Y, Chen L. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China // Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 60-92
- Uccellini L W, Johnson D R. 1979. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms. *Mon Wea Rev*, 107(6): 682-703
- Uccellini L W, Kocin P J, Petersen R A, et al. 1984. The presidents' day cyclone of 18 - 19 February 1979: Synoptic overview and analysis of the subtropical jet streak influencing the pre-cyclogenetic period. *Mon Wea Rev*, 112(1): 31-55
- Whitney L F Jr. 1977. Relationship of the subtropical jet stream to severe local storms. *Mon Wea Rev*, 105(4): 398-412
- Zhang Q H, Lau K H, Kuo Y H, et al. 2003. A numerical study of a mesoscale convective system over the Taiwan Strait. *Mon Wea Rev*, 131(6): 1150-1170