第 43 卷第 4 期	大气科学	Vol. 43 No. 4
2019年7月	Chinese Journal of Atmospheric Sciences	Jul. 2019

张景,周玉淑,沈新勇,等. 2019. 2016年"7.19"京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条件分析 [J]. 大气科学, 43(4): 930-942. Zhang Jing, Zhou Yushu, Shen Xinyong, et al. 2019. Evolution of dynamic and thermal structure and instability condition analysis of the extreme precipitation system in Beijing-Tianjin-Hebei on July 19 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 930-942. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18231

# 2016年"7.19"京津冀极端降水系统的动热力结构及 不稳定条件分析

# 张景<sup>1,2</sup> 周玉淑<sup>2,3</sup> 沈新勇<sup>1,2</sup> 李小凡<sup>4</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京210044

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴院重点实验室(LACS),北京100029

3 中国科学院大学,北京100049

4浙江大学地球科学学院,杭州310027

摘 要 利用 NCEP/NCAR 的 GFS 再分析资料,结合中国气象局气象信息中心提供的全国自动站观测降水量资料、CMORPH 卫星反演降水资料、FY2 反演降水资料和雷达定量估测降水产品融合的降水资料,对造成2016年7月19~21日北京一天津一河北(以下简称京津冀)地区的极端降水天气系统动热力结构演变以及不稳定条件进行了诊断分析,揭示了京津冀地区上空不同气压层上天气尺度系统的配置,水汽条件,降水发生的垂直运动条件及不稳定层结演变情况。结果表明:(1)500 hPa呈现东高西低的环流形势,与700 hPa低涡和高低空急流相配合,副高北抬阻挡华北地区低涡的东移,导致低涡在京津冀地区停滞是此次降水发生的环流背景;(2)低层的低涡东移发展与中高层正涡度叠加对暴雨发生有重要作用;(3)引用位势散度分析对流不稳定度变化的原因表明,降水区后部的京津冀西南地区,低层的位势不稳定主要由位势散度的水平风垂直切变部分决定,代表水平风垂直切变和大气湿斜压的共同作用,弱降水区以及降水区后方的低层位势散度为负值,有利于该区域位势不稳定加强,强降水区及降水区前方位势散度为正值,抑制了位势不稳定发展。位势散度变化可以通过影响大气稳定度变化进而影响降水落区,位势散度的高值区对应了降水大值区,尤其是700 hPa位势散度对降水落区有很好的指示作用,可以结合位势散度的变化对降水落区进行预估。

关键词 暴雨 动热力系统 位势不稳定 位势散度

文章编号1006-9895(2019)04-0930-13中图分类号P445文献标识码Adoi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18231

# Evolution of Dynamic and Thermal Structure and Instability Condition Analysis of the Extreme Precipitation System in Beijing-Tianjin-Hebei on July 19 2016

ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, ZHOU Yushu<sup>2,3</sup>, SHEN Xinyong<sup>1,2</sup>, and LI Xiaofan<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information

收稿日期 2018-09-14; 网络预出版日期 2018-12-17

作者简介 张景,女,1994年出生,硕士研究生,主要从事暴雨诊断及机理研究。E-mail:zhangjing\_anny1201@163.com

通讯作者 沈新勇, E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

**资助项目** 国家自然科学基金项目41475054、41661144024、41530427,河北省科技计划项目17275409D,国家重点基础研究发展计划项目 2015CB453201

Found by Found by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41475054, 41661144024, 41530427), Science and Technology Project of Hebei Province(Grant 17275409D), National Basic Research Program of China (Grant 2015CB453201)

Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

4 School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract The evolution of dynamic and thermal structure and instability condition of an extreme precipitation system in Beijing-Tianjin-Hebei are analyzed using the NCEP/NCAR Global Forecast System (GFS) data combined with national automatic stations observations of precipitation provided by the Meteorological Information Center of China Meteorological Administration, the CMORPH satellite precipitation data and the fusion of precipitation data from the FY2 precipitation and radar quantitative estimation of precipitation. This study reveals the configuration of weather systems in different air pressure zones over the Beijing-Tianjin-Hebei region. Vertical motion, water vapor condition and unstable stratification evolution during the precipitation process are explored. The results are as follows. (1) The circulation at 500 hPa presented an east-high-west-low pattern, which was coordinated with a low-level vortex at 700 hPa and jet streams in low and high levels. The subtropical high blocked the eastward movement of the low-level vortex in North China, making it stagnant in the Beijing-Tianjin-Hebei region. (2) The development and eastward-moving of the low level vortex was important for the occurrence of the rainstorm. (3) The potential divergence analysis was applied to explore changes in convective instability. Results indicate that in the rear of the precipitation area, lower-level potential instability was mainly determined by vertical wind shear, which reflected the joint effects of vertical wind shear and moist baroclinicity. Lower-level potential divergence was negative in weak precipitation area and behind the precipitation area, which was conducive to regional potential instability. Potential divergence was positive in strong precipitation area and in front of precipitation area, inhibiting the development of potential instability. The change in potential divergence affected precipitation region through affecting the atmospheric stability. The high value region of potential divergence corresponded to high value region of precipitation, especially the 700 hPa potential divergence was a good indicator for precipitation region, which could be estimated by the change of potential divergence at 700 hPa.

Keywords Torrential rain, Dynamic and thermal structure, Potential instability, Potential divergence

# 1 引言

暴雨是我国主要的气象灾害之一,暴雨发生会 给当地人民的生命财产带来严重经济损失和人员伤 亡。因此,暴雨一直是气象科研部门及各级气象台 站研究和预报的重点。华北是我国夏季三大降雨区 之一, 华北暴雨虽然次数少, 但是强度却比较强 (张文龙和崔晓鹏, 2012)。陶诗言(1980)提出华 北暴雨受夏季风影响显著,出现在7月下旬至8月 上旬,暴雨的产生是多尺度系统相互作用的结果, 既受大尺度环流系统配置调整的影响,又有中尺度 系统动热力的作用。他总结了华北暴雨的气候特点 为:暴雨强度大、出现时间集中、持续时间长、且 与地形关系密切。北京一天津一河北(以下简称京 津冀)地区是华北主要区域,由于该区域下垫面地 形复杂,城市化进程迅速,暴雨造成的经济损失、 人员伤亡和社会影响更大。因此,近年来,越来越 多的学者将研究的重点集中到京津冀地区的暴雨上 来。在天气尺度方面,学者们基于不同的暴雨天气 过程,从中低纬不同系统的相互作用(孙建华等, 2005; 刘还珠等, 2007; 丁德平和李英, 2009)、 高低空急流的相互作用等物理过程造成的水汽源汇 (全美兰等, 2013; 徐洪雄等, 2014)、不稳定发 展、启动机制(李娜等, 2013; 冉令坤等, 2014) 和天气系统本身的发生发展来探讨京津冀地区的暴 雨(廖晓农等,2013)。在中尺度动力学方面、从 中尺度地形强迫(孙继松, 2005a; 孙继松和杨波, 2008; 盛春岩等, 2012)、边界层急流(孙继松, 2005b; 孙继松等, 2006)、中尺度低空急流、重力 波过程(孙继松等, 2013)和多尺度系统相互作用 等方面来讨论中尺度暴雨过程的发生发展以及传播 和维持机制(陈明轩等, 2013; 孙建华等, 2013)。 此外,孙继松等(2015)对近10年北京地区极端 暴雨事件进行了统计,指出在不同类型的极端暴雨 过程中大尺度水汽输送条件也不同,并且极端暴雨 的数值预报难度也非常大。

众所周知,对流不稳定是强对流天气的一个重要特征,孙继松和陶祖钰(2012)指出大气不稳定包括动力不稳定和热力不稳定,其中热力不稳定与温度和湿度的垂直分布有关,而动力不稳定则与密度不连续性和垂直风切变有关。强对流天气伴有不稳定能量的积累和释放,Sun and Tan(2001)分析指出,与冻结作用有关的云微物理过程释放出较多的潜热,产生浮力的垂直梯度,加强对流系统。李娜等(2013)提出对流单体的后向新生是动力和热力过程共同作用的结果,需要一定的对流抑制能量促进对流有效位能的积累。

以往的研究中对暴雨过程中的对流不稳定的分 析研究比较全面,如刘璐等(2015)指出北京 "7·21"暖区降水期间大气是对流不稳定的,随着 冷锋的发展,大气逐渐转为对称不稳定。但是对流 不稳定是如何变化的?哪些物理量可以很好的指示 出对流不稳定的变化及强对流系统的移动?以往的 研究更多地关注对流不稳定层结本身的特征,对引 起对流不稳定度变化的物理原因研究相对较少。最 近,周围等(2018)分析不稳定度变化的原因,推 导了局地直角坐标系中相当位温垂直梯度的倾向方 程,提出了位势散度是引起位势稳定度局地变化的 主要强迫项,并指出位势散度与降水在时间和空间 上吻合较好,对降水区有一定的指示意义。该研究 从位势散度的角度提出了不稳定研究的较为新颖的 内容,但是还需要分析更多的暴雨个例进行分析 验证。

2016年7月19~21日,京津冀地区出现较大范 围的大暴雨, 部分地区出现特大暴雨, 属于区域性 的极端降水事件,造成重大的人员伤害和财产损 失。对于此次降水事件, 前人已经有了一些研究成 果: 雷蕾等(2017) 指出强降水与低涡发展的正反 馈过程是这次华北暴雨得以长时间维持的重要机制 之一; 符娇兰等(2017)提出此次降水分为两阶 段,第一阶段与高空槽前东南风急流的发展和太行 山地形的辐合有关, 第二阶段降水与低涡切断有直 接关系。赵思雄等(2018)从大尺度环境的调整, 高低层系统的耦合和中低纬系统的相互作用的特征 进行了初步的探讨。这些成果初步揭示了本次极端 降水的大尺度环境场和影响系统等,但还缺少对降 水系统本身特征和不稳定度变化原因的分析。因 此,本文从降水系统的动热力结构的演变来探讨此 次极端降水事件的发生发展,从暴雨产生所需的 三个条件(大气不稳定层结、持续的水汽输送、 强烈的上升运动)入手,分析此次暴雨过程中系 统动热力结构的配置,不稳定层结的变化及其机 理,以及对流不稳定演变及其与降水的联系等, 为揭示此次大暴雨的成因和后续暴雨的预报提供 一定的参考。

## 2 资料、降水实况及天气形势

## 2.1 资料

本文所用天气形势分析资料为美国环境预报中 心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供 的再分析资料,一日4次,时间间隔6h,空间分 辨率为1°×1°;降水资料为中国气象局气象信息中 心提供的基于全国自动站观测降水量资料、 CMORPH卫星反演降水资料、FY2反演降水资料 和雷达定量估测降水产品,采用PDF+BMA+OI 三步融合方法生成了中国区域1h、0.05°×0.05°分 辨率的降水量融合产品(沈艳等, 2013)。

### 2.2 降水实况

2016年7月19日01时(协调世界时,下同) 至21日06时,京津冀出现强降雨天气,此次降雨 持续时间长、总量大、范围广,降雨总量超过了 2012年"7・21"北京特大暴雨,仅北京市的平均 降雨就达210.7 mm,城区274 mm。从24h累计降 水量来看(图1),此次暴雨过程的影响范围较广, 雨带呈东北-西南走向,山西东部、河北河南大部 分区域和湖北整个中部地区24h内均出现了大于 50 mm的降水,其中河北、河南、湖北三省的交接 地区及湖北中部区域都出现了100 mm以上的大暴 雨。对比19日24h和20日24h累计降水量可以看 出,降水极大值区域和雨带随时间呈东北移,且局 地性增强。20日00时,京津冀地区出现暴雨极值, 24h降水量均超过100 mm。

### 2.3 天气形势分析

200 hPa等压面图上,我国中纬度区域高空都 盛行偏西风,且西风向东逐渐增强。降水发生前, 急流中心位于我国西北地区,到了19日00时(世 界协调时,下同),在河北西北部与山西的交界处 上空出现了急流中心(图略),此急流中心随着时 间东移并增强,到了20日00时(图2a),急流中 心强度已达52 m s<sup>-1</sup>以上,此时京津冀地区位于高 空急流入口区的右方。



图1 2016年(a)7月19日00时至20日00时,(b)7月20日00时至21日00时24h累计降水量(单位:mm)

Fig. 1 24-hour accumulative precipitation (units: mm): (a) 0000 UTC 19 July to 0000 UTC 20 July 2016; (b) 0000 UTC 20 July to 0000 21 July 2016



图2 2016年7月20日00时(a) 200 hPa风场(单位: m s<sup>-1</sup>)和高空急流(阴影),(b) 500 hPa高度场(等值线,单位: gpm)、风场(单位: m s<sup>-1</sup>)和850 hPa相对湿度场(阴影),(c) 700 hPa高度场(实线,单位: gpm)、风场(单位: m s<sup>-1</sup>)和850 hPa低空急流(阴影),(d) 925 hPa风场(单位: m s<sup>-1</sup>)和相对湿度(阴影)

Fig. 2 Circulation Pattern at 0000 UTC 20 July 2016: (a) 200 hPa wind (units:  $m s^{-1}$ ) and upper-level jet stream (shaded); (b) 500 hPa geopotential height(contours, units: gpm) and wind (units:  $m s^{-1}$ ), 850 hPa relative humidity (shaded); (c) 700 hPa geopotential height (contours, units: gpm) and wind (units:  $m s^{-1}$ ) and relative humidity (shaded); (d) 925 hPa wind (units:  $m s^{-1}$ ) and relative humidity (shaded)

降水前期,500 hPa环流场上,在青藏高原的 西北部存在一个槽,副高控制着我国东南沿海地 区,华北地区大部分位于槽前西北气流中,呈现出 东高西低的环流形势,是华北地区出现暴雨的比较 典型的一类天气环流形势。至18日18时,蒙古高 原中部有闭合低涡生成,低涡南侧从华北西部,经 陕西、四川盆地一直到云南一带均为低压区(图 略)。到20日00时,华北中部的低压区环流加深发 展,出现闭合低涡等值线(5760 gpm),京津冀位 于低涡前部强盛的西南暖湿气流中。此时,副高西 伸北抬至我国华东华南沿海并稳定维持,阻挡了低 涡的东移,使得低涡在华北地区停滞较长时间,是 造成此次京津冀大暴雨的重要影响系统。

700 hPa图上(图2c),在降水前期,河南西北 部有低涡生成并向东北方向移动。19日18时(图 略),低涡移近北京,槽前西南气流明显加强,北 京位于低空急流轴的左前侧,有强烈的气旋性切 变,产生强的垂直上升运动。20日00时,低涡移 至北京上空,低空急流显著增强风速超过30 m s<sup>-1</sup> 的区域范围也明显增大,此时北京持续位于低空急 流轴的左侧(气旋性环流利于京津冀地区正涡度的 维持和加强),水平风垂直切变明显增强。

综上所述,华北地区的高低空环流配置为此次 暴雨的发生提供了极佳的天气背景,200 hPa高空 急流与700 hPa低涡相配合,形成高层辐散和低层 辐合的动力配置,造成了强烈的上升运动;850 hPa和925 hPa偏西南风急流加强导致低层气旋性 环流和正涡度加强,500 hPa槽后冷空气南下抬升 暖湿空气,利于不稳定能量释放造成降水。

# 3 降水过程的水汽输送及其辐合辐散 特征

暴雨发生除了有利的天气形势及动力条件外, 水汽也是不可或缺的一环,本节将分析此次暴雨过 程的水汽输送及其辐合抬升特征。

众所周知,远距离水汽源地的水汽,主要是通 过大气平流作用输送到降水区,而水汽通量可以表 示水汽输送量的多少。如图3a所示,20日00时, 850 hPa上存在一条低空西南气流所输送的水汽通 道,将孟加拉湾的暖湿气流输送到京津冀地区,而 相较于850 hPa,低层925 hPa(图3b)的水汽输送 表现更为强烈,除此之外还可以看出在925 hPa除 了孟加拉湾的水汽通道外,在副高外围还存在一条 弱的水汽通道,将来自南海的暖湿气流同时输入到 京津冀地区。这两条水汽通道带来的丰富的暖湿气 流在华北地区与来自高纬的偏北干冷气流在京津冀 附近交汇,京津冀地区持续处于冷暖气流交汇辐合 区,偏南暖湿气流的持续输送为此次京津冀地区的 极端降水提供了有利的水汽条件。

远距离的水汽输送保证了京津冀地区充沛的水 汽条件,但是暴雨的发生还需要水汽通量的辐合和 低层水汽的垂直抬升。文安宝(1980)提出水汽通 量散度指的是单位时间单位体积内水汽的水平净流



图 3 2016年7月20日00时(a) 850 hPa和(b) 925 hPa的水汽通量(单位:g cm<sup>-1</sup> hPa s<sup>-1</sup>) Fig. 3 Water vapor fluxes at 0000 UTC 20 July 2016 (units: g cm<sup>-1</sup> hPa s<sup>-1</sup>): (a) 850 hPa; (b) 925 hPa



图4 2016年(a) 19日12时、(b) 20日00时850 hPa水汽通量散度;(c) 19日12时、(d) 20日00时水汽通量散度沿40°N的纬向一垂直 剖面。单位: 10<sup>-7</sup>g cm<sup>-2</sup> hPa<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>

Fig. 4 850 hPa vapor flux divergences at (a) 1200 UTC 19 July 2016, (b) 0000 UTC 20 July 2016; zonal-vertical cross sections of vapor flux divergences along 40°N at (c) 1200 UTC 19 July 2016, (d) 0000 UTC 20 July 2016. Units:  $10^{-7}$  g cm<sup>-2</sup> hPa<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>

入或净流出。所以,水汽通量散度可以很好地衡量 一定区域内水汽的变化。在降水前期19日12时 (图4a),从河北与山西的交界区域开始一直向南, 沿江苏、河南到安徽的大范围地区都处于水汽辐合 区,水汽通量辐合中心位于河北与山西交界处,此 时北京地区位于水汽输送通量的弱辐合区。随着天 气形势的发展演变,水汽通量辐合中心北移,20 日00时(图4b),京津冀地区的水汽输送通量辐合 最强,降水也达到最大。对比水汽通量的分布以及 降水的实况图可见,暴雨落区和水汽通量散度的分 布有很大联系。从纬向垂直剖面图(图4c-d)可 见,在整个降水时期,北京、天津地区中低层都有 水汽辐合,暴雨区的水汽主要来源于低层的水汽辐 合,辐合中心位于850hPa以下,但是500hPa附近 也还存在一个弱的辐合中心,加剧了京津地区水汽 辐合抬升的强度和高度。水汽通量散度的数值随着 降水发展而增加,表明降水发生前后京津冀地区有 良好的水汽输送和辐合条件。

综合以上分析,有利的天气形势和充沛的水汽 输送及水汽在京津冀地区的辐合抬升,为此次暴雨 过程的发生发展提供了有利的动热力和水汽条件。

# 4 降水系统的动力结构演变特征

分析垂直速度的垂直剖面可见,19日00时 (图5a),在降水开始前,北京地区中低层都处于 一个下沉运动区,其西侧为上升运动区,有明显的 垂直环流圈。到了19日12时(图5b)上升运动区 向东发展并侵入下沉气流中,上升运动的中心位于 北京西侧500hPa附近,北京地区850hPa以下处于 弱上升区,850~600hPa为下沉运动区,且下沉气 流加强西伸,证明北下冷空气将暖湿气流抬升,降 水加强。20日00时(图5c)上升气流进一步增强 并东移,上升速度中心高度降低,此时,京津冀地 区整个对流层都被上升气流控制,上升运动速度明 显大于两侧的下沉运动,这种结构有利于垂直运动 的发展和水汽的抬升,此时的降水也达到鼎盛



图 5 2016 年 7 月 (a) 19 日 00 时、(b) 19 日 12 时、(c) 20 日 00 时的 *p* 坐标系下的垂直速度(单位: Pa s<sup>-1</sup>)沿40°N的纬向一垂直剖面, 实线(虚线)为下沉(上升)运动; 7 月 (d) 19 日 00 时、(e) 19 日 12 时、(f) 20 日 00 时散度(阴影,单位: 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)、涡度(等值线, 单位: 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)沿40°N的纬向一垂直剖面

Fig. 5 Zonal-vertical cross sections of *w* in *p* coordinate along 40°N at (a) 0000 UTC 19 July, (b) 1200 UTC 19 July, (c) 0000 UTC 20 July 2016. Solid (dotted) lines indicate the descending (ascending) motion (units: Pa s<sup>-1</sup>). Zonal-vertical cross sections of divergence (shaded, units:  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>) and vorticity (contours, units:  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>) along 40°N at (d) 0000 UTC 19 July, (e) 1200 UTC 19 July, (f) 0000 UTC 20 July 2016 时期。

进一步分析涡度和散度的垂直结构,表明其与 垂直运动的分布基本相类似。从沿着40°N的散度 的纬向一气压剖面(图5中阴影部分)可见,在降 水发生前(图5d),北京、天津地区(116°E~118° E)在850 hPa以下和中层500~700 hPa间存在较弱 的辐合区,500 hPa以上则为强的辐散区。随后这 两个辐合区随着时间加强,辐散区高度抬升。到了 20日00时(图5f),这两个辐合中心强烈发展并且 交汇,北京天津地区中低层存在两个倾斜的强辐 合区,分别位于850~1000 hPa 和650~450 hPa之 间,而300hPa以上则为强的辐散区。这种倾斜的 垂直结构更有利于上升运动维持和发展,同时高 层的辐散强于低层的辐合,高层的抽吸作用更强。 根据质量守恒原理,低层的辐合加强能补充高层 的辐散, 使得低层气压降低, 从而有利于低涡形 成。从涡度场分布可见(图5),高空槽所对应的 正涡度中心随时间发展不断加强并向东延伸。到 了20日00时(图5f),850hPa以上为整层的倾斜 正涡度柱,在850~700 hPa上和500 hPa附近都有 正涡度中心,这与华北地区上空有低涡形成并发 展相对应。通过分析可得,低层低涡向东发展过 程中,同时还位于高空正涡度区下方,高层正涡 度平流的向下输送, 使得中低层的涡旋系统在水 平和垂直方向都得到发展。通过对垂直运动和散 度涡度的分析可见,在京津冀地区低层上空有气 旋性辐合,垂直方向的辐合辐散结构呈倾斜分布, 对应倾斜结构的上升运动发展,此种垂直结构有 利于垂直上升运动加强,为此次极端降水的发生 提供了有利的动力条件。

## 5 热力结构及不稳定条件分析

## 5.1 温度及其距平分析

第2.3节的分析显示500 hPa风压场上,槽后冷空气南下,低压前部暖湿气流北上,冷暖气流在京 津冀地区交汇。为了更清晰地了解冷暖平流输送状况,进一步分析了500 hPa等压面上的温度平流和 垂直剖面图上的温度距平场。图6a中可以看出在 河北以西的山西至甘肃一带有很强的冷平流,20 日00时冷平流已经侵入北京地区,而整个东南部 地区都处于暖平流区,有明显的暖湿气流北上。冷 暖气流在北京地区交汇。在20日00时的整层温度 距平上看(图6b),此时的京津冀地区500 hPa为 明显的负变温,越到低层降温越明显,而在中层以 上则呈现增温,正变温中心位于300 hPa附近。这 表明了北方南下的冷空气已经侵入京津冀地区将南 方北上的暖湿气流抬升到了对流层低层,为此次极 端降水的发生创造了很好的条件。





图 6 2016 年 7 月 20 日 00 时 (a) 500 hPa 温度平流 (单位: 10<sup>-4</sup> K s<sup>-1</sup>)的水平分布以及 (b) 温度距平沿 40°N 的纬向一垂直剖面 (单位: ℃)



## 5.2 假相当位温分析

假相当位温是综合表征大气温度、压力和湿度

的特征量,表示了大气的温湿特征,能反映大气能量 的分布,其水平分布与垂直分布与对流的发生发展有



图7 2016年7月 (a) 19日18时、(b) 20日00时假相当位温(等值线,单位: K) 和1h累积降水(阴影,单位: mm)以及(c)降水前期(19日06~18时)、(d)降水过程中(19日18时至20日06时)、(e)降水后期(20日06~18时)平均假相当位温沿40°N的垂直剖面图(单位: K) Fig. 7 Potential pseudo-equivalent temperature (contours, units: K) and 1-h accumulative precipitation (shaded, units: mm) at (a) 1800 UTC 19 July, (b) 0000 UTC 20 July 2016. Zonal-vertical cross sections of average potential pseudo-equivalent temperature along 40°N (units: K) (c) before the precipitation (from 0600 UTC to 1800 UTC 19 July), (d) during the precipitation (from 1800 UTC 19 July to 0600 UTC 20 July), and (e) after the precipitation (from 0600 UTC to 1800 UTC 20 July)

很大的关系(王两铭和罗会邦,1980)。图7a,b为 假相当位温的水平分布,可以看出在降水区的偏东 南侧为假相当位温的高值区,表现为高温高湿,而 在其西北侧则为假相当位温的相对低值区。降水区 两侧的温度与湿度存在差异,降水发生在假相当位 温梯度较大的区域,随着京津冀地区假相当位温线 越来越密集,梯度增大,对应降水增强,表明京津 冀东部区域和西部区域存在明显的温度和湿度的差 异,也是冷暖气流在京津冀地区交汇辐合的另一种 表现。

对降水前期(19日06~18时)、降水发生时期 (19日18时至20日06时) 和降水后期(20日06~ 18时)三个阶段的假相当位温做时间平均,沿着 40°N做垂直剖面(图7c-e)。图7显示整个降水时 期,北京上空700 hPa以下均为假相当位温高值 区,高温高湿,有大量不稳定能量聚集,且为假相 当位温密集带。假相当位温随高度增加而减小,说 明此时北京上空处于对流不稳定状态。对流不稳定 高度随时间降低,一旦有对流触发机制,即可产生 强对流。对比三个不同的阶段,可以看出,在降水 发生前(图7c),随着时间的发展,等假相当位温 数值增加,表明了增温增湿的过程,有利于降水的 发生。而在降水发生后(图7e),假相当位温数值 略有减小,密集区所在高度也随时间降低,即对流 不稳定高度随时间降低,表明降水后凝结潜热释 放,导致了假相当位温的减小和不稳定层结的逐步 降低。

## 5.3 位势散度的诊断分析

周围等(2018)指出位势散度是强迫大气位势稳定度发展变化的主要物理因素之一,为进一步揭示此次京津冀极端降水事件中对流不稳定变化的可能原因,本文引入位势散度分析暴雨期间的位势稳定度的变化及原因。z坐标系下的位势散度为

$$m_z = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \theta_e}{\partial z} \right), \tag{1}$$

$$m_z = -\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial \theta_e}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\frac{\partial \theta_e}{\partial z}, \quad (2)$$

其中,u,v为水平风速, $\theta_e$ 为假相当位温。

由于天气诊断分析大多基于等压面进行,本文 将等z坐标下的位势散度推广到等p坐标系下,具 体表达式为

$$m_{p} = \rho g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{e}}{\partial x} + \rho g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{e}}{\partial y} - \rho g \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial \theta_{e}}{\partial p},$$
(3)

其中, $\rho$ 为密度,g为重力加速度。等压坐标下的位势散度 $m_p$ 由两部分构成,其中 $m_{bc}$ =  $pg(\partial u/\partial p \partial \theta_e/\partial x + \partial v/\partial p \partial \theta_e/\partial y)$ 表示的是垂直风切变部分,代表的是热成风(垂直风切变)对相当位温的平流,在一定程度上体现了较大尺度的热力环流; $m_{bt} = -pg(\partial u/\partial x + \partial v/\partial y) \partial \theta_e/\partial p$ 表示的是散度部分,体现的是水平散度与位势稳定度的耦合效应。当 $m_p$ 小于0时,有利于d( $\partial \theta_e/\partial z$ )/dt < 0,造成 $\partial \theta e/\partial z$ 减小,有利于不稳定度的维持; $m_p$ 大于0时,有利于d( $\partial \theta_e/\partial z$ )/dt > 0,造成 $\partial \theta e/\partial z$ 增大,意味着抑制了不稳定的发展。

图 8 为 20 日 06 时沿着 40°N 的纬向的剖面图中 位势散度与降水的分布图。可以看出,弱降水区 850 hPa以下低层为位势散度的负值区,700 hPa以 上也为负值区,有利于位势不稳定的维持。在强降 水以及前沿的河北东北部地区,位势散度的正值区 不断扩大,强度也随之增强。极大值出现在降水的 东部,抑制位势不稳定的发展,对应了一个降水发 生前,低层有不稳定能量的积聚,降水发生后,不 稳定能量得到释放,大气趋于稳定的过程。对比图 8b,c可见,在降水区西侧的河北西南部,低层的 位势不稳定主要由其散度部分决定,强降水区及其 东部正值区主要由其垂直风切变部分造成,使得大 气趋于稳定。这是因为降水区域假相当位温等值线 较为密集,垂直梯度较大,在强辐合的配合下,增 强了大气的位势稳定度。

周围等(2018)的研究表明位势散度对降水落 区有一定的指示意义,其垂直积分的高值区与降水 之间有一定的对应关系。从上文的分析中已知此次 降水事件中,低层的水汽供应、辐合辐散对不稳定 的贡献较大,所以这里着重讨论中低层不同层次位 势散度与降水落区的关系。通过对比 700 hPa(图 9a)、850 hPa(图 9b)和925 hPa(图 9c)三个层 次的位势散度与降水落区的分布,显示在 700 hPa 上,位势散度的高值区与降水落区的吻合程度较 高,而在降水区域西侧的河北西部地区则没有位势 散度的异常值。



图8 2016年7月20日00时(a)位势散度( $m_p$ )及其(b)垂直 风切变部分( $m_{bc}$ )和(c)散度部分( $m_{br}$ )沿40°N的垂直剖面 (阴影,单位: 10<sup>-6</sup> K m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)以及对应时刻的1h累积降水量(黑 色实线,单位: mm)

Fig. 8 Zonal-vertical cross sections of (a) potential divergence  $(m_p)$  and its (b) vertical wind shear term ( $m_{bc}$ ) and (c) divergence term ( $m_{bt}$ ) along 40°N at 0000 UTC 20 July 2016 (shaded, units: 10<sup>-6</sup> Km<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>), and corresponding 1-h accumulated precipitation (black solid lines, units: mm)



图 9 2016 年 7 月 20 日 00 时 (a) 700 hPa, (b) 850 hPa, (c) 925 hPa 位势散度的水平分布 (黑色等值线,单位: 10<sup>-6</sup> K m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)以及 1 h 累积降水量 (阴影,单位: mm)

Fig. 9 Potential divergences at (a) 700 hPa, (b) 850 hPa, (c) 925 hPa at 0000 UTC 20 July 2016 (black contours, units:  $10^{-6}$  K m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)and 1-h accumulated precipitation (shaded, units: mm)

4 期张景等: 2016年 "7.19" 京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条件分析No. 4ZHANG Jing et al. Evolution of Dynamic and Thermal Structure and Instability Condition Analysis of the Extreme ... 941

## 6 结论和讨论

本文对2016年"7.19"京津冀暴雨过程进行的 天气背景、系统动热力结构、不稳定层结及其演变 机理的分析,得到以下初步结论:

(1) 副高北抬阻挡华北地区低涡的东移导致低 涡在京津冀地区停滞是此次降水发生的环流背景。 500 hPa呈现东高西低的环流形势,华北地区处于槽 前大范围上升区域,与700 hPa低涡和急流相配合, 使得京津冀地区有着强烈的上升运动。本次降水事 件的水汽来源分别为低空西南气流将孟加拉湾的水 汽源源不断地输送至华北地区和沿着副高外围西南 气流从南海海面向华北地区输送暖湿气流的水汽。

(2) 京津冀地区整体为高层辐散底层辐合,尤 其是垂直方向存在两个倾斜的辐合场,更有利于垂 直运动的强烈发生以及低层水汽的辐合上升。低层 低涡向东发展过程中正好处于高空正涡度区下方, 得到了高层正涡度的补充或者激发,使得中低层的 涡旋系统得到发展。辐合中心与上升运动区间对应 良好,二级环流的抽吸作用使得上升运动加强,对 应涡度场的辐合中心,为此次极端降水提供了有利 的动力条件和能量来源。

(3)位势散度分析表明在弱降水区以及降水后 方的河北西南部地区低层位势散度为负值,有利于 加剧位势不稳定;而在强降水区及其东部地区位势 散度为正值,抑制位势不稳定的发展,在降水区西 部低层的位势不稳定主要由其散度部分决定,代表 水平散度和位势稳定度的耦合作用。并在此基础上 利用位势散度对降水落区进行诊断预报,表明700 hPa位势散度对降水落区有较好的指示作用,位势 散度的高值区对应降水的高值区。

本文所用的资料为再分析资料,所得结果还是 基于天气尺度背景。精细的暴雨系统结构分析还需 利用数值模拟结果。目前正在进行高分辨的数值模 拟试验,后期将持续对该次暴雨的动热力机理等进 行深入的探究。再者,对于位势散度的应用也是由 于此次暴雨过程范围较大,分析诊断的效果比较理 想,而位势散度对局地性暴雨的指示结果尚未做个 例分析,其对暴雨的指示意义也还需要后期更多的 暴雨个例统计来证明其诊断预报效果。

### 参考文献 (References)

陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 2013. 北京"7.21"暴雨雨团的发生和传

播机理 [J]. 气象学报, 71(4): 569–592. Chen Mingxuan, Wang Yingchun, Xiao Xian, et al. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(4): 569–592. doi: 10. 11676/qxxb2013.053

- 丁德平, 李英. 2009. 北京地区的台风降水特征研究 [J]. 气象学报, 67(5): 864-874. Ding Deping, Li Ying. 2009. A study on rainfall features of Beijing associated with typhoons [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(5): 864-874. doi:10.11676/qxxb2009.084
- 符娇兰, 马学款, 陈涛, 等. 2017. "16•7" 华北极端强降水特征及 天气学成因分析 [J]. 气象, 43(5): 528-539. Fu Jiaolan, Ma Xuekuan, Chen Tao, et al. 2017. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(5): 528-539. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.05.002
- 雷蕾, 孙继松, 何娜, 等. 2017. "7.20" 华北特大暴雨过程中低涡发 展演变机制研究 [J]. 气象学报, 75(5): 685-699. Lei Lei, Sun Jisong, He Na, et al. 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(5): 685-699. doi:10.11676/qxxb2017.054
- 李娜, 冉令坤, 周玉淑, 等. 2013. 北京"7.21"暴雨过程中变形场引起的锋生与倾斜涡度发展诊断分析 [J]. 气象学报, 71(4): 593-605. Li Na, Ran Lingkun, Zhou Yushu, et al. 2013. Diagnosis of the frontogenesis and slantwise vorticity development caused by the deformation in the Beijing"7.21" torrential rainfall event [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(4): 593-605. doi: 10.11676/ qxxb2013.065
- 廖晓农, 倪允琪, 何娜, 等. 2013. 导致"7.21"特大暴雨过程中水汽 异常充沛的天气尺度动力过程分析研究 [J]. 气象学报, 71(6): 997-1011. Liao Xiaonong, Ni Yunqi, He Na, et al. 2013. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the extreme moisture environment in the "7.21" heavy rain case [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(6): 997-1011. doi:10.11676/qxxb2013.081
- 刘还珠, 王维国, 邵明轩, 等. 2007. 西太平洋副热带高压影响下北京 区域性暴雨的个例分析 [J]. 大气科学, 31(4): 727-734. Liu Huanzhu, Wang Weiguo, Shao Mingxuan, et al. 2007. A case study of the influence of the western Pacific subtropical high on the torrential rainfall in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(4): 727-734. doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 2007.04.17
- 刘璐, 冉令坤, 周玉淑, 等. 2015. 北京"7.21"暴雨的不稳定性及其 触发机制分析 [J]. 大气科学, 39(3): 583-595. Liu Lu, Ran Lingkun, Zhou Yushu, et al. 2015. Analysis on the instability and trigger mechanism of torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 583-595. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14144
- 全美兰, 刘海文, 朱玉祥, 等. 2013. 高空急流在北京"7.21"暴雨中 的动力作用 [J]. 气象学报, 71(6): 1012-1019. Quan Meilan, Liu Haiwen, Zhu Yuxiang, et al. 2013. Study of the dynamic effects of the upper-level jet stream on the Beijing rainstorm of 21 July 2012 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(6): 1012-1019. doi: 10.11676/qxxb2013.092

冉令坤,齐彦斌,郝寿昌.2014. "7.21"暴雨过程动力因子分析和预

报研究 [J]. 大气科学, 38(1): 83-100. Ran Lingkun, Qi Yanbin, Hao Shouchang. 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(1): 83-100. doi:10.3878/j. issn.1006-9895.2013.12160

- 沈艳,潘旸,字婧婧,等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量 评估 [J]. 大气科学学报, 36(1): 37-46. Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J]. Transactions Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(1): 37-46. doi:10.3969/j.issn.1674-7097. 2013.01.005
- 盛春岩,高守亭,史玉光.2012. 地形对门头沟一次大暴雨动力作用 的数值研究 [J]. 气象学报,70(1):65-77. Sheng Chunyan, Gao Shouting, Shi Yuguang. 2012. Numerical simulation of the dynamic effect of the orography on a Mentougou severe torrential rain event [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(1):65-77. doi:10. 11676/qxxb2012.006
- 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 2005. 20世纪 90 年代华北大暴雨过程特 征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10(3): 492-506. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10(3): 492-506. doi:10.3969/j. issn.1006-9585.2005.03.020
- 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. Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Fu Shenming, et al. 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(3): 705-718. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12202
- 孙继松.2005a. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响 [J]. 高原气象, 24(1): 62-69. Sun Jisong. 2005a. The effects of vertical distribution of the lower level flow on precipitation location [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24(1): 62-69. doi:10.3321/j.issn: 1000-0534.2005.01.010
- 孙继松.2005b. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究 [J]. 大气科学, 29(3): 445-452. Sun Jisong. 2005b. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (3): 445-452. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.12
- 孙继松,杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的β中尺度暴雨 [J]. 大气科学, 32(6): 1352–1364. Sun Jisong, Yang Bo. 2008. Meso-β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(6): 1352–1364. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9895.2008. 06.10
- 孙继松, 陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题 [J]. 气象, 38(2): 164-173. Sun Jisong, Tao Zuyu. 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38(2): 164-173. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.2.004
- 孙继松, 王华, 王令, 等. 2006. 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, 30(2): 221-234. Sun Jisong, Wang Hua, Wang Ling, et al. 2006. The role of urban

boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(2): 221–234. doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 2006.02.05

- 孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机 制 [J]. 大气科学, 37(1): 137-148. Sun Jisong, He Na, Guo Rui, et al. 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(1): 137-148. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12015
- 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. Sun Jisong, Lei Lei, Yu Bo, et al. 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(4): 609-623. doi: 10.11676/ qxxb2015.044
- Sun T K, Tan Z M. 2001. Numerical simulation study for the structure and evolution of tropical squall line [J]. Adv. Atmos. Sci., 18(1): 117–138. doi:10.1007/s00376-001-0008-2
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1-71. Tao S Y. 1980. Heavy Rainstorm in China [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 1-71
- 王两铭, 罗会邦. 1980. 饱和湿空气动力学的基本方程和主要特征 [J]. 气象学报, 38(1): 44-50. Wang Liangming, Luo Huibang. 1980. The basic dynamic equations and the main properties of the saturated moist air [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 38 (1): 44-50. doi:10.11676/qxxb1980.005
- 文宝安. 1980. 物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用——水汽 通量与水汽通量散度 [J]. 气象, 31 (6): 34-36. Wen Baoan. 1980. Physical quantity calculation and application to analysis and forecast of the torrential rain-moisture flux and moisture flux divergence [J]. Meteor, 31 (6): 34-36.
- 徐洪雄, 徐祥德, 张胜军, 等. 2014. 台风韦森特对季风水汽流的"转运"效应及其对北京"7·21"暴雨的影响 [J]. 大气科学, 38(3): 537-550. Xu Hongxiong, Xu Xiangde, Zhang Shengjun, et al. 2014. Long-range moisture alteration of a typhoon and its impact on Beijing extreme rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(3): 537-550. doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 2013.13173
- 张文龙, 崔晓鹏. 2012. 近 50a 华北暴雨研究主要进展 [J]. 暴雨灾害, 31(4): 384-391. Zhang Wenlong, Cui Xiaopeng. 2012. Main progress of torrential rain researches in North China during the past 50 years [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 31(4): 384-391. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2012.04.014
- 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. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Lu Rong, et al. 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(3): 351-360. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.03.002
- 周围,包云轩,冉令坤,等.2018. 一次飑线过程对流稳定度演变的诊断分析 [J]. 大气科学, 42(2): 339-356. Zhou Wei, Bao Yunxuan, Ran Lingkun, et al. 2018. Diagnostic analysis of convective stability evolution during a squall line process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(2): 339-356. doi: 10.3878/j. issn.1006-9895.1712.17126