

孙继松,2025. 不同尺度天气系统在华北暴雨过程中相互作用的再认识[J]. 气象,51(11):1405-1416. Sun J S,2025. Re-understanding the interaction of multi-scale synoptic systems during torrential rain in North China[J]. Meteor Mon,51(11):1405-1416(in Chinese).

不同尺度天气系统在华北暴雨过程中 相互作用的再认识^{*}

孙继松

中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室,北京 100081

提 要: 华北暴雨包括区域性或流域性大范围暴雨过程,也包括覆盖范围只有数百至数千平方千米的局地暴雨过程。就其本质来说,这些暴雨过程都是不同尺度、不同热力学结构的天气系统相互作用的结果,但如何厘清每一次暴雨过程中存在的这种相互作用过程却不容易。文章从不同尺度天气系统及其相互作用的视角,梳理了华北地区暴雨过程的各种机制:天气尺度系统作为大范围暴雨过程的控制性系统,由不同要素配置结构形成的动力学特征主导着大范围的水汽辐合强度、上升运动强度和持续时间;天气尺度系统相互作用衍生的中尺度系统、复杂下垫面诱发的中尺度系统(即由地形、城市、海陆交界面等强迫产生的中尺度系统)以及与强降水反馈过程有关的中尺度天气系统是华北暴雨降水强度和中心落区的决定性问题;而深对流风暴的生成、发展、结构演变和组织化过程是华北暴雨过程中极端降水事件的核心因素。不同尺度天气系统之间、复杂下垫面热力学过程与不同尺度天气系统之间构成了华北暴雨过程中异常复杂的非线性相互作用过程,无论利用实际观测资料还是数值模拟方法,都难以将单一尺度系统或单一热力学过程从这种复杂的相互作用过程中完全剥离开来,或者说,暴雨过程中这些复杂的非线性相互作用过程本身就是通过各种相互反馈过程构成的“生命系统”。最后,讨论了华北暴雨过程中还需要进一步厘清的一些科学问题。

关键词: 华北暴雨,多尺度天气系统,相互作用,复杂下垫面

中图分类号: P442,P421

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.072802

Re-Understanding the Interaction of Multi-Scale Synoptic Systems During Torrential Rain in North China

SUN Jisong

State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology,
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: The torrential rain events in North China include regional or valley torrential rain and also contain local torrential rain only covering the area of several hundreds to thousands square kilometers. Essentially, these torrential rain events all result from the interaction of multi-scale synoptic systems with diversity of dynamical structures. However, it is not easy to clear up the interaction processes of every torrential rain event. From the views of the multi-scale synoptic systems and their interactions, the paper sums up the main mechanisms of torrential rain in North China by reconstructing interrelated research achievements. The findings are as follows. Synoptic scale systems act as controlling functions in large-area torrential rain events. Their dynamic properties constructed by various essential factors play leading roles on large-scale moisture convergence intensity, the ascending motion strength and the duration. As far as the

* 中国气象科学研究院科技发展基金(2024KJ016)资助

2025 年 6 月 12 日收稿; 2025 年 7 月 28 日收修定稿

第一作者:孙继松,主要从事灾害性天气形成机理与预报技术研究. E-mail:sunjs@cma.gov.cn

rainfall intensity and the location of extreme precipitation during a torrential rain event are concerned, the mesoscale systems are decisive factors. They are possible to be derived from the interaction of synoptic scale systems, induced by the complex underlying surface such as terrains, urbans and interface between land and sea, and engendered by feedback effect of local severe precipitation. For the extreme precipitation intensity during torrential rain events over North China, the generation, development, structure evolution and organization of deep convective storms are the key factors. The exceptionally complex nonlinear interaction processes exist in torrential rain events over North China by various interactions among the different-scale synoptic systems and complex underlying surface forcing. It is actually difficult to separate any unitary system or isolated dynamical process perfectly from the complex interaction whether by actual observed data or by numerical simulation. In other words, the complex nonlinear interaction process itself is a weather life system built by diverse feedbacks to each other. Some scientific issues on torrential rain events in North China, which should be resolved in future, are discussed in last part of the paper.

Key words: torrential rain in North China, multi-scale synoptic system, interaction, complex underlying surface

引 言

相较于江淮流域和华南地区,华北暴雨发生频次少得多,但降水强度极大(Luo et al,2016)。作为我国北方最重要的经济圈和首都所在区域,京津冀地区人口稠密,是我国的政治中心、文化中心、国际交往中心,暴雨灾害往往造成更大的社会影响,受到更多的国际关注,因此,华北暴雨一直是我国灾害天气研究的重点方向之一。

华北暴雨具有极强的区域特征,主要体现在三个方面:(1)区域性暴雨过程频次少,但往往伴随强烈的对流现象,短历时降水强度大。与华南、江南和江淮地区相比,年平均降水量只有上述地区的三分之一左右,因此华北地区出现区域性大范围暴雨的频次较低,年平均只有1~2次,但华北地区是我国极端短时降水强度最大的两个区域之一,与华南南部相当,远大于江南和江淮地区(Zhang and Zhai, 2011; 陈炯等,2013; Luo et al,2016)。1963年8月上旬海河流域特大暴雨、1975年8月5—7日河南特大暴雨、1996年8月3—5日河北特大暴雨、2012年“7·21”北京特大暴雨、2021年“7·20”郑州特大暴雨、2023年“23·7”华北特大暴雨过程等造成的灾害在中国历史上都留下过非常惨痛的记忆,造成过重大人员伤亡和巨大经济损失,上述6次特大暴雨过程中录得的24 h最大降水量分别达到704、1005、670、704、624和1003 mm,最大降水强度均超过100 mm·h⁻¹。(2)南北走向的太行山和东西走

向的燕山共同构成的“Γ”型地形是影响华北暴雨落区的重要强迫因子之一(范广洲和吕世华,1999;孙继松,2005a)。由于华北暴雨期间常常伴随西南或东南低空急流,在大致为南北走向的太行山和近似东西走向的燕山山脉迎风坡一侧至东部平原地区,往往出现区域性暴雨(刘金平等,2015),极端暴雨中心大多出现在其东侧和南侧的丘陵与平原地区过渡地带。(3)海陆环流、山谷风环流、急速扩张的城市群形成的城市环流,它们与天气系统构成了更为复杂的局地大气环流特征,更容易形成尺度更小、强度更大的局地暴雨中心,同时也在一定程度上改变着京津及其周边地区暴雨的分布特征(孙继松等,2006; Jiang and Liu, 2007; 孙继松和杨波, 2008; Yin et al, 2011; 东高红等, 2011; 2013b; 王彦等, 2014; Li et al, 2015)。

从暴雨形成的物理逻辑来说,须具备三个基本要素:充足的水汽供应,强烈的上升运动以及较长的持续时间(Doswell III et al,1996)。与所有暴雨过程相同,华北暴雨过程是通过不同尺度、不同动力学结构的天气系统相互作用来满足上述条件的(丁一汇等,1980; 陶诗言等,1979; 1980; 2003; 孙建华等, 2013; 杨波等, 2016; 郑永光等, 2025)。但是,国内学者在强调不同尺度、不同动力学结构的天气系统相互作用对华北暴雨形成过程影响的同时,对这种相互作用过程是如何实现或改变暴雨形成所必须的三要素,科学逻辑上依然缺乏特别清晰的梳理。本文试图从不同尺度天气系统及其相互作用的视角,系统性地梳理有关华北暴雨的研究成果,以期进一步

加深对华北暴雨形成机制的理解。

1 对不同动力学特征的天气尺度系统作用的再认识

长期以来,天气尺度系统在华北暴雨过程中的作用一直被高度关注。基于不同类型的华北暴雨天气过程,学者们从天气尺度系统动力学结构演变、中低纬度系统相互作用、高低空急流相互作用等动力学过程造成的水汽源汇、不稳定发展、启动机制以及天气系统本身的发展和维持机制对暴雨过程的影响等角度开展了大量的研究工作(孙建华等,2005;2013;刘还珠等,2007;丁德平和李英,2009;徐洪雄等,2014;冉令坤等,2014;李娜等,2013;全美兰等,2013;廖晓农等,2013;雷蕾等,2017;赵思雄等,2018)。

1.1 关于天气尺度系统分型与华北暖区暴雨的问题

为了理解天气尺度系统演变在暴雨过程中的共性特征,对造成华北暴雨的天气系统进行分类或分型,然后进行合成分析,是中国气象学家针对天气尺度系统本身常用的研究方法(陶诗言,1980;丁一汇等,1980;雷雨顺,1981;杨波等,2016;周璇等,2020)。由于统计样本数量不同,分类或分型标准不同,而且大部分华北暴雨过程都存在两个或两个以上天气尺度系统相互作用或相互叠加,往往造成分类结果难以统一。例如,陶诗言(1980)概括出 11 种暴雨环流型,并归纳出经向型和纬向型环流暴雨的基本特点,雷雨顺(1981)针对经向型持续性特大暴雨过程进行了合成分析,进一步厘清了其配置结构;丁一汇等(1980)在研究了华北暴雨的天气形势之后,提出低涡、暖切变线和低槽冷锋是造成华北暴雨的 3 种主要天气系统;而孙建华等(2005)对 20 世纪 90 年代华北夏季暴雨和大暴雨过程开展了统计研究,根据影响系统的不同提出了 5 种分型:台风与低槽(低涡)远距离相互作用型、低涡(登陆台风)与西风槽相互作用型、登陆台风北上受高压阻挡停滞型、低涡型、暖切变型。可以看到,前 3 种分型都与台风活动有关。比较丁一汇等(1980)和孙建华等(2005)的分类可以发现,前者所说的“低涡”更为宽泛,是指具有封闭等高线特征的涡旋系统,而后者所说的台风、登陆台风、低涡都可以统称为“低涡”,只

是它们具有不同的热力学性质,台风是热带性质的涡旋系统,深入内陆的登陆台风往往具有“半热带”性质(蒋尚城等,1981),而传统意义上的低涡是指具有典型温带斜压结构特征的涡旋系统,根据其起始生成位置并对华北暴雨产生直接影响的涡旋系统又可以分为蒙古低涡、东北低涡、华北低涡、西南低涡、黄淮低涡等,孙建华等(2005)的分类方法更加强调了不同动力学特征的中低纬系统相互作用过程对华北暴雨的影响。

周璇等(2020)利用聚类分析方法,对华北地区 1960—2015 年期间的 56 次持续性极端暴雨过程进行了客观分类,通过检视该方法得到的四类环流背景,分别对应经向型、纬向型、减弱的登陆台风型和初夏型,这些持续性极端暴雨过程一般都与不同天气系统配置结构下的锋面动力学过程有关,由于锋面结构特征、环境大气层结状态以及与低空急流有关的暖湿气流输送通道和强度不同,造成不同环流形势背景下,暴雨日的高频站点与过程平均累计降水量在空间分布上存在差异。这里所说的锋面动力学过程,既包括具有冷锋特征的暴雨过程,也有具有暖锋特征的暴雨过程(Bao et al, 2024; Xia et al, 2025)。由于华北地区的很多暴雨过程中并没有明显的“冷空气侵入”,或者说不具有明显冷锋特征(即不存在明显的气温梯度区和地面高压系统),而可能被误认为是“暖区暴雨”,但是从假相当位温(θ_{se})的视角来看,由于低层暖湿空气的推进,许多暴雨过程发生在明显的 θ_{se} 梯度区附近,具有明显的“暖锋锋生”现象,或者说具有典型的暖锋特征(Xia et al, 2025),而并非发生在 θ_{se} 高值中心附近,也就是说它们并非真正意义上的“暖区暴雨”。由于 θ_{se} 梯度对湿度变化比对气温变化更为敏感,用 θ_{se} 梯度表示锋区可能会遮盖斜压锋区和干线之间的区别。判断强 θ_{se} 梯度是暖锋性质的锋面结构,还是单纯由湿度梯度形成的干线,需要诊断梯度区两侧的垂直环流(即所谓穿过“锋区”的次级环流)是否与斜压造成的力量效应对应,即典型的暖锋暴雨过程与力量效应形成的垂直环流有很好的对应关系,而与干线有关的垂直环流形成机制目前并不明确。

1.2 关于中低纬天气系统相互作用的问题

“75·8”特大暴雨、“96·8”特大暴雨和“23·7”特大暴雨都是登陆台风与西风带系统直接相互作用的结果(北京大学地球物理系气象专业,1977;蒋尚

城等,1981;江吉喜和项续康,1998;孙建华等,2006;Bao et al, 2024),但华北暴雨过程中的中低纬系统相互作用更多地表现为,通过某些相对稳定的天气尺度系统作为媒介来实现这一过程。盛夏季节的大尺度低空急流、西北太平洋副热带高压(以下简称副高)是中低纬天气系统相互作用造成华北暴雨过程中最重要的大尺度媒介,其本身又相互依存、相互作用。例如,向南发展的高原南支槽不仅可能与南亚天气系统产生物理上的直接连接,而且这一发展过程往往造成其东侧西南低空急流更为强盛,作为一支大尺度暖湿输送带,将源于孟加拉湾的水汽和热量输送至华北暴雨区(刘益然等,1979;孙淑清和赵思雄,1980;陶祖钰,1980;孙继松等,2015;杨波等,2016),大尺度西南低空急流构成了华北暴雨与南亚天气系统之间的物理媒介,这可能是印度夏季风对华北地区夏季降水比对我国东部其他区域有更大影响的直接原因(刘芸芸和丁一汇,2008)。副高作为影响华北暴雨的重要天气系统,不仅影响西风槽或低涡的移动速度,造成华北地区更长时间的降水,其东侧和南侧的低空东南急流或西南急流成为东海或南海向华北输送水汽的主要载体(刘还珠等,2007;杨波等,2016)。在低纬度地区存在台风或热带风暴时,大气中的水汽更为充沛,低空急流强度更大,造成向华北输送的水汽通量更大,因而更容易发生极端性暴雨过程(孙建华等,2005;徐洪雄等,2014;周璇等,2020;Yin et al, 2022),这是远距离热带系统与西风带系统相互作用造成华北暴雨的重要机制之一。

天气尺度系统作为大范围暴雨过程的控制性系统,由不同要素配置结构形成的动力学特征主导着大范围的水汽辐合强度、上升运动强度和持续时间,同时它们还通过平流过程改变或重塑着暴雨区的大气层结状态。相对于中尺度天气系统(以下简称中尺度系统)和风暴尺度系统,数值模式的可预报性或确定性更强(沈学顺等,2025),因此,不同动力学结构配置的天气尺度系统演变特征的分析一直是预报员在暴雨预报过程中最为倚重的手段之一。但是,不同尺度天气系统的降水强度差异是以 10 的指数倍变化的(孙继松,2017),完全由天气尺度系统造成的降水效率并不高,一般在 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下,华北地区的极端暴雨过程降水效率却非常高,一般存在极端性短时强降水现象(孙继松等,2015),极端降水强度可以达到 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。因此,在相对稳定的天气尺度系统控制下,中尺度系统和风暴尺度

系统的演变是关系到华北暴雨强度和中心落区的核心问题。

2 对不同特性中尺度系统的再认识

许多持续性大暴雨出现在大尺度环流发生明显调整的时期(陶诗言,1980),这种调整过程往往诱生中尺度系统,而中尺度系统对暴雨的触发和维持以及中心位置产生了决定性影响。20世纪 90 年代以前,受到观测手段和站网时空分辨率的影响,针对华北暴雨过程中的中尺度系统研究受到限制。尽管如此,我国的气象学家很早就注意到中尺度系统在华北暴雨过程中的重要作用。早在 20 世纪 60 年代中期,游景炎(1965)首先研究了海河流域“63·8”特大暴雨过程中的中尺度系统,指出特大暴雨与辐合中心、风速辐合线、切变线等中尺度系统密切相关,大尺度(即天气尺度)、中尺度系统相互作用导致强降水。蔡则怡和周晓平(1982)提出了与暴雨过程有关的中小尺度系统发生发展的五种机制,包括积云加热、下垫面不均匀加热、交界叠加、重力波、行星边界层不稳定。随着天气观测网时空分辨率大幅度提高和中尺度数值模式的逐渐完善,中尺度系统对华北暴雨的影响逐渐清晰。综合前人的研究结果,按照中尺度系统生成机制以及在华北暴雨过程中的作用,可以大体上将这些中尺度系统概括为:天气尺度系统相互作用衍生的中尺度系统、复杂下垫面强迫产生的中尺度系统、强降水反馈形成的中尺度系统等。

2.1 天气尺度系统相互作用衍生的中尺度系统

天气尺度系统相互作用衍生的中尺度低压系统在华北暴雨过程中的作用很早就受到关注。田生春和曾昭美(1982)对比分析华北地区高空槽前有无暴雨的两个个例后认为,有暴雨出现的高空槽处于斜压发展阶段,槽前暖湿平流、正涡度平流均较强,水汽辐合大,存在位势不稳定和切变动力不稳定,因此在冷锋前产生一个新的中尺度低压,新生低压是触发暴雨的主导因子。雷蕾等(2017)则强调高低空天气尺度系统的耦合过程在低层新生低压中的作用,当高空正位涡异常区叠加在对流层中低层锋区上空时,造成对流层中层气旋快速发展并向下伸展,诱发锋区前侧的新生气旋。孟智勇等(2002)对 1994 年第 6 号台风“提姆”暴雨进行了数值模拟研究后,指

出台风与中纬度系统的相互作用非常显著地表现在中尺度系统的活动上,高低空中尺度散度场的分布对中低纬度系统相互作用所产生的降水有一定的指示意义,台风及西风槽强度的改变将直接导致中尺度系统强度的变化,从而造成降水强度的不同。

2.2 与复杂下垫面强迫有关的中尺度系统

复杂下垫面强迫生成的中尺度系统在华北暴雨过程中较为常见,往往与地形环流、城市热岛环流、海陆风环流有关,其在华北暴雨过程中扮演着非常重要的作用。尤其是迅速向山前扩展的北京城区、向海岸扩展的天津城区,构成了更为复杂的地形环流和热岛环流的耦合叠加以及海风锋与城市热岛的相互作用。

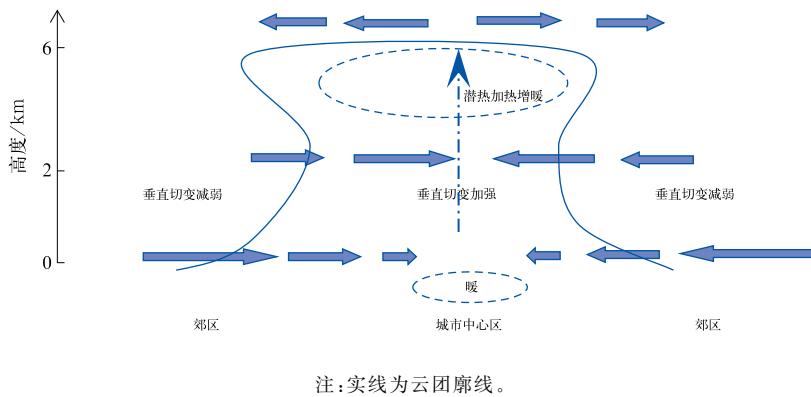
在讨论地形对暴雨影响的动力学作用时,早期一般强调地形对气流抬升、绕流辐合作用(如喇叭口地形、孤立地形)以及对天气系统的阻滞作用等造成降水增强(章淹,1983;范广洲和吕世华,1999; Pierrehumbert,1984; Kirshbaum et al, 2018)。地形的动力、热力学作用造成的中尺度系统非常复杂,包括热力作用形成的山谷风环流(在地面风场上往往表现为辐合线),在适当大气层结条件下的地形重力波(Smith and Barstad,2004),地形对低层水汽的阻滞效应形成的山前露点温度锋区(干线)等(方祖亮等,2020),它们本身就可能触发对流风暴形成短时暴雨,当其与天气系统相互作用时,将造成降水强度显著增强。孙继松(2005a)从大气运动的基本方程出发,讨论了华北地区太行山东侧低空东风气流背景下,气流的不同垂直分布结构对降水落区的影响,指出当垂直于山体的气流随高度减小时,地形作用造成在迎风坡一侧为水平辐合和垂直气旋式涡度增加,形成迎风坡中尺度气旋或切变线,对迎风坡降水产生增幅作用;当气流的垂直分布随高度增加时,则在背风坡产生辐合作用,造成气旋式涡度增加,即产生背风坡中尺度气旋或切变线。郑丽娜和孙继松(2024)利用水平涡度方程同样很好地解释了低空急流垂直切变加速造成泰山背风坡暴雨的形成机理。Zhong et al(2015)的研究发现,2012年“7·21”北京特大暴雨过程中,在天气尺度低涡直接影响北京之前,北京的暖区暴雨正是由山前的中尺度涡旋系统触发的。

随着京津城市圈的迅速扩张,北京或天津单一

城市范围已经达到 β 中尺度,对天气系统的影响开始明显显现,尤其是城市暴雨灾害的影响引发了社会的广泛关注。城市中尺度环流(热岛环流)在暴雨过程中的作用问题尤其引起了学者们的强烈兴趣,特别是有关城市热岛环流和地形环流相互作用、城市热岛环流和海风锋相互作用对北京、天津等地的对流暴雨过程的影响机制。

城市热岛效应对于加强对流性降水十分重要(Niyogi et al,2011; Ryu et al,2016)。北京城区对暴雨影响的研究表明,城市对风暴系统的触发、演变和移动产生了重要影响(Guo et al, 2006; Miao et al,2011; Dou et al,2015)。孙继松等(2006)从观测事实入手,结合中尺度理论分析,揭示了发生在北京城区的一次孤立的 β 中尺度深对流暴雨系统的启动机制以及城市边界层在这次局地暴雨过程中的动力学作用,研究指出:城市与郊区下垫面属性不同造成的热力差异,有利于形成城市中尺度地面风场辐合线;更为重要的是,城市热岛形成的水平位温梯度还可能造成城区边界层内风场垂直切变加强:近地面层风速减弱,边界层顶部气流加速,而在郊区则相反,近地面层出现明显的气流加速。因此,与城市地面中尺度辐合线对应的实质上是一个较为深厚的水平风速辐合系统,非常有利于对流系统在城区被触发和组织,或者对外界移入的对流系统有明显的加强作用;而对流潜热释放在城市上空形成的“热塔”效应进一步造成了边界层顶的入流加速,有利于对流初始阶段的快速发展。图 1 为由城市热岛触发对流暴雨的概念模型(改绘自孙继松等,2006 的论文)。

在城市热岛环流和地形环流相互作用方面,孙继松和杨波(2008)讨论了地形与城市热岛共同作用下的 β 中尺度暴雨的一系列理论特征,指出了城市热岛强度、地形坡度以及城市边沿与地形之间的水平距离对北京西部山前暴雨的影响机制:一方面,地形越靠近城区,山前的水平温度梯度越大,这种城市热岛边沿形成的强温度梯度增强了山前的低空风垂直切变,这是维系中尺度对流降水发生、发展的重要条件;另一方面,一旦迎风坡出现局地强降水,冷池效应不仅强化了山前的辐合抬升强度,有利于中尺度对流系统的维持,而且冷池与城市热岛效应将进一步强化水平温度梯度,而对流层中层由于潜热释放形成相反的水平温度梯度,其共同作用将造成低空风垂直切变与降水强度之间的正反馈现象,这种



注:实线为云团轮廓线。

图 1 城市热岛中尺度对流系统形成初期的概念模型(孙继松等,2006)

Fig. 1 Conceptual model of initial stage of mesoscale convective system in urban heat island (cited from Sun et al,2006)

正反馈过程对 β 中尺度暴雨的形成过程起到了重要作用,其物理概念模型如图 2 所示(改绘自孙继松和杨波,2008 的论文)。

在城市热岛与海风锋相互作用对华北对流暴雨影响研究方面,现在的认识正在逐渐清晰。在中纬度,晴空背景下的夏季午后,海陆温差形成较强的、向内陆不断推进的海风锋,海风锋本身就可能触发和组织对流风暴(王树芬,1990; Wissmeier et al, 2010),形成海滨城市的对流性暴雨。城市热岛效应加大了午后的海陆温差,因此城市效应可能进一步加强海风锋的强度(张亦洲等,2013)。由于海风锋本身是一支浅层环流,渤海湾周边很少出现由单纯的海风锋引发的对流性暴雨天气过程,但是观测

研究表明,午后海风锋与迎面移来的雷暴相遇,会对雷暴发展起到显著的加强作用(东高红等,2011; 2013a; 何群英等,2011),进而出现局地暴雨过程。对流风暴系统与海风锋相遇造成对流加强有两种不同方式,一是对流风暴系统直接与海风锋正面相交,海风锋带来的低层水汽会减弱对流抑制,锋面抬升机制进一步增强对流运动,并将海风锋后侧充沛的水汽往上输送,从而造成强降水(梁钊明等,2013);二是海风锋与对流系统前侧的出流阵风相交,增强后的抬升运动触发新生对流,新生对流与原来的风暴系统合并形成深对流风暴系统,引发局地对流性暴雨(王彦等,2014,万夫敬等,2021)。

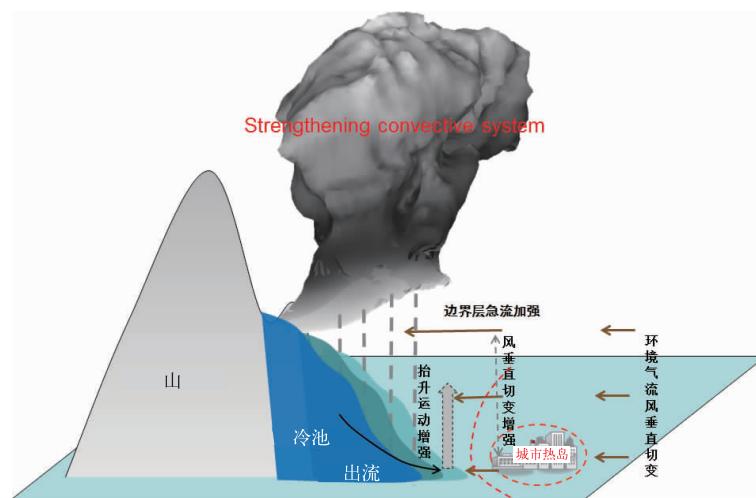


图 2 地形与城市热岛共同作用下的山前对流暴雨维持机制概念模型(孙继松和杨波,2008)

Fig. 2 Conceptual model of maintaining mechanism convective torrential rain in front of mountain by mutual effect of terrain and urban heat island (cited from Sun and Yang,2008)

2.3 与强降水反馈过程有关的中尺度系统

较长时间的强降水是形成暴雨尤其是极端暴雨的必要条件,由于对流性强降水过程伴随着大量的潜热释放和近地面层的冷池效应,往往诱发新的中尺度系统生成,不断新生的中尺度系统在维系长时间降水过程中具有重要作用。针对强降水过程反馈作用形成的中尺度系统,目前的主要研究对象包括:(1)中尺度对流涡旋,一般认为其是强降水潜热释放的产物,同时它有可能诱发新的对流(继生对流),造成对流性强降水得以维持(Raymond and Jiang, 1990; Bartels and Maddox, 1991; Chen et al, 1993; Shu et al, 2017);(2)与局地暴雨过程伴随出现的中尺度低空急流或边界层急流,其产生机理可能与局地强降水产生的中尺度斜压作用有关(孙继松, 2005b; 孙继松和杨波, 2008; 刘伟和张庆红, 2004),中尺度低空急流与强降水之间的正反馈过程,是形成局地暴雨过程中非常重要的机制之一;(3)组织化的对流系统形成的中尺度阵风锋,其触发的新生对流与对流母体的合并增强是形成持续性对流暴雨的重要机制之一。

有关中尺度对流涡旋在华北暴雨过程的作用,东高红等(2011)发现,对流层低层涡旋系统的发展、移动与暴雨中心降水强度的变化和强雨团的移动方向具有良好的对应关系。赵宇等(2011)在研究2005年7月22—24日发生在华北地区的一次暴雨过程时发现,台风“海棠”减弱的低压倒槽内发生发展的两个中尺度对流系统是暴雨的直接影响系统,中尺度对流系统发展到成熟阶段首先在对流层中层形成中尺度低涡,然后向低层发展。很显然,该中尺度低涡是对流降水的产物。雷蕾等(2017)在追踪一次华北特大暴雨过程的低涡发展演变时,发现潜热释放不仅造成涡旋的加强,同时改变了对流层中层和低层涡旋的热力学结构,即在对流层中层,斜压涡旋逐渐演变为具有暖心结构正压涡旋,而低层涡旋一直维持着较强的斜压性。

对流性暴雨过程往往强迫产生中尺度低空急流,而中尺度低空急流尤其是边界层急流的前端造成了更强的水汽辐合,这种正反馈过程可能是对流性降水得以维持的重要机制。刘伟和张庆红(2004)通过数值模拟再分析“96·8”登陆台风造成华北特大暴雨过程发现,在中尺度对流系统成熟期,低层大尺度低空急流中出现中尺度扰动即中尺度低空急

流,且在其左前方产生强辐合和上升运动,在上升气流的高空出流区域产生中尺度高空急流。孙继松(2005b)从中尺度理论入手,结合实际天气过程,证实了局地暴雨和中尺度边界层急流之间的正反馈过程:由于局地暴雨同时改变了对流层中层和近地面层气温的水平分布,即潜热释放造成暴雨中心的对流层中层形成指向外侧的温度梯度(由暖指向冷),而降水的冷池效应在边界层内形成指向暴雨中心的温度梯度,这种热力强迫作用造成了边界层上部的气流加速而形成中尺度边界层急流;反过来,边界层急流加强了前方的风速辐合,进一步增强降水。

3 对流风暴系统

完全由天气尺度系统或中尺度系统造成的层状云降水也可形成暴雨甚至特大暴雨,但对流风暴系统降水强度更大,降水效率是层状云的 $10^1 \sim 10^2$ 倍(孙继松, 2017),而华北暴雨过程往往存在强度很大的对流性降水,造成华北地区极端小时降水强度与华南南部相当(Luo et al, 2016)。事实上,在中纬度地区,中尺度对流系统是暖季强降水的主要贡献者(Doswell III et al, 1996; Carbone et al, 2002; Wang et al, 2004)。因此,中尺度对流系统的生成、发展和组织成为了华北暴雨研究的重要课题。

在适当的天气尺度背景下,华北地区的地形效应、城市效应和海陆效应等在对流风暴触发过程中扮演着非常重要的角色,但孤立的移动性对流风暴生命史很短,难以形成暴雨。研究表明,准静止的中尺度对流系统以及具有“列车效应”或后向传播特征的线状和带状中尺度对流系统,是极端暴洪的主要制造者(Schumacher and Johnson, 2005; 2006),华北极端性暴雨过程的观测事实证实了这一点,即移动缓慢且长时间维持的对流风暴系统或者组织化对流风暴是华北极端暴雨的主要表现形态(孙继松等, 2015)。在华北暴雨过程中,孤立的风暴单体是如何组织形成中尺度对流系统并维持的呢?

中尺度对流系统中的“列车效应”和风暴单体的后向传播是华北特大暴雨中一类典型特征,大范围的暴雨过程中比较常见,一般与低空急流相联系(孙继松等, 2015)。陈明轩等(2013)在研究2012年“7·21”北京特大暴雨过程中发现(图3),孤立单体首先在地形作用下被触发,并沿低空急流方向移动,其传播前沿为地形强迫与低层风辐合造成的深厚辐

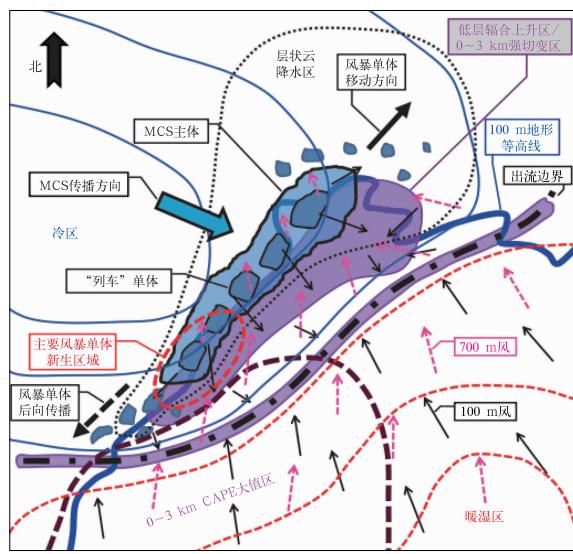


图 3 2012 年“7·21”北京特大暴雨中尺度对流系统低层动力和热动力配置概念模型(陈明轩等,2013)

Fig. 3 Conceptual model of the low-level dynamic and thermodynamic configuration for the extreme-rain-associated MCS on 21 July 2012
(cited from Chen et al, 2013)

合区,对流单体得以发展和维持,形成深对流风暴;由于其后部依然存在穿过对流有效位能大值区、吹向山体和出流边界的暖湿气流,新生单体不断出现,出现风暴单体的后向传播现象;这些风暴单体在深厚且相对稳定的急流作用下,形成了高度组织化的中尺度对流系统,由于中尺度对流系统整体上向东移动缓慢,形成了山前特大暴雨中心。

华北局地暴雨过程中另外一类比较常见的类型是由移动缓慢或长时间维持的对流风暴系统造成的。在环境风较弱的背景下(高低空风速都很小,远达不到急流的强度),平均承载风对风暴系统的引导作用较弱,风暴系统移动缓慢甚至呈静止状态,在适当的环境条件下,风暴系统可能出现长时间维持,或者不断新生合并,造成局地暴雨甚至大暴雨。肖现等(2013;2015)讨论了这种处于“弱天气尺度强迫背景下”对流风暴系统的发展机制:移入或地形强迫产生的孤立风暴系统前沿,由于冷池出流触发新生对流,新老单体合并造成对流强烈发展,这一过程又进一步强化了冷池效应,更快地触发新单体出现。这一反馈过程形成的多单体复合对流系统可能造成局地大暴雨。华北地区另外一种呈现准静止状态的对流系统,往往与垂直于山体的低空风场在地形抬升作用下长时间维持有关(孙继松,2005b;孙继松

等,2015)。

4 不同尺度天气系统的相互作用

从上述不同尺度天气系统在华北暴雨过程中的作用可以发现,华北暴雨过程中不同尺度天气系统之间、复杂下垫面热动力学过程与不同尺度天气系统之间,本身就是相互依存、相互作用的。例如,一方面,复杂下垫面形成较强的中尺度热力学环流系统(如城市热岛环流、山谷风环流、海陆环流等),只有在更大尺度大气环流背景控制下才表现得更明显,在层结极不稳定的环境中,它们触发的对流降水过程可能强化或者完全破坏这种热力学环流系统。另一方面,对流性暴雨过程中的对流环境条件(层结不稳定、水汽、抬升机制)往往取决于大尺度和中尺度系统配置结构,而对流过程本身是大气能量和水汽的快速消耗过程,通过更大尺度系统来实现层结不稳定的快速重建和水汽供应,是对流暴雨过程得以维持的必要条件;同时,由大尺度或中尺度天气系统构建的垂直切变环境和抬升条件是维持对流系统发展和组织化过程的重要机制,而风暴组织化过程本身就是由风暴尺度向典型中尺度天气系统的转化过程,这种转换过程中伴随出现的中尺度雷暴高压(冷池)、入流低压、中尺度对流涡旋、中尺度急流等又可能加强或维持对流性暴雨。

5 结论与讨论

随着监测能力和数值模拟能力的不断提升,中国气象学家们对华北暴雨形成过程物理机制的认识取得了长足进步。但是,不同尺度天气系统之间、复杂下垫面热动力学过程与不同尺度天气系统之间构成了华北暴雨过程中异常复杂的非线性相互作用过程,无论利用实际观测资料还是数值模拟方法,都难以将单一尺度系统或单一热动力学过程从这种复杂的相互作用过程中完全剥离开来;从另外一个角度来说,暴雨过程中这些复杂的非线性相互作用过程本身就是通过各种相互反馈过程构成的“生命系统”,对单一系统或单一物理过程的强行剥离方法可能导致其他无法控制的错误循环过程,通过数值模式控制试验方法是否能够真实地厘清这种相互作用过程,是一个值得进一步商榷的问题。此外,华北暴雨过程中还存在一些难以被完全解析的科学问题:

(1) 华北暴雨过程中往往镶嵌着一些 γ 中尺度对流系统,有些 γ 中尺度对流系统是对流性暴雨过程最早的“母体”,更多的是暴雨过程中不断新生的单体,其触发和自我组织过程(形成 β 中尺度对流系统)的机制目前几乎很少被触及,或者说风暴尺度动力学本身还缺乏完整的理论支撑。(2)无论哪种尺度系统的降水过程,其降水强度都是由相应尺度动力学过程背景下的云物理过程(凝结、蒸发、并碰、破碎、相态转化等等)决定的(孙继松,2014),而“微观”的云物理过程直接造成了“宏观”的动力学效应,如潜热释放形成的热塔、蒸发形成的近地面冷池、出流阵风等等(孙继松,2023),上述动力学效应形成了不同空间尺度大小、不同热动力学结构的“天气系统”,这些天气系统与原来的降水系统相互作用反过来对降水过程产生影响。也就是说,在暴雨研究过程中,除了不同尺度天气系统之间的反馈过程非常重要外,云物理过程和动力学过程之间的耦合、反馈作用也是需要揭示的科学问题之一。

参考文献

- 北京大学地球物理系气象专业,1977. 初论西风带和热带辐合带环流系统的相互作用[J]. 大气科学, (2): 132-137. Faculty of Meteorology, Department of Geophysics, Peking University, 1977. An essay on the interaction between the weather-bearing systems of the westerlies and the intertropical convergence zone[J]. Chin J Atmos Sci, (2): 132-137(in Chinese).
- 蔡则怡,周晓平,1982. 关于暴雨预报的若干问题[J]. 广西气象, (2): 1-7. Cai Z Y, Zhou X P, 1982. Some views on the heavy rain forecast[J]. J Guangxi Meteor, (2): 1-7(in Chinese).
- 陈炯,郑永光,张小玲,等,2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报, 71 (3): 367-382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteor Sin, 71(3): 367-382(in Chinese).
- 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 M X, Wang Y C, Xiao X, et al, 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012[J]. Acta Meteor Sin, 71(4): 569-592(in Chinese).
- 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 D P, Li Y, 2009. A study on rainfall features of Beijing associated with typhoons[J]. Acta Meteor Sin, 67(5): 864-874(in Chinese).
- 丁一汇,李吉顺,孙淑清,等,1980. 影响华北暴雨的几类天气尺度系统分析[C]//中国科学院大气物理研究所集刊(第9号). 北京: 科学出版社: 119-134. Ding Y H, Li J S, Sun S Q, et al, 1980. Analysis of several types of weather systems affecting heavy rainfalls in North China[C]//Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Collected Papers of Institute of Atmospheric Physics, No. 9. Beijing: Science Press: 119-134 (in Chinese).
- 东高红,韩素芹,刘一玮,等,2013a. 一次大暴雨过程中尺度涡旋系统特征分析[J]. 暴雨灾害, 32(2): 97-104. Dong G H, Han S Q, Liu Y W, et al, 2013a. Characteristic analysis on the mesoscale vortex system of an excessive heavy rain event[J]. Torrential Rain Disaster, 32(2): 97-104(in Chinese).
- 东高红,何群英,刘一玮,等,2011. 海风锋在渤海西岸局地暴雨过程中的作用[J]. 气象, 37(9): 1100-1107. Dong G H, He Q Y, Liu Y W, et al, 2011. The role of sea breeze front in local storm of Bohai coast[J]. Meteor Mon, 37(9): 1100-1107(in Chinese).
- 东高红,刘一玮,孙蜜娜,等,2013b. 城市热岛与海风锋叠加作用对一次局地强降水的影响[J]. 气象, 39(11): 1422-1430. Dong G H, Liu Y W, Sun M N, et al, 2013b. Effect of urban heat island and sea breeze front superimposition on a local heavy rainfall [J]. Meteor Mon, 39(11): 1422-1430(in Chinese).
- 范广洲,吕世华,1999. 地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究[J]. 高原气象, 18(4): 659-667. Fan G Z, Lü S H, 1999. Numerical simulation study for the effect of terrain on North China summer precipitation[J]. Plateau Meteor, 18 (4): 659-667 (in Chinese).
- 方祖亮,俞小鼎,王秀明,2020. 东北暖季干线统计分析[J]. 气象学报, 78(2): 260-276. Fang Z L, Yu X D, Wang X M, 2020. Statistical analysis of drylines in Northeast China[J]. Acta Meteor Sin, 78(2): 260-276(in Chinese).
- 何群英,解以扬,东高红,等,2011. 海陆风环流在天津2009年9月26日局地暴雨过程中的作用[J]. 气象, 37(3): 291-297. He Q Y, Xie Y Y, Dong G H, et al, 2011. The role of sea-land breeze circulation in local convective torrential rain happening in Tianjin on 26 September 2009[J]. Meteor Mon, 37(3): 291-297 (in Chinese).
- 江吉喜,项续康,1998.“96·8”河北特大暴雨成因的中尺度分析[J]. 应用气象学报, 9(3): 304-313. Jiang J X, Xiang X K, 1998. Mesoscale analysis of causes for “96·8” extreme torrential rain of Hebei Province[J]. Quart J Appl Meteor, 9(3): 304-313(in Chinese).
- 蒋尚城,张博,周鸣盛,等,1981. 登陆北上减弱的台风所导致的暴雨——半热带系统暴雨[J]. 气象学报, 39(1): 18-27. Jiang S C, Zhang T, Zhou M S, et al, 1981. The hard rainstorms in North China induced by a landed northward moving and decaying typhoon-hard rainstorms of semi-tropical systems[J]. Acta Meteor Sin, 39(1): 18-27(in Chinese).
- 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 L, Sun J S, He N, 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 Meteor Sin, 75(5): 685-699(in Chinese).
- 雷雨顺,1981. 经向型持续性特大暴雨的合成分析[J]. 气象学报, 39 (2): 168-181. Lei Y S, 1981. The composite analysis of the meridional type persistent severe rainstorms[J]. Acta Meteor Sin,

- 39(2):168-181(in Chinese).
- 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 N, Ran L K, Zhou Y S, 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 Meteor Sin, 71(4):593-605(in Chinese).
- 梁钊明,高守亭,王彦,2013.渤海湾地区碰撞型海风锋天气过程的资料诊断分析[J].气候与环境研究,18(5):607-616. Liang Z M, Gao S T, Wang Y, 2013. Data analysis of collision-type sea-breeze front in the Bohai Bay region[J]. Clim Environ Res, 18 (5):607-616(in Chinese).
- 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 X N, Ni Y Q, He N, et al, 2013. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the extreme moisture environment in “7·21” heavy rain case[J]. Acta Meteor Sin, 71 (6):997-1011(in Chinese).
- 刘益然,郭大敏,辛宝恒,等,1979.关于“75·7”华北暴雨的水汽问题[J].气象学报,37(2):79-82. Liu A R, Guo D M, Xin B H, et al, 1979. The moisture of the “75·7” heavy rain in North China [J]. Acta Meteor Sin, 37(2):79-82(in Chinese).
- 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 H Z, Wang W G, Shao M X, et al, 2007. A case study of the influence of the western Pacific subtropical high on the torrential rainfall in Beijing Area[J]. Chin J Atmos Sci, 31(4):727-734(in Chinese).
- 刘金平,韩军彩,向亮,等,2015.1961—2012年京津冀地区不同等级降水日数时空演变特征[J].气象与环境学报,31(1):43-50. Liu J P, Han J C, Xiang L, et al, 2015. The temporal-spatial characteristics of precipitation days in different levels in Beijing-Tianjin-Hebei from 1961—2012[J]. J Meteor Environ, 31(1): 43-50(in Chinese).
- 刘伟,张庆红,2004.登陆台风中的中尺度对流系统的数值研究[J].北京大学学报(自然科学版),40(1):73-79. Liu W, Zhang Q H, 2004. Numerical study of the mesoscale convective systems in landfall typhoon herb[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 40(1): 73-79(in Chinese).
- 刘芸芸,丁一汇,2008.印度夏季风与中国华北降水的遥相关分析及数值模拟[J].气象学报,66(5):789-799. Liu Y Y, Ding Y H, 2008. Analysis and numerical simulation of the teleconnection between Indian summer monsoon and precipitation in North China[J]. Acta Meteor Sin, 66(5):789-799(in Chinese).
- 孟智勇,徐祥德,陈联寿,2002.9406号台风与中纬度系统相互作用的中尺度特征[J].气象学报,60(1):31-38. Meng Z Y, Xu X D, Chen L S, 2002. Mesoscale characteristics of the interaction between TC TIM(9406) and mid-latitude circulation[J]. Acta Meteor Sin, 60(1):31-38(in Chinese).
- 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 M L, Liu H W, Zhu Y X, et al, 2013. Study of the dynamic effects of the upper-level jet stream on the Beijing rainstorm of 21 July 2012 [J]. Acta Meteor Sin, 71(6):1012-1019(in Chinese).
- 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 L K, Qi Y B, Hao S C, 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters[J]. Chin J Atmos Sci, 38 (1):83-100(in Chinese).
- 沈学顺,苏勇,李兴良,等,2025.中国业务数值天气预报自主发展中的理论和方法创新[J].气象,51(11):1293-1320. Shen X S, Su Y, Li X L, et al, 2025. Innovation of theory and methodology in the independent development of operational numerical weather prediction in China[J]. Meteor Mon, 51(11):1293-1320(in Chinese).
- 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 J S, 2005a. The effects of vertical distribution of the lower level flow on precipitation location[J]. Plateau Meteor, 24(1):62-69(in Chinese).
- 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 J S, 2005b. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing Area[J]. Chin J Atmos Sci, 29(3):445-452(in Chinese).
- 孙继松,2014.从天气动力学角度看云物理过程在降水预报中的作用[J].气象,40(1):1-6. Sun J S, 2014. Role of cloud physics in precipitation forecasting by synoptic dynamics[J]. Meteor Mon, 40(1):1-6(in Chinese).
- 孙继松,2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,36 (6):498-506. Sun J S, 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. Torrential Rain Disaster, 36(6):498-506(in Chinese).
- 孙继松,2023.与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热动力学过程[J].气象,49(1):1-11. Sun J S, 2023. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales[J]. Meteor Mon, 49(1):1-11(in Chinese).
- 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 J S, Lei L, Yu B, et al, 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):609-623(in Chinese).
- 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 J S, Wang H, Wang L, et al, 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004[J]. Chin J Atmos Sci, 30(2):221-234(in Chinese).
- 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 J S, Yang B, 2008. Meso-β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation[J]. Chin J Atmos Sci, 32(6):1352-1364(in Chinese).
- 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. Sun J H, Qi L L, Zhao S X, 2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608” typhoon[J]. Acta Meteor Sin, 64(1):57-71(in Chinese).

- 孙建华,张小玲,卫捷,等,2005.20世纪90年代华北暴雨过程特征的分析研究[J].气候与环境研究,10(3):492-506. Sun J H, Zhang X L, Wei J, et al, 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s[J]. Clim Environ Res, 10(3): 492-506(in Chinese).
- 孙建华,赵思雄,傅慎明,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 J H, Zhao S X, Fu S M, 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 705-718(in Chinese).
- 孙淑清,赵思雄,1980.盛夏大尺度低空急流及其与华北暴雨的关系[M].北京:科学出版社:117-124. Sun S Q, Zhao S X, 1980. The Relationship Between the Large Scale Low Jet and Heavy Rainfalls During Mid-Summer in North China[M]. Beijing: Science Press, 117-124(in Chinese).
- 陶诗言,1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社:225-228. Tao S Y, 1980. Heavy Rainfalls in China[M]. Beijing: Science Press: 225-228(in Chinese).
- 陶诗言,丁一汇,周晓平,1979.暴雨和强对流天气的研究[J].大气科学,3(3):227-238. Tao S Y, Ding Y H, Zhou X P, 1979. Research on heavy rainfalls and severe convective weather[J]. Sci Atmos Sin, 3(3):227-238(in Chinese).
- 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. Tao S Y, Zhao S X, Zhou X P, et al, 2003. The research progress of the synoptic meteorology and synoptic forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 27(4): 451-467 (in Chinese).
- 陶祖钰,1980.湿急流的结构及形成过程[J].气象学报,38(4):331-340. Tao Z Y, 1980. The structure and formation of the moist jet stream[J]. Acta Meteor Sin, 38(4):331-340(in Chinese).
- 田生春,曾昭美,1982.夏季华北地区高空槽前有无暴雨的对比分析[J].大气科学,6(2):179-186. Tian S C, Zeng Z M, 1982. A comparison between two cases with and without heavy rain in the front of upper trough in summer, North China[J]. Chin J Atmos Sci, 6(2):179-186(in Chinese).
- 万夫敬,孙继松,孙敏,等,2021.山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J].气象学报,79(5):717-731. Wan F J, Sun J S, Sun M, et al, 2021. Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 79(5):717-731(in Chinese).
- 王树芬,1990.一次由海风锋触发的强对流天气分析[J].大气科学,14(4):504-507. Wang S F, 1990. Severe hail storm caused by sea-breeze front[J]. Sci Atmos Sin, 14 (4): 504-507 (in Chinese).
- 王彦,高守亭,梁钊明,2014.渤海湾海风锋触发雷暴的观测和模拟分析[J].高原气象,33(3):848-854. Wang Y, Gao S T, Liang Z M, 2014. Analysis on the observation and simulation of thunderstorms triggered by sea breeze front in Bohai Bay[J]. Plateau Meteor, 33(3):848-854(in Chinese).
- 肖现,陈明轩,高峰,等,2015.弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J].大气科学,39(1):100-124. Xiao X, Chen M X, Gao F, et al, 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing[J]. Chin J Atmos Sci, 39 (1):100-124(in Chinese).
- 肖现,王迎春,陈明轩,等,2013.基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热动力机制的模拟分析[J].气象学报,71(5):797-816. Xiao X, Wang Y C, Chen M X, et al, 2013. A mechanism analysis of the thermo-dynamical field of a suddenly intensifying storm from mountains in the Beijing Area with the radar data 4DVar[J]. Acta Meteor Sin, 71(5):797-816 (in Chinese).
- 徐洪雄,徐祥德,张胜军,等,2014.台风韦森特对季风汽流的“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 H X, Xu X D, Zhang S J, et al, 2014. Long-range moisture alteration of a typhoon and its impact on Beijing extreme rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 38 (3): 537-550 (in Chinese).
- 杨波,孙继松,毛旭,等,2016.北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J].气象学报,74(6):919-934. Yang B, Sun J S, Mao X, et al, 2016. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 74(6):919-934(in Chinese).
- 游景炎,1965.暴雨带内的中尺度系统[J].气象学报,35(3):293-304. You J Y, 1965. The mesoscale systems in heavy rainfall zone[J]. Acta Meteor Sin, 35(3):293-304(in Chinese).
- 章淹,1983.地形对降水的作用[J].气象, (2):9-13. Zhang Y, 1983. The topographical effect on rainfall[J]. Meteor Mon, (2): 9-13 (in Chinese).
- 张亦洲,苗世光,戴永久,等,2013.北京夏季晴天边界层特征及城市下垫面对海风影响的数值模拟[J].地球物理学报,56(8):2558-2573. Zhang Y Z, Miao S G, Dai Y J, et al, 2013. Numerical simulation of characteristics of summer clear day boundary layer in Beijing and the impact of urban underlying surface on sea breeze [J]. Chin J Geophys, 56(8):2558-2573(in Chinese).
- 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 S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. Meteor Mon, 44 (3): 351-360 (in Chinese).
- 赵宇,崔晓鹏,高守亭,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[J].大气科学,35(5):945-962. Zhao Y, Cui X P, Gao S T, 2011. A study of structure of mesoscale systems producing a heavy rainfall event in North China[J]. Chin J Atmos Sci, 35(5):945-962(in Chinese).
- 郑丽娜,孙继松,2024.泰山地形对一次副高边缘大暴雨过程影响的观测分析[J].气象学报,82(2):155-167. Zheng L N, Sun J S, 2024. Observational analysis of the topographic effect of Mount Tai on an extreme rainfall event occurring at the edge of the subtropical high[J]. Acta Meteor Sin, 82 (2): 155-167 (in Chinese).
- 郑永光,杨波,蓝渝,等,2025.强对流天气形成机制和预报研究综述[J].气象,51(11):1495-1522. Zheng Y G, Yang B, Lan Y, et al, 2025. A review of mechanisms and forecasting technology of severe convective weather[J]. Meteor Mon, 51(11):1495-1522 (in Chinese).

- 周璇,孙继松,张琳娜,等,2020.华北地区持续性极端暴雨过程的分类特征[J].气象学报,78(5):761-777. Zhou X, Sun J S, Zhang L N, et al, 2020. Classification characteristics of continuous extreme rainfall events in North China[J]. *Acta Meteor Sin*, 78 (5): 761-777(in Chinese).
- Bao X H, Sun J S, Yin J F, et al, 2024. What caused the differences between the July 2023 and August 1996 extreme rainfall events in North China under similar synoptic background? [J]. *J Meteor Res*, 38(5):861-879.
- Bartels D L, Maddox R A, 1991. Midlevel cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 119(1): 104-118.
- Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A, et al, 2002. Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes [J]. *J Atmos Sci*, 59(13):2033-2056.
- Chen S S, Frank W M, 1993. A numerical study of the genesis of extratropical convective mesovortices. Part I : evolution and dynamics[J]. *J Atmos Sci*, 50(15):2401-2426.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. *Wea Forecasting*, 11(4):560-581.
- Dou J J, Wang Y C, Bornstein R, et al, 2015. Observed spatial characteristics of Beijing urban climate impacts on summer thunderstorms[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 54(1):94-105.
- Guo X L, Fu D H, Wang J, 2006. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City[J]. *Atmos Res*, 82(1-2):112-126.
- Jiang X Y, Liu W D, 2007. Numerical simulations of impacts of urbanization on heavy rainfall in Beijing using different land-use data[J]. *Acta Meteor Sin*, 21(2):245-255.
- Kirshbaum D J, Adler B, Kalthoff N, et al, 2018. Moist orographic convection: physical mechanisms and links to surface-exchange processes[J]. *Atmosphere*, 9(3):80.
- Li Z, Yan Z W, Tu K, et al, 2015. Changes of precipitation and extremes and the possible effect of urbanization in the Beijing metropolitan region during 1960—2012 based on homogenized observations[J]. *Adv Atmos Sci*, 32(9):1173-1185.
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al, 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. *J Climate*, 29(24): 8703-8719.
- Miao S G, Chen F, Li Q C, et al, 2011. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: a case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50(4):806-825.
- Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al, 2011. Urban modification of thunderstorms: an observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50 (5):1129-1144.
- Pierrehumbert R T, 1984. Linear results on the barrier effects of meso-scale mountains[J]. *J Atmos Sci*, 41(8):1356-1367.
- Raymond D J, Jiang H, 1990. A theory for long-lived mesoscale convective systems[J]. *J Atmos Sci*, 47(24):3067-3077.
- Ryu Y H, Smith J A, Bou-Zeid E, et al, 2016. The influence of land surface heterogeneities on heavy convective rainfall in the Baltimore-Washington Metropolitan Area[J]. *Mon Wea Rev*, 144(2):553-573.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 133(4):961-976.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2006. Characteristics of U. S. extreme rain events during 1999—2003[J]. *Wea Forecasting*, 21(1):69-85.
- Shu Y, Sun J S, Pan Y N, 2017. Characteristics of mesoscale vortices over China in 2015[J]. *J Meteor Res*, 31(6):1149-1160.
- Smith R B, Barstad I, 2004. A linear theory of orographic precipitation[J]. *J Atmos Sci*, 61(12):1377-1391.
- Wang C C, Chen G T J, Carbone R E, 2004. A climatology of warm-season cloud patterns over East Asia based on GMS infrared brightness temperature observations[J]. *Mon Wea Rev*, 132 (7):1606-1629.
- Wissmeier U, Smith R K, Goler R, 2010. The formation of a multicell thunderstorm behind a sea-breeze front[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(653):2176-2188.
- Xia R D, Ruan Y Q, Sun J S, et al, 2025. Distinct mechanisms governing two types of extreme hourly rainfall rates in the mountain foothills of North China during the passage of a typhoon remnant vortex from 30 July to 1 August 2023[J]. *Adv Atmos Sci*, 42(4):761-779.
- Yin J F, Gu H D, Liang X D, et al, 2022. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021[J]. *J Meteor Res*, 36(1):6-25.
- Yin S Q, Li W J, Jeong J H, et al, 2011. Diurnal variations of summer precipitation in the Beijing Area and the possible effect of topography and urbanization[J]. *Adv Atmos Sci*, 28(4):725-734.
- Zhang H, Zhai P M, 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season[J]. *Adv Atmos Sci*, 28(5):1177-1183.
- Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, et al, 2015. An observational analysis of warm-sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(8):3274-3291.

(本文责编:侯翠梅)