

赵思雄,孙建华,鲁蓉,等,2018.“7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J].气象,44(3):351-360.

“7·20”华北和北京大暴雨过程的分析^{*}

赵思雄¹ 孙建华^{1,2,3} 鲁 蓉^{1,3} 傅慎明¹

1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 中国科学院大学,北京 100049

提 要:本文对2016年7月19—21日华北及北京的特大暴雨作了研究和讨论。研究表明,该次暴雨为诸多有利因素所致:前期副热带高压呈带状稳定维持,中旬末东退,后呈“东高西低”分布,华北处于槽前辐合上升区,有利对流发生。高空西来槽停滞加深(并切断)与低层江淮暖性倒槽叠加,快速发生发展成为一深厚的气旋,出现了高低空系统的耦合。有一支暖(湿)输送带自南向北推进至关重要,源地可追踪至南中国海等低纬度地区,水汽通量辐合大值区先后经长江、黄淮至华北,有明显的中低纬度系统的相互作用。2016年的“7·20”暴雨和2012年“7·21”暴雨均存在明显的多尺度特征,但其具体特征有所不同。前者强烈对流活动稍弱于后者,降水趋势平稳,然而由于其大尺度强迫持续时间长,累积降水量仍然较大。本文主要集中于一些事实的分析,对于该次暴雨的机理尚需作进一步研究。

关键词:特大暴雨,气旋,暖输送带,多尺度特征

中图分类号:P458

文献标志码:A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.03.002

Analysis of the 20 July 2016 Unusual Heavy Rainfall in North China and Beijing

ZHAO Sixiong¹ SUN Jianhua^{1,2,3} LU Rong^{1,3} FU Shenming¹

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: In this paper, both CMA and NCEP data are used to analyze the extremely severe rainfall in North China and Beijing which occurred during 19—21 July 2016 and brought the serious damage to people and society. The results are as follows. (1) At the end of the second ten days of July, the subtropical high moved eastwards and then maintained. The short wave trough was stopped and was almost stationary which was very favorable to the occurrence of the severe rainfall. (2) The coupling between the short wave trough in upper troposphere and the warm inverse trough at the surface caused rapid cyclogenesis. (3) The warm conveyor belt as the moisture passage transported very rich water vapor to North China and the obvious interaction between middle and lower latitude systems existed. (4) There were obvious multi-scale characteristics in the 20 July 2016 heavy rain and the 21 July 2012 rainstorm, but they are different. The large scale forcing of the former was slight stronger, whereas the convection of the latter was more active. The mechanism and mesoscale systems of the rainstorm in 20 July 2016 need to be investigated in future.

Key words: heavy rain, cyclone, warm conveyor belt, multi-scale characteristics

* 国家自然科学基金项目(41675045)和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2016LASW-B05)共同资助

2017年5月19日收稿; 2017年11月22日收修定稿

第一作者:赵思雄,主要从事中尺度气象学研究. Email: zhaosx@mail.iap.ac.cn

通信作者:孙建华,主要从事中尺度气象学研究. Email: sjh@mail.iap.ac.cn

引言

我国地处东亚季风区,每年的“七下八上”(7月下旬和8月上旬)为华北的雨季。与华南地区和长江流域不同,华北多突发性和局地性降水,强降水往往集中于2~3次(或几次)过程,预报难度较大。已有的研究表明,华北降水(包括部分东北降水),其主要影响系统大体有如下几类:低槽、低涡、冷锋、切变线、气旋、台风及其远距离相互作用等(游景炎,1965;郭肖容,1977;陶诗言,1980;丁一汇等,1980;陶诗言等,2003;孙建华等,2005;赵思雄等,2004)。一般而言,由于水汽供应所限,系统维持的时间不长,通常难以达到暴雨的程度(台风及其倒槽除外),更不用说特大暴雨了。孙继松等(2015)对近10年北京地区极端暴雨事件进行了统计,指出不同类型的极端暴雨过程,大尺度水汽输送条件不同。并且极端暴雨的数值预报难度也非常大(王淑莉等,2015;庄潇然等,2017)。

2016年7月19—21日华北出现了强降水过程,影响的地区包括京津冀和北方多个省份,造成了重大灾害。该次暴雨持续时间长,强度大,损失严重。为了总结经验,一些科学问题需要反思:(1)是什么天气系统引发了这场特大暴雨?(2)其水汽来自何方?(3)与2012年“7·21”大暴雨有何异同?为此,本文对这场特大暴雨作了分析研究。

1 雨情和灾情

2016年7月19—21日,华北地区出现大范围的暴雨。受影响的有:北京、天津、河北、河南、山东、山西、内蒙古,还有辽宁、吉林、黑龙江等10省(区、市)。此次降雨过程是2016年汛期京津冀及辽宁西南部地区最强的一次,河北井陉(379.7 mm)、武安(374.3 mm)及北京大兴(242.0 mm)等的日降雨量突破历史极值。首都机场取消航班195次,北京水文站第一次发布洪水黄色警报。图1给出了7月20日08时至21日08时(北京时,下同)的降水量分布。

该次过程影响北京的时间较长,超过了55 h。7月19日01时至21日08时,全市降水量平均为212.6 mm,城区平均274.0 mm,有125个雨量站超过250 mm,但此次降水过程雨势较为平稳,最大小

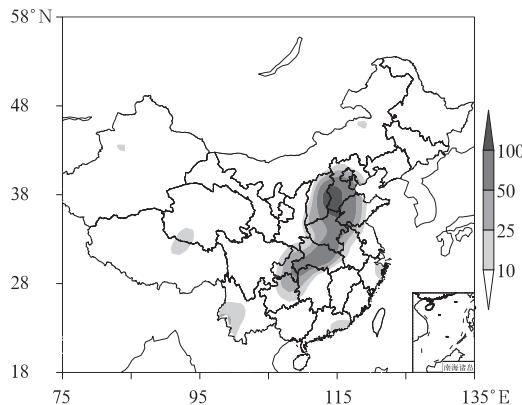


图1 2016年7月20日08时至21日

08时的24 h观测降水量(单位:mm)

Fig. 1 The 24 h observed precipitation amount during 08:00 BT 20—08:00 BT
21 July 2016 (unit: mm)

时雨强为 $56.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,弱于2012年“7·21”的 $100.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。最大单站降水量在门头沟东山村为453.7 mm,小于“7·21”的541 mm(谌芸等,2012;孙继松等,2012;孙建华等,2013)。从每小时降水可以看到降水系统随时间的演变特征(图2)。总的的趋势是降水区由南向北推进,在北京和华北地区较长时间停留。

2 资料和分析方法

本文分析和诊断所用的资料包括:中国气象局提供的全国探空、逐小时加密降水资料、24 h降雨量和每3 h的地面观测,以及美国国家环境预报中心(NCEP)气候预报系统的全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,其时间分辨率为6 h(Saha et al, 2010)。使用这些资料,分析了环流和天气系统,计算了这次暴雨的动力热力特征和相关物理量,如水汽通量及水汽通量散度等。此外,使用探空及地面资料分别分析了大气层结、地面系统及北京的对流能量。还用每小时降水量,探讨了降水过程的某些中尺度分布特征。

3 环流特征——副热带高压东退后稳定

为了弄清这次强降水期间的环流背景与天气系统,本文对2016年7月19日08时至20日20时的地面和各层的环流形势作了分析。

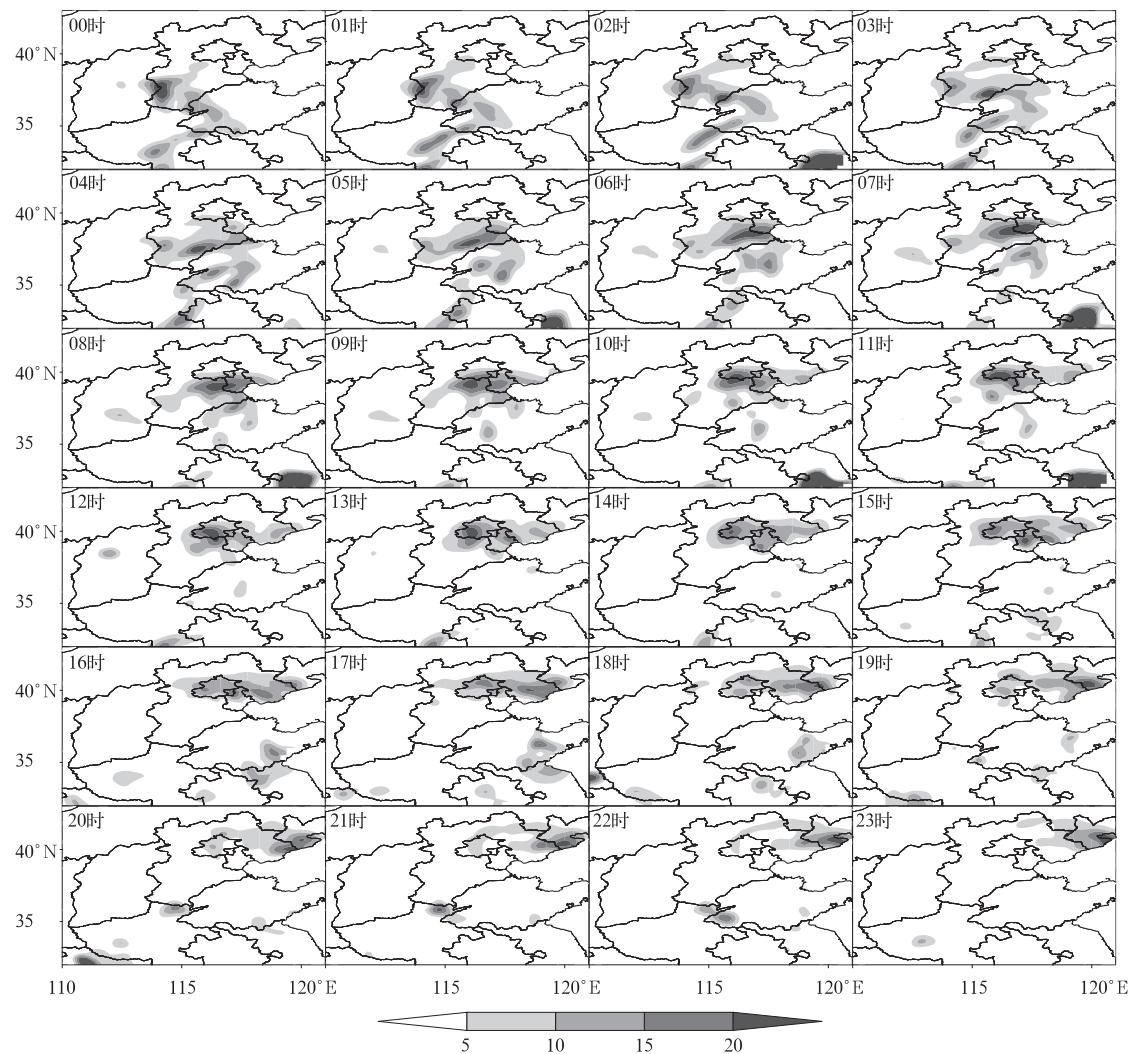


图 2 2016年7月20日00—23时的观测小时降水量(单位:mm)

Fig. 2 Hourly observed precipitation during
00:00—23:00 BT 20 July 2016 (unit: mm)

讨论环流时一般多注意中层500 hPa,而此次为一深厚的系统,得看更高的层次。7月20日08时,100 hPa上(图3a),在40°N以北为西风带,25°N以南为东风带,在这两者之间青藏高压呈带状向东延伸至130°E,在青藏高压的东北方,即华北地区上空,是明显的辐散区。高空的强辐散,有利于上升运动的加强。150 hPa(图略)上此特征则更为清楚,已经有一低槽,其槽线位于山西上空,河北和北京正好处于槽前属有利于暴雨发生的环境。200 hPa(图3b)上的槽进一步加深。这表明,由于冷空气东移,并在贝加尔湖以南向南入侵。华北正处于槽后高空急流核出口区的左侧,为上升区。

500 hPa上,7月上旬副热带高压一直呈带状伸展至中国大陆上。中旬末期开始向东撤退,之后趋

于稳定(图3c),呈“东高西低”型。这种稳定形势的形成,虽然未达到典型的经向型(深槽)的程度,但它停滞少动,有利于降水系统的维持,致使华北地区的降水量明显的增强。另一方面,在中纬度有一横槽从贝加尔湖一直延伸至巴尔喀什湖,有冷空气不断东移,在华北受阻加深,甚至有切断低压出现。20日08时,500 hPa上出现闭合涡旋(图3c),中心值达5760 gpm,位于河北和山西交界处的太行山南脉一线。在700 hPa(图3d)和850 hPa(图3e)上均有闭合的低压出现。从地面图上(图3f),可以清楚地看到一个气旋已经形成,其暖锋和冷锋均很清楚。切断低压为对流层中上层的系统。它的出现并不一定在低层要有低压相对应,而此次过程从低层到高层为一深厚的涡旋,这是北京“7·20”华北特大暴雨

的突出特点。

过去也曾有过涡旋系统北上引发华北暴雨，一类是台风和台风倒槽(孙建华等, 2006)。另一类是西南低涡东移北上，如 1963 年 8 月的大暴雨等(陶诗言, 1980)。像这类新生的华北气旋，尤其是能引发特大暴雨的气旋较为罕见。为了探讨该气旋生成和移动，分析了对流层中低层每 6 h 一次的低压(气旋)及高空低压系统的路径图(图 4)，高、低空低压系统的生成和移动均很清楚，未能追踪到热带地区的扰动和西南地区的低涡。尽管，在该阶段的对流层低层可以见到西南低涡，但从目前的资料分析，从时间的连续性和空间分布的合理性来看，尚不能得出是与西南低涡直接相关联的结论。它可能是一次长江中下游暖性倒槽与中高层短波槽“遭遇”时，诱生出的低压(气旋)系统。因而可能存在高、低空系统的相互作用。该类气旋发生地距华北较近，且快速发展，预见期较短，是需要特别注意的。

这次降水与大尺度系统的存在及移速较慢有一定关系。19 日 20 时地面气旋(低压)系统已经形成，但中心偏于江淮流域之间(图略)。至 20 日 08 时气旋北移，其东侧和北侧的等压线密集程度加大，尤其在河北北部和北京附近，有明显的偏东风和东南风(图 3f)。一般而言，某地的降水量 P 是由降水率和降水维持时间两者所决定的(Lin, 2007)。本例降水持续 55 h，是 2012 年“7·21”暴雨 20 h 的 2.75 倍。尽管降水率稍偏小，但总降水量仍然可能很大。

4 暖(湿)输送带北伸与中低纬系统相遇

由前所述，华北暴雨常与中低纬度系统的相互作用有关(陶诗言等, 2003)。一般来说，单一的系统(除台风和台风倒槽外)难以引发特大暴雨。1963 年 8 月的大暴雨(陶诗言, 1980), 1973 年 7 月 2 日北京大暴雨(王继志, 1974), 2012 年 7 月 21 日大暴雨(孙建华等, 2013)均有此特点。甚至 2015 年北京秋季大阅兵活动之后紧接着发生的“9·4”强降水(Zhao et al, 2016)也属此列。因此，只看温带系统或只注意气旋系统是不够的，容易出现误导。

已注意到，在 2012 年“7·21”特大暴雨期间，始

终与它相伴的有一条从低纬度伸向到华北的暖(湿)输送带(warm conveyor belt)。其实，在很多情况下低空急流(LLJ)可起到输送带的作用。这里讲输送带更多是强调了对暖湿空气的输送及其影响。国外也多是强调温带的一支与气旋发展有关的暖湿气流为输送带(Harrold, 1973; Carlson, 1998; Field and Wood, 2007)。东亚较强的水汽输送可能更复杂些，有的还与台风(热带扰动)、赤道辐合带及季风有关(陶诗言, 1980; 柳艳菊等, 2015)。当然，一定要将本例归为低空急流的作用，亦未尝不可。这里只是强调的侧重点有所不同而已。

为了讨论这一问题，计算了从地面至 300 hPa 的水汽通量和水汽通量散度(图 5)。7 月 19—21 日的共同特点是，有一片水汽通量的大值区，自南海一直伸向我国北方，恰似一条“供水管”将南方的水汽向华北地区输送。但“输送”所表征的仅是水汽通过的能力(即水汽通量)，而降水则是与该地区水汽集中的能力(即与水汽通量散度)有关。从 19—21 日，水汽通量的大值区是沿着暖湿输送带向北移动的，19 日 08 时(图 5a)大值区位于江淮流域，而前锋已抵达河北南部，故引发了上述区域的降水。20 日 08 时(图 5b)大值区抵达包括京津冀在内的华北广大地区，且偏南风和偏东气流对水汽的输送十分明显，这正好分别与东西走向的燕山山脉和南北走向的太行山脉几乎呈正交分布，有利于地形抬升增强垂直运动。北京处于暖输送带(低空急流)的左前方，又恰是高空急流出口区的左侧(图 3b)，高低空急流的上升区耦合，有利于涡旋的发展(图 3e)，华北可降水量分布的大值区达到 60 mm 以上。21 日 08 时(图 5c)，水汽通量的大值区进一步移向我国东北，从此时起华北降水开始减缓，直至最后结束。

20 日沿 117°E 的垂直剖面(图 6)上，20 日 08 时一支强劲的偏南气流由南至北通过冀中平原向北输送水汽，受地形及冷空气的影响，在北京以南 39°N 处明显抬升。这时，正是北京暴雨加强之时。除了暖湿空气的作用外，冷空气的贡献也存在，有很明显的冷暖平流分布(图 3e)。在 20 日 08 时，北京附近对流层中上层有很强的辐散区，而在低层有很清楚的辐合区。这表明，高层辐散和低层辐合共同推动了气旋的发生发展和维持。这是上下层的相互耦合，而不是单一的由上层向下的“贯通”。至 20 日

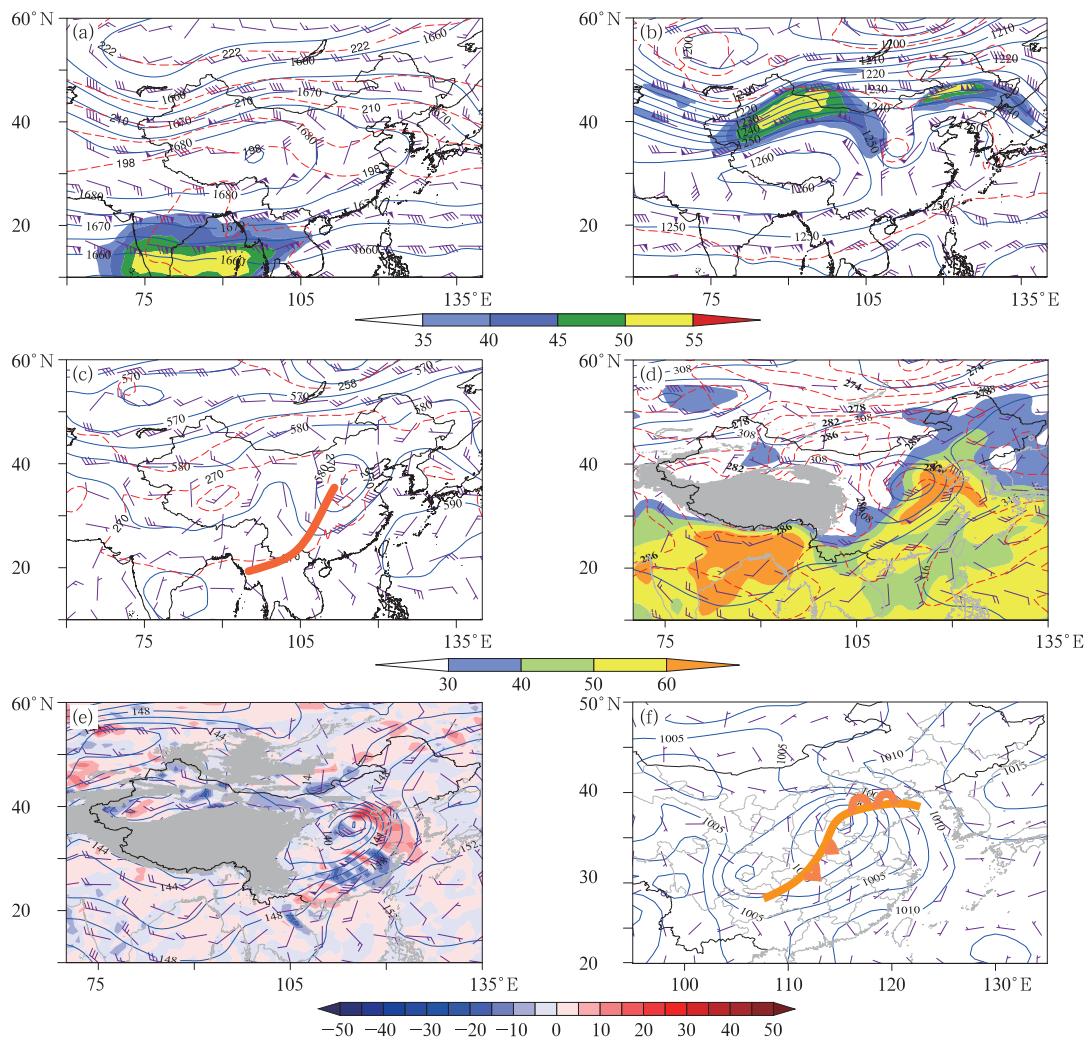


图3 2016年7月20日08时各层形势图

(a) 100 hPa, (b) 200 hPa, (c) 500 hPa, (d) 700 hPa, (e) 850 hPa, (f) 地面图

(图3a~3e, 蓝色等值线为位势高度, 单位: dagpm; 红色为温度, 单位: K; 紫色风标表示风场, 单位: $m \cdot s^{-1}$;图3a, 3b, 阴影表示高空急流区 $>35 m \cdot s^{-1}$; 图3d, 阴影为可降水量, 单位: mm; 图3e, 阴影为温度平流,单位: $10^{-5} K \cdot s^{-1}$; 图3f, 蓝色等值线为海平面气压, 单位: hPa,紫色风标表示近地面(sigma 0.995 层)风场, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 3 Synoptic charts at 08:00 BT 20 July 2016 at (a) 100 hPa, (b) 200 hPa,

(c) 500 hPa, (d) 700 hPa, (e) 850 hPa, (f) surface

[In Figs. 3a~3e, blue isoline is geopotential height (unit: dagpm), red isoline is temperature (unit: K), purple is wind vector (unit: $m \cdot s^{-1}$). In Figs. 3a, 3b, shaded area represents upper level jet ($>35 m \cdot s^{-1}$); in Fig. 3d, shaded area is precipitable water (unit: mm); in Fig. 3e, the shaded illustrates temperature advection (unit: $10^{-5} K \cdot s^{-1}$); in Fig. 3f, blue line is isobar (unit: hPa), purple vector is near surface (sigma 0.995 level) wind vector, unit: $m \cdot s^{-1}$]

20时, 整个输送带有所减弱, 且上升区已偏北, 高层辐散和低层辐合也均有所减弱。

5 高低空系统的耦合使气旋快速生成

早期关于气旋的研究始于挪威学派, 他们认为

气旋的发生是由一条斜压性很强的低层锋区上的扰动发展而成, 提出了当时的锋面气旋模型(Palmén and Newton, 1969), 主要强调了低层系统及斜压性的作用, 有人称它为A类气旋。随着高空探测的进步及资料的获取, 人们开始关注到西风带上波动的发展以及由它们诱发的气旋, 并不一定要求地面先

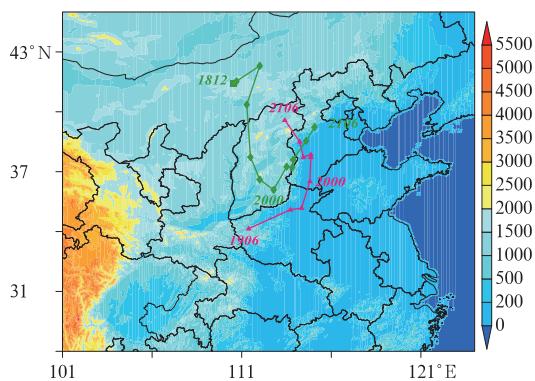


图 4 2016 年 7 月 18—21 日气旋(850 hPa: 红色折线)和短波槽路径(500 hPa: 绿色折线)
(阴影为地形高度, 单位: m)

Fig. 4 Tracks of the 850 hPa cyclone (red line) and 500 hPa trough (green line) in 18—21 July 2016
(Shaded area represents terrain, unit: m)

有锋面存在, 称之为 B 类气旋(Petterssen and Smebye, 1971)。这一发现进一步扩大了人们的视野。但是, 还有一些气旋(低压或非锋面气旋), 因为地面或高空无很强的斜压性, 又主要限于中低层, 很难归为 A 类或 B 类, 诸如, 我国和东亚梅雨锋上的气旋等(Ninomiya and Akiyama, 1971; 赵思雄等, 2004), 也有人将它们归为 C 类。即便如此, 仍然很难将我国北方的一些气旋完全纳入以上各类之中。似乎我国的气旋发展不如欧美“典型”, 譬如, 尺度不是那么大, 斜压性似乎不是那么强, 暖锋不是那么清楚。然而就其影响的天气而言, 仍不可小视。东亚的情况比较复杂, 已经注意到2016年“7·20”大暴

雨相关的气旋, 似属上下耦合, 即高低层系统相互作用诱发的气旋, 是具有特色的。

为了讨论这一问题, 已追踪了气旋的移动(图 4)。又沿气旋移动路径, 对不同时刻通过气旋中心所在纬度做了垂直剖面, 分析其上的涡度分布、温度离差等。可以看到, 19 日高空有一个涡度大值区东移, 20 日向东追并接近低层涡度大值区(图 7)。19 日 14 时 113°E 附近低层有一涡度大值区, 这里是未来低涡发生的地区(图 7a)。恰好这一时刻, 在对流层中层 400 hPa, 107°E 处有另一涡度大值区。19 日 20 时低层大值区移至 114°E, 而高层大值区移至 110°E(图 7b)。20 日 02 时, 而低层的中心大体仍在 114°E, 高层大值区移至 111°E, 两者之间的距离进一步缩小(图 7c)。20 日 08 时, 高低空两个大值区相互联结, 从表面上看似乎成为了一个系统(图 7d)。此后, 至 20 日 20 时“涡度柱”一直稳定在北京附近(115°~116°E)(图 7e, 7f)。这也许是涡旋系统加强并得以维持使暴雨增强的原因。21 日 02 时低层涡旋较快减弱, 高层仍得以维持(图 7g), 至 21 日 08 时, 高中低层都进一步减弱(图 7h), 此后雨区移向东北, 华北的雨势逐渐趋于停止。

还对温度离差作了分析。所谓温度离差, 定义为每点(i)上的 T_i 值对平均值 \bar{T} 的偏差, 即 $\Delta T_i = T_i - \bar{T}$, 而 $\bar{T} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 T_i$ 。因为, 中纬度气旋与热带气旋相比, T 值变化较小, 因而最好采用求离差的作

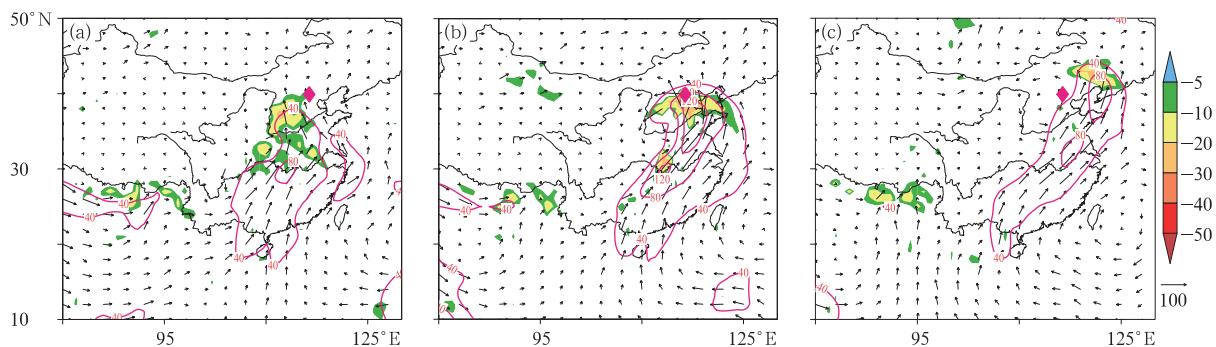


图 5 2016 年 7 月(a)19 日 08 时, (b)20 日 08 时, (c)21 日 08 时从地面到 300 hPa 整层积分的水汽通量(矢量和红色等值线, 单位: $10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
和水汽通量散度(阴影, 单位: $10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 5 Water vapor flux (vector and contour, unit: $10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) and divergence of water vapor flux (shaded, unit: $10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) from surface to 300 hPa at (a) 08:00 BT 19, (b) 08:00 BT 20, (c) 08:00 BT 21 July 2016, respectively

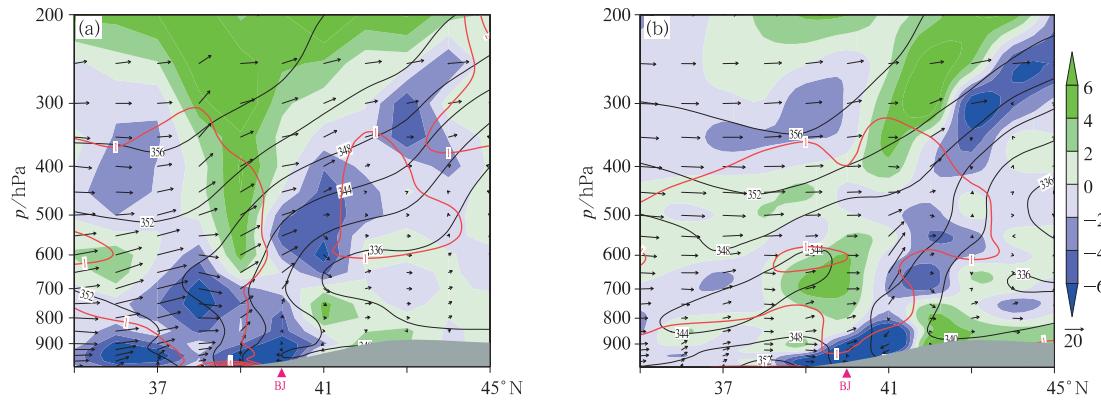


图 6 2016 年 7 月 20 日(a)08 时,(b)20 时沿 117°E 垂直剖面上的散度(阴影,单位: 10^{-5} s^{-1})、
假相当位温(黑色等值线,单位:K)、位涡(红色等值线,单位:PVU)及
垂直环流(箭矢: u 和 $\omega \times (-5)$, 单位分别为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Vertical cross sections of divergence (shaded area, unit: 10^{-5} s^{-1}), pseudo-equivalent potential temperature (black isoline, unit: K), potential vorticity (red isoline, unit: PVU) and vertical circulation (vector: u and $\omega \times (-5)$, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)
along 117°E at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 20 July 2016

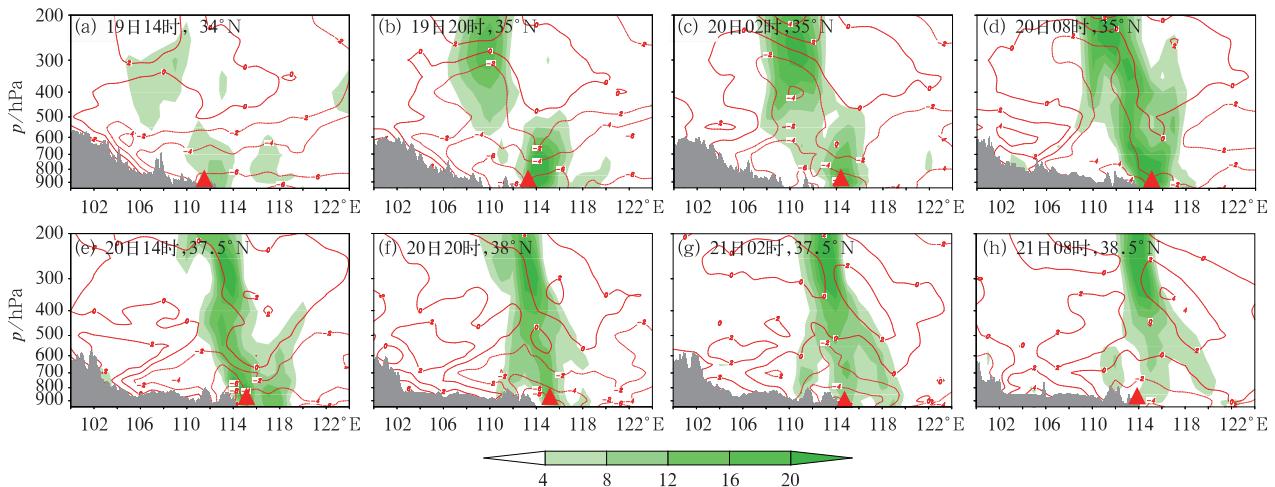


图 7 2016 年 7 月 19—21 日沿涡旋中心纬度的涡度(阴影,单位: 10^{-5} s^{-1})
和温度离差(实线,单位:K)的剖面
(三角形为涡旋中心,灰色阴影为地形)

Fig. 7 Zonal cross sections of vorticity (shaded area, unit: 10^{-5} s^{-1}) and temperature deviation (contour, unit: K) along vortex centers during 19—21 July 2016
(Triangle shows the vortex center, and the grey shading is terrain)

法。分析表明,一开始在气旋的生成阶段,其特征并不明显。但随着气旋的北上和降水的增强,从 20 日 02 时至 21 日 02 时(图 7c~7g),在对流层中上层 300~400 hPa 附近出现了 2 K 的增温区,增温的可能原因有待作更多的诊断。对流层中上层的增暖有利于低层气压的降低,从而使低层辐合增强,对气旋(低压)的维持是有利的,这与第二类条件不稳定

(CISK)有某些相似。当然,这与用于解释台风发展的 CISK 理论仍有较大不同,台风增强时,其暖心可达 10 K 以上,本次过程仅为 2 K。但是,它与温带气旋所特有的“冷心”结构也不同,因而这次过程气旋情况有些复杂。虽有暖心出现,由于其强度较弱,它可能具有二重性的特点,一方面使辐合增强低层减压,有利暴雨持续,出现某种正反馈;另一方面,由

于上层增温,环境变暖,CAPE 及浮力减小,对强烈对流也可能有不利影响。这些方面也许是今后需要继续探讨的问题。

为了讨论气旋系统的三维特征,又计算了以气旋中心点周边 $5^\circ \times 5^\circ$ 区域内的一些物理量的平均垂直廓线分布(图 8)。19 日 14 时(图 8a),高层 200 hPa 有强度达到 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐散,而低层 950 hPa 为约 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐合,这有利于系统的发展。但另一方面,中低层 400 hPa 以下维持正涡度,而高层有较强的上升运动,350~400 hPa 为 $13 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,表明系统有进一步发展的可能。19 日 20 时(图 8b),正涡度区向上伸展达 100 hPa,低层垂直运动明显加大。20 日 08 时(图 8c),低层辐合加强达 $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。维持上升运动区达到 100 hPa,20 日 08 时(图 8d)低层正涡度明显加强,在 700~750 hPa 达 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。此后,20 日 14—20 时(图 8e,8f)暴雨持续期间,深厚层次仍维持正涡度,只是垂直运动大值区出现在低层。至 21 日 02 时(图 8g)和 08 时(图 8h)垂直运动和辐散场均大为减弱,虽整层仍维持正涡度,但大值区偏于高层 250~300 hPa,低层明显变弱,大暴雨处于减弱和消散阶段。可以看出,气旋的演变与暴雨过程有一定的对应关系。

如前所述,此次过程低层气旋及高空低槽(涡)的配合至关重要(图 4),低层气旋及高空低槽(涡)开始相向而行(接近),而后是相互影响相伴而行,表

明两者之间存在较好的高低空互动关系。

6 大气层结状态与深厚偏东风层

利用大暴雨期间北京市 6 h 一次的探空资料,分析了 7 月 20 日早、中、晚的大气层结状态。结果表明,这次暴雨与一般的强对流天气有很大不同,CAPE 的作用不够明显。20 日 08 时(图 9a),有较为深厚的湿层,CAPE 值为 0,CIN 也为 0,表明很容易就能启动对流或者对流已经开始,可能是由环境的动力强迫抬升以维持降水。此外,400 hPa 以下为东风,表明北京处于深厚气旋的北侧。而 300~200 hPa 为西南偏南风,意味着北京处在高空槽前。20 日 14 时(图 9b),与 08 时相似,即 CAPE 和 CIN 值为 0,但东风层厚度仍达 500 hPa 层,400 hPa 以上为槽前偏南风。20 日 20 时(图 9c),情况有了很大的变化,东风层已大大缩减,仅限于 800 hPa 以下,尽管 CAPE 值仍很小,但 CIN 已增至 $43 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明环境逐渐变得不利于对流的发生发展,导致雨势趋于减弱。

偏东风与北京的强降水关系密切,不但对夏季暴雨,甚至对冬季降雪也有影响,冬季有所谓的回流天气型。这种偏东风若和地形有利配合,则降水更强。图 10 给出了霞云岭 1 h 降水量的时间分布,其最大值与偏东风最盛时相对应,且有明显的中尺度特征。从图 2 可知,这次北京暴雨的触发区和大值

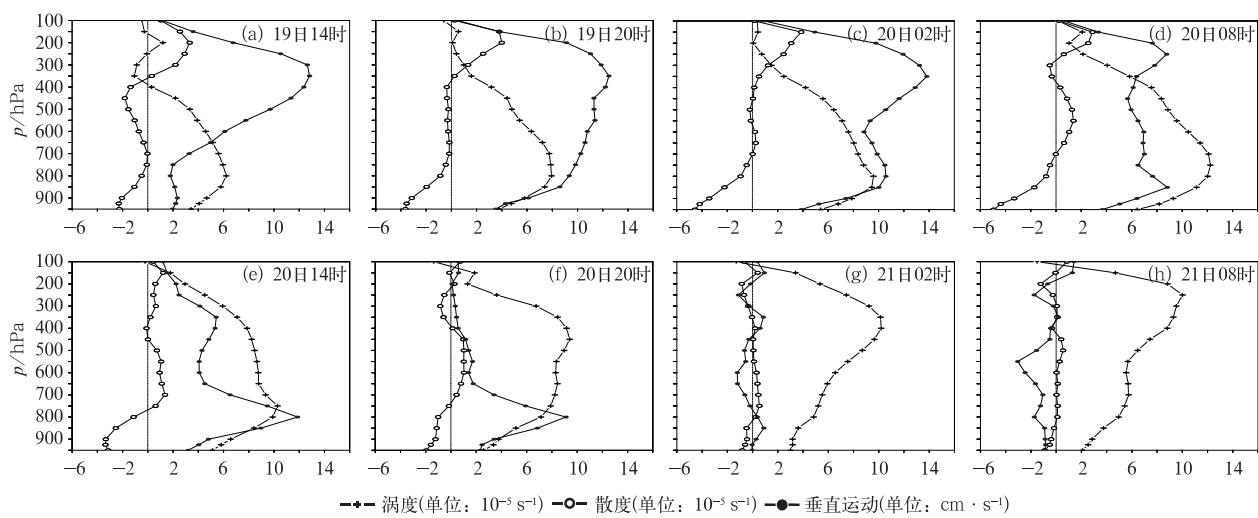


图 8 2016 年 7 月 19—21 日(a~h)以 850 hPa 上涡旋中心 $5^\circ \times 5^\circ$ 范围水平平均各层上的物理量廓线
(涡旋中心位置见图 4)

Fig. 8 Vertical profiles of vorticity (unit: 10^{-5} s^{-1}), divergence (unit: 10^{-5} s^{-1}), vertical velocity (unit: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) at individual cyclone center ($5^\circ \times 5^\circ$) in Fig. 4 during 19—21 July 2016 (a—h)

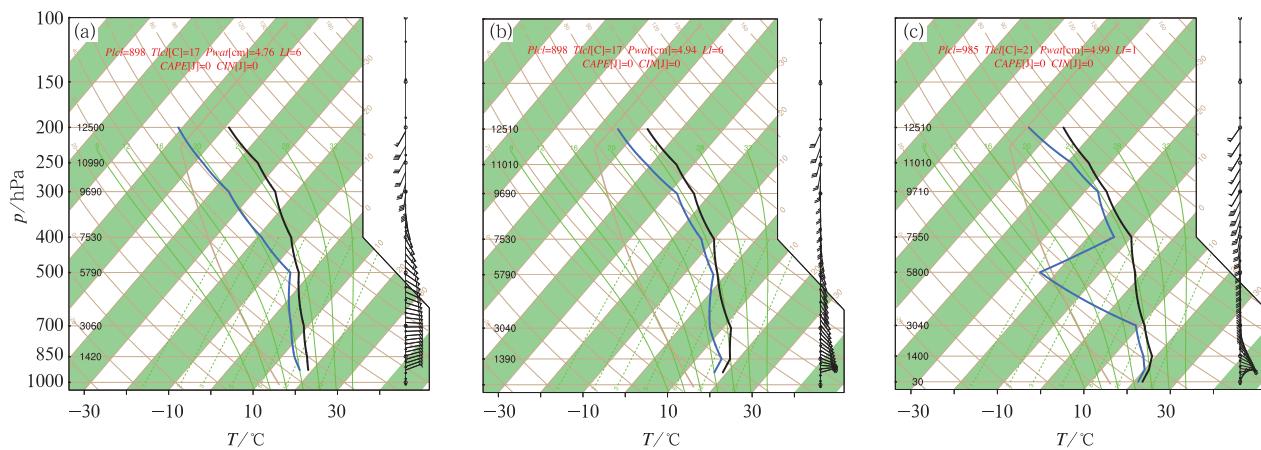


图9 2016年7月20日(a)08时,(b)14时,(c)20时北京探空曲线
(黑色实线表示温度曲线,蓝色实线为露点温度曲线)

Fig. 9 Skew T-log ρ diagram from Beijing sounding data
at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 20:00 BT 20 July 2016
(Black solid line represents temperature profile, and blue solid curve is dew point profile)

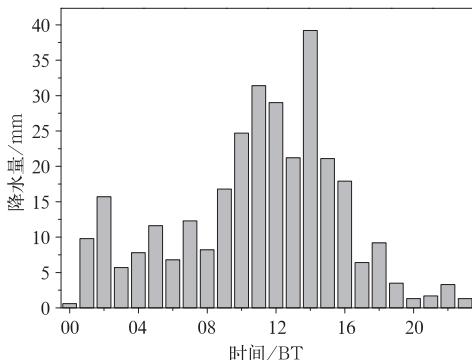


图10 2016年7月20日霞云岭每小时
降水量分布图

Fig. 10 Hourly precipitation at Xiayunling,
Beijing from 00:00 BT to
23:00 BT 20 July 2016

区主要集中于西部。这可能是因为北京的西边和北边为山地,山区对降水存在增幅效应,偏东风(与山脉正交)可使增幅更为明显。因此,该次强降水不得不提到地形的影响。首先,地形对垂直运动会有所增强,而垂直运动又可影响降水量的大小。平原地区降水时,其垂直运动由环境大气决定(记为 w_{env}),而在山区气流沿山坡爬升时,其垂直运动既受环境大气(如对流层上层的辐散及低层辐合)的影响,又受地形的影响,为: $w=w_{oro}+w_{env}$,而地形抬升所致的垂直运动增量(w_{oro}),大体可由后式估算(Lin, 2007),即 $w_{oro}=\frac{Dh}{Dt}\approx V_H \cdot \nabla h$,这里 $h(x, y)$ 是山

的高度,它是 x, y 的函数,而 V_H 是低层的水平风速。然而,实际地形呈三维起伏状,较为复杂,难以准确计算。虽然如此,对这次“7·20”暴雨过程至少应定性考虑到这一因素的影响。

7 结论与讨论

这次2016年“7·20”北京特大暴雨发生的具体条件就单个系统来看“似曾相识”,然而诸多系统能同时“巧遇”,则很有特色。结论如下:

(1) 大尺度环境的调整和稳定:暴雨过程发生前副热带高压明显东退,后稳定维持。高空西来槽受阻,移动缓慢,使降水时间延长,为大暴雨的产生提供了有利的条件。

(2) 高低空系统的耦合及气旋的发展:2012年的“7·21”大暴雨不同,“7·21”主要受锋前暖区和锋面降水影响,而2016年的“7·20”主要受华北新生气旋系统影响。高低层涡旋的相互耦合,共同导致气旋发展,引发了长时间的降水。这样深厚的涡旋在过去华北暴雨中尚不多见。

(3) 中低纬度系统的相互作用:暖(湿)输送带将大量的水汽从南海直接输送至华北。如果没有这条输送带(LLJ)的参与,华北暴雨似难于发生(尽管其具体的表现形式有所不同)。已揭示,这次“7·20”暴雨的暖(湿)输送带与南海等低纬地区的水汽有关。

(4) 多尺度特征的不同结构:“7·20”与“7·

“21”类似,都具有多尺度的特征,但其具体表现形式和结构有所不同。前者强烈对流活动稍弱于后者,降水趋势平稳,然而由于其大尺度强迫持续时间长,累积降水量仍然较大。事实表明,大暴雨的发生除了决定于降水强度外(与中尺度对流系统关系密切),大尺度降水系统稳定维持,其作用也可能使暴雨“加码”。由于此类问题涉及到多尺度现象及其相互作用等,已超出了本文讨论的范围,需要今后继续关注。

应当强调,本文主要从环流背景及天气系统的特征对“7·20”特大暴雨过程作了一些探讨,是很初步的。对影响系统及特大暴雨相关的机理等,尚需作更多的研究。

参考文献

- 谌芸,孙军,徐琨,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[J].气象,38(10):1255-1266.
- 丁一汇,李吉顺,孙淑清,等,1980.影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析[C]//暴雨及强对流天气的研究——中国科学院大气物理研究所集刊(第9号).北京:科学出版社:1-13.
- 郭肖容,1977.华北夏季暖切变暴雨个例的初步分析[J].大气科学,1(4):256-264.
- 柳艳菊,丁一汇,张颖娴,等,2015.季风暖湿输送带与北方冷空气对“7·21”暴雨的作用[J].热带气象学报,31(6):721-732.
- 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[J].气象学报,64(1):57-71.
- 孙建华,张小玲,卫捷,等,2005.20世纪90年代华北特大暴雨过程特征的分析研究[J].气候与环境研究,10(3):492-506.
- 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[J].大气科学,37(3):705-718.
- 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[J].暴雨灾害,31(3):218-225.
- 孙继松,雷蕾,于波,等,2015.近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报,73(4):609-623.
- 陶诗言,1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社:1-225.
- 陶诗言,赵思雄,周晓平,等,2003.天气学和天气预报的研究进展[J].大气科学,27(4):451-467.
- 王继志,1974.1973年7月2日北京特大暴雨分析[J].气象科技,2(1):1-9.
- 王淑莉,康红文,谷湘潜,等,2015.北京7·21暴雨暖区中尺度对流系统的数值模拟[J].气象,41(5):544-553.
- 游景炎,1965.华北暖性切变线结构的一些特征[J].气象学报,35(1):107-110.
- 赵思雄,陶祖钰,孙建华,等,2004.长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M].北京:气象出版社:1-282.
- 庄潇然,闵锦忠,王世璋,等,2017.风暴尺度集合预报中的混合初始扰动方法及其在北京2012年“7·21”暴雨预报中的应用[J].大气科学,41(1):30-42.
- Carlson T N,1998. Mid-Latitude Weather Systems[M]. Boston, MA:American Meteorological Society.
- Field P R,Wood R,2007. Precipitation and cloud structure in midlatitude cyclones[J]. J Climate,20(2):233-254.
- Harrold T W,1973. Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbances[J]. Quart J Roy Meteor Soc,99(420):232-251.
- Lin Y L,2007. Mesoscale Dynamics[M]. Cambridge:Cambridge University Press.
- Ninomiya K, Akiyama T,1971. The development of the medium-scale disturbance in the Baiu front[J]. J Meteor Soc Japan Ser II,49A:663-677.
- Palmén E, Newton C W,1969. Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation[M]. New York: Academic Press.
- Petterssen S,Smebye S J,1971. On the development of extratropical cyclones[J]. Quart J Roy Meteor Soc,97(414):457-482.
- Saha S,Moorthi S,Pan Hualu,et al,2010. The NCEP climate forecast system reanalysis[J]. Bull Amer Meteor Soc,91(8):1015-1057.
- Zhao Sixiong,Sun Jianhua,Lu Rong,2016. Analysis of “9·4” unusual rainfall in Beijing during autumn 2015[J]. Atmos Oceanic Sci Lett,9(3):219-225.