

高守亭, 周玉淑, 冉令坤. 2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展 [J]. 大气科学, 42 (4): 833–846. Gao Shouting, Zhou Yushu, Ran Lingkun. 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 833–846, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17277.

## 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展

高守亭<sup>1,2</sup> 周玉淑<sup>1,2</sup> 冉令坤<sup>1,2</sup>

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

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘 要** 本文分别从华南前汛期暴雨、江淮流域梅雨锋暴雨、华北和东北暴雨以及暴雨预报方法等方面回顾了我国近年来在三大主要雨带的观测、数值模拟、动力机理及诊断分析和预报方法方面取得的进展, 指出了华南前汛期暴雨、江淮梅雨锋暴雨及华北东北暴雨研究取得的新认识, 认为华南前汛期暴雨的形成机理主要是发生在低空南风向北推进过程中, 由海岸线及地形抬升而产生位势不稳定造成强上升运动, 以及由于南风低空急流向北发展时产生急流前部的辐合而发生流线分叉使低层低涡发展, 促进垂直运动加强或使正涡度集中促使垂直运动发展而造成暴雨; 江淮暴雨生成机制主要与对称不稳定、涡度场变化及  $\beta$  中尺度对流线有关; 而华北东北暴雨过程中的非均匀饱和和引起的局部湿度集中特点较为明显, 中高层干冷空气入侵引起的不稳定和动量下传及高空中尺度急流增强引发的高层局地辐散增强对暴雨发生有重要作用。目前, 新型探测资料已经用到暴雨研究和预报中, 具有自主知识产权的 GRAPES-MESO 和 GRAPES-GFS 系统已经实现业务化, 并在集合数值预报方面取得显著进步, 且动力因子暴雨预报方法在很多省市气象台得到推广应用。虽然暴雨机理研究和预报已经取得以上诸方面的长足进步, 但是也还存在不少问题, 需要加强基于观测的暴雨中尺度系统的理论研究、数值模式动力框架和物理过程描述的改进、资料同化理论技术的发展及人工智能技术如何用到大气科学的研究和业务应用等, 以期在我国暴雨中尺度系统的三维精细结构、发生发展机理和预报理论和方法研究方面取得更大进步。

**关键词** 暴雨 形成机理 预报方法 研究进展

文章编号 1006-9895(2018)04-0833-14

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17277

## A Review on the Formation Mechanisms and Forecast Methods for Torrential Rain in China

GAO Shouting<sup>1,2</sup>, ZHOU Yushu<sup>1,2</sup>, and RAN Lingkun<sup>1,2</sup>

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** This paper reviews the progress in observation, numerical simulation, dynamic mechanism, diagnostic analysis and prediction method for three major rain belts in recent years from the perspectives of heavy rainfall in warm South China, rainstorms caused by the Meiyu front in the Yangtze–Huaihe River basin, torrential rain in North and Northeast China and forecasting methods for rainstorm. This paper summarizes some new understandings of intense

收稿日期 2017-11-14; 网络预出版日期 2018-04-08

作者简介 高守亭, 男, 1945 年出生, 研究员, 主要从事中尺度动力学研究。E-mail: gst@mail.iap.ac.cn

通讯作者 周玉淑, E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41661144024、91437215、41475054、41575047、41475097

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41661144024, 91437215, 41475054, 41575047, 41475097)

rainfall in recent researches. First of all, it is found that rainstorms in the warm sector of South China mainly occur during the process when low-level southerly winds move northward, which is the major mechanism for rainstorm formation in South China. During this process, the potential instability caused by coastline and orographic lifting can lead to strong ascending motions. Besides, the northward movement of low-level southerly winds may converge in front of the jet stream, leading to streamline forks that are favorable for the development of cyclonic vortices or the concentration of positive vorticity and promote vertical motions, which often cause torrential rainfall. The mechanism of heavy rainfall over the Yangtze-Huaihe River basin is mainly associated with symmetric instability and variation of vorticity field as well as the  $\beta$  mesoscale convection line. In North and Northeast China, local concentration of humidity is more obvious due to the non-uniform saturation during rainfall process. The instability and downward momentum transport caused by dry and cold air in the middle and upper levels play a significant role in rainstorm generation, while the enhancement of local upper-level divergence caused by the reinforce of mesoscale upper-level jet is also important. Recently, new sounding data have been used in rainstorm research and prediction. The GRAPES-MESO and GRAPES-GFS systems with independent intellectual property also have been put into operation, and make impressive progress in numerical ensemble prediction. In addition, the dynamic-factor approach to predict rainstorm has been popularized and applied in many provincial and municipal meteorological bureaus. Although great progresses have been achieved in the research and forecast of rainstorm mechanisms, there still exist a lot of problems. For instance, it is crucial to promote theoretical research of meso-scale rainstorm systems based on observations. Further improvements of dynamic framework and better descriptions of physical processes in numerical models and new developments of theory and technology of data assimilation are also important. Moreover, how to apply artificial intelligence technology to atmospheric research and business, how to refine the three-dimensional structure of rainstorms, how to further explore mechanisms for the generation and development of rainstorm, and how to advance the prediction theory for heavy rainfall mesoscale system all need to be considered in the future study.

**Keywords** Torrential, Mechanism study, Forecast method, Progress

## 1 引言

我国处于东亚季风区,每到夏天受季风影响自南向北水汽供应丰富。在副热带高压、阻高及低涡低槽等天气系统共同作用下,常出现暴雨洪涝天气。但由于地域辽阔,不同区域常出现类型不同的暴雨,如华南前汛期暴雨、江淮流域梅雨锋暴雨、西南低涡暴雨、华北低槽和低涡暴雨、东北冷涡暴雨以及台风暴雨等。虽然台风暴雨和西南低涡暴雨过程雨量大,但影响系统明确,也有不少针对性的回顾,受限于论文篇幅,西南低涡和台风暴雨形成机理及预报方法不涵括在本文论述内容中。以下按照华南前汛期暴雨、江淮流域梅雨锋暴雨、华北东北的低槽和低涡暴雨以及暴雨预报方法进行回顾。

## 2 华南前汛期暴雨

华南是我国暴雨致灾较为严重的区域之一,对华南暴雨的观测和研究一直是气象界的一个关注重点,如:1977~1982年的华南前汛期暴雨试验验证了华南暴雨具有明显的暖区暴雨特点(黄士松,1986);1983~1993进行的中国台湾地区中尺度试验(TAMEX)增加了对华南暴雨锋面性质及中尺度

对流系统(MCS)形成及发展的新认识(Kuo and Chen, 1990)。20世纪90年代,基于我国在中尺度探测技术方面的进展,于1994年开展了华南特大暴雨研究(薛纪善,1999),1998年启动了国家“九五”攀登科技专项“海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究”(简称为华南暴雨科学试验)开始把暴雨 $\beta$ 中尺度结构与变化的研究列为重点(周秀骥等,2003),加强了自动气象站观测,多普勒天气雷达、风廓线仪、气象卫星及GPS等其他遥感探测资料在监测分析和预报暴雨 $\beta$ 中尺度结构与变化过程中的应用研究(倪允琪等,2006)。2004年启动了国家973项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究”,通过5年的攻关,在华南致洪暴雨的机理、监测与预测理论和研究方法上都取得了一系列的重要阶段性研究成果,应用遥感资料对中尺度对流系统结构进行了研究,得到了华南梅雨锋上中尺度对流系统(MCS)三维结构的概念模型(王立琨等,2001;孙建华等,2004;倪允琪等,2006;蒙伟光等,2007)。最近几年,有关华南暴雨的观测试验和研究主要是中国气象科学研究院组织的“我国南方暴雨野外科学试验”(简称为SChEREX),主要针对华南暴雨中 $\beta$ 尺度系统进行

观测研究, 揭示中  $\beta$  尺度结构及其发展过程造成华南暴雨的机理 (Zhang et al., 2011)。另有“华南季风降水试验”(SCMREX 计划), 于 2013 年 5~6 月和 2014 年 4~6 月实施了华南季风降水观测, 在新中尺度观测技术、华南暖区对流发生发展机制等方面取得诸多进展 (Wang et al., 2014; 何立富等, 2016)。

华南前汛期暴雨过程中, 经常出现暖区暴雨, 即没有任何冷空气影响下而产生的暴雨, 对这类暴雨早期定义为远离地面冷空气或锋面 (包括冷锋和静止锋等) 大约 200 公里以外发生的暴雨 (黄土松, 1986)。后来暖区暴雨定义被广义化, 比如 2012 年 7 月 21 日发生在北京的大暴雨, 期中就有暖区暴雨过程, 这种类型的暖区暴雨离锋面的距离却并不在 200 公里以外, 而是比较近, 事实上是暖区暴雨发生后不久 (相隔几个小时) 就产生了锋面暴雨。所以广义地说, 不受冷空气影响的暴雨就可称为暖区暴雨。这类暴雨早在 1960 年代、1970 年代甚至更早就被预报人员注意到了, 陶诗言先生在他的暴雨专著中也提到华南前汛期的暖区暴雨 (陶诗言, 1980)。因此, 暖区暴雨早就受到气象工作者的关注。包澄澜 (1986) 对华南前汛期暴雨研究的回顾指出, 研究华南暴雨的着眼点应放在行星边界层在内的低层流场特征上。赵玉春和王叶红 (2009) 对近 30 年华南前汛期暴雨的研究进行了概述。由于历史条件限制, 早期缺乏高分辨率的观测资料以及数值模拟资料, 导致暖区暴雨的研究工作进展缓慢。直到设立国家 973 项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”和财政部行业气象专项“华南暖区暴雨发生发展机制及关键预报技术研究”才直接支持了对华南暖区暴雨的研究, 在这些项目资助下, Jiang et al. (2017) 等研究揭示了华南暖区暴雨的日变化特征, 指出降水峰值出现在早上及下午, 早上的峰值降水与低空急流的发展关系密切, 低空急流提供了高相当位温 ( $\theta_e$ ) 的湿空气, 而午后的降水峰值是地表加热及海陆风的共同作用。这种暖区暴雨有三种传输模态, 主要是带状自西向东传输或向东南传输。强的南风向北推进时会产生两种现象: 其一是南风遇到南低北高的地形时, 整层大气抬升并产生位势不稳定, 垂直运动得以发展 [见 Jiang et al. (2017) 图 11b], 把相对湿度大的湿空气送到高空后, 发生凝结进而造成暴雨; 其二是南风向北推进过程中, 风的水平分布不均

匀, 在某些地方形成低空急流, 由于急流北进辐合使流线分叉, 向左分叉时的气旋式环流会造成向上的垂直运动并形成低涡, 造成低涡暴雨 [见 Jiang et al. (2017) 图 12d] 或造成低涡不明显的局地飑线及强对流暴雨 [见 Yang et al. (2017) 的图 3a]。

因此, 华南暖区暴雨的形成机理主要是发生在低空南风向北推进过程中, 由海岸线及地形抬升而产生位势不稳定造成强上升运动, 以及由于南风低空急流向北发展时会产生急流前部的辐合而发生流线分叉, 向左分叉时会使得低层低涡发展促进垂直运动加强或使正涡度集中促使垂直运动发展造成低涡性质或强对流性质的暴雨。可见华南暖区暴雨的研究进展主要是用资料佐证了早期气象学者提出的一些观点, 再次强调了海陆分布差异、地形抬升和高低空急流的重要作用。

### 3 江淮流域梅雨锋暴雨

我国每年夏季的另一个重点的暴雨区是江淮流域梅雨锋天气背景下出现的江淮梅雨锋暴雨。梅雨主体发生时间平均是从 6 月 20 日左右到 7 月 10 日前后, 有时可长达一个月。由于降水时段集中, 且经常出现大到暴雨, 有时造成较大洪涝, 如历史上 1935 年 7 月的长江流域暴雨、1991 年淮河流域暴雨、1998 年长江流域的大暴雨和 2007 年的江淮流域大暴雨等, 都造成了特大洪水与灾害。梅雨的生成机制早有研究, 主要认为是梅雨锋及其上的中尺度扰动所造成。关于梅雨锋暴雨的研究很多, 主要是天气形势、天气尺度影响系统和水汽输送特点诊断 (陶诗言, 1980, 张丙辰, 1990, Gao et al. 2002; 周玉淑等, 2005, 平凡等, 2014), 梅雨锋锋面结构、锋面对流及锋生过程讨论 (胡伯威和彭广, 1996; Fang and Wu, 1998; 谈哲敏和伍荣生, 2000a, 2000b; 伍荣生, 2002; Zhou et al., 2004, 2005a, 2005b; Geng, 2008; 赵思雄, 2011; Yang et al., 2014, 2015), 暴雨中尺度系统发生发展的动力过程 (陆汉城和吕梅, 1997; 胡伯威等, 2001; 高守亭等, 2002; 翟国庆等, 2003; 周玉淑等, 2003; Gao et al., 2004a, 2004b; 胡伯威, 2005; Sun and Zhang, 2012), 利用数值模拟资料和雷达、卫星等遥感资料对暴雨中尺度系统结构的揭示 (朱民等, 1998; 贝耐芳和赵思雄, 2002; 王建捷和李泽椿, 2002; 张小玲等, 2004; 李柏等, 2007; 孙晶等, 2007; Gao et al., 2008; 周玉淑和李柏, 2010; 杨舒楠等,

2017)等。研究的共同结论是梅雨锋既有准静止锋性质,又有露点锋性质,在西南季风爆发期,暖湿气流不断地被输送到梅雨锋前的长江流域,受锋面抬升及锋面不稳定等因素影响,锋面上有中尺度系统发生发展,使暖湿空气上升并成云致雨。此外,在梅雨期间,还受西南涡东移影响(傅慎明等,2011)。倪允琪等(2006)总结国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”时指出:基于多种实时观测资料的分析,得到了梅雨锋暴雨的多尺度物理模型,认为梅雨锋是由多个不同尺度系统构成的梅雨锋系,它具有介于温带锋系结构与热带辐合带结构之间的副热带锋系结构。在长江中下游,梅雨锋有时可表现为双锋结构,锋前的湿物理过程与锋上强对流系统发展形成的正反馈过程以及梅雨锋系的不同尺度系统的相互作用以及地形引起的次级环流是梅雨锋维持与发展的重要机制。

一般情况下,梅雨期的环流型多为单阻型或双阻型,在贝加尔湖附近为槽区,冷空气沿偏西北路径到达江淮(朱乾根等,2000),但是自21世纪10年代初以来,贝加尔湖常出现脊区,冷空气沿脊的东侧而下,常在我国长江中下游及西部地区引发较多的降水(赵思雄,2011),同时由于中尺度涡旋频发,常造成洪涝,其灾害甚至涉及到一些支流及小的江河,预报这类中尺度涡旋系统造成降水的难度更大(赵思雄和孙建华,2013)。因此,近些年来,对长江梅雨的研究进展主要体现在中尺度涡旋及对流系统结构及其发展机理方面(何斌等,2003;孙晶,2011;赵玉春,2011;许长义等,2012;张家国等,2013;崔春光等,2014;郑婧等,2015;赵宇等,2017;杨舒楠等,2017)。随着雷达、卫星、地面观测网的加密以及数值模式的发展所提供的高时空分辨率资料为研究暴雨中尺度系统提供了可能。刘黎平等(2004)的研究结果揭示出梅雨锋暴雨雨带中存在有许多 $\beta$ 中尺度或 $\gamma$ 中尺度强回波带或回波团,长江中游的混合性强降水雨带在长200 km以上的低空切变线上形成,切变线低空风场的扰动、中尺度切变和 $\beta$ 中尺度辐合是造成对流发展的原因。通过加密观测资料分析和高分辨模拟,孙建华等(2004)和王璐璐等(2015)分析了梅雨期暴雨的中小尺度系统的结构特征,给出了一类 $\beta$ 中尺度对流线的模型,表明在梅雨锋云系中也有中尺度的线状对流。受惯性重力波的影响(王晓芳等,

2007; Ran and Chen, 2016; Liu et al., 2018)或中层正涡度平流到了长江流域,可诱发锋面或切变线上中尺度扰动发展而形成暴雨等(许小峰和孙照渤,2003;易军等,2015;姚秀萍等,2017),边界层的中尺度扰动涡旋对长江中游梅汛期的暴雨也有激发作用(沈杭锋等,2013)。除此之外,Luo and Chen(2015)还利用高分辨的数值模拟资料研究了梅雨锋上中尺度对流系统的可预报性和物理机制,认为冷空气抬升西南暖湿气流至自由对流高度激发的夜间对流有利于梅雨锋上中尺度对流系统的发生发展,但导致极端降水的中尺度对流系统的触发过程可预报性较低。

对江淮流域,特别是梅雨结束前,也会出现暖区性质的暴雨,胡伯威和彭广(1996)在研究江淮流域梅雨时,指出在梅雨结束时的大暴雨有时不受冷空气影响,他们把这类暴雨称为暖切变型暴雨,认为暖切变型江淮梅雨锋暴雨截然不同于中纬度锋面暴雨,它已远离东亚高空急流和锋带,在自由大气层是相当正压结构。这种暖切变型江淮梅雨的产生,其机制可能是斜压性极弱的副热带高空东移的短波扰动在掠过低层暖干和暖湿空气团(“湿度锋”)时,由位于紧靠湿度锋带南侧假相当位温( $\theta_{se}$ )二阶导数负值最大轴附近的带状CISK所触发。此外,在长江流域,由于暖湿空气沿梅雨锋面爬升,在爬升过程还有凝结潜热释放,这样就会造成长江流域大气高低层的温差比较小,使得维萨拉频率明显变小,容易发生里查逊数小于1,从而产生对称不稳定。这是江淮流域暴雨发生过程中的一个特点,这个特征主要表现为维萨拉频率的减小而不是风切变的加大(Gao et al., 2010)。

所以江淮暴雨生成机制与对称不稳定、涡度场的变化、 $\beta$ 中尺度对流线及边界层扰动等关系极大,江淮流域梅雨结束前也会出现暖区性质的暴雨,与梅雨锋附近的湿度梯度环境下的动热力不稳定发展有关,是近些年来梅雨锋暴雨研究方面的新认识。

## 4 华北和东北暴雨

华北和东北暴雨过去有很多研究,特别是河南“75·8”暴雨发生后,对华北暴雨的研究更加有组织的进行并有一系列的研究成果。1976年,北方14省市、自治区气象局及大专院校、科研单位自发组织了科研协作组,历时15年,对“北方暴雨成

因及预测方法”进行了广泛而深入的研究,取得了大量的具有当时国内领先水平的成果,并在业务中得到应用。其中吴正华、孙淑清和陶祖钰等还写出了《华北暴雨》专著(吴正华和河北暴雨组,1992),集中地反映了华北暴雨的气候特征、环流背景以及急流和中尺度系统等方面对暴雨发生的作用等,并提出区域性暴雨的预报思路和预报流程。同时,中国科学院大气物理研究所陶诗言先生领导下,写出了《中国之暴雨》专著(陶诗言,1980)。专著中指出最常见的华北暴雨类型有高空槽(伴冷锋)暴雨,冷涡暴雨等暴雨天气型。随着观测资料的增多和数值模式的发展,此后的研究逐步开始重视暴雨中尺度系统,如陶祖钰等(2004)指出,2004年7月10日北京市出现的局地强降水是由水平尺度100 km左右的中尺度对流系统(MCS)产生的。云图上MCS的特征很不典型,但降水强度非常大,上升气流也达到对流系统的典型量级,有必要对这种非典型MCS的发生条件和结构进行研究。除了MCS外,华北地区的中尺度暴雨系统与低空急流、地形和城市环流及风场变形也有关系(孙继松,2005;孙继松和杨波,2008;孙继松等,2012;李娜等,2013)。邓涤菲等(2012)进一步把有限区域风场分解方法应用到东北冷涡暴雨过程的分析,揭示了冷涡在不同发展阶段的风场的有旋和无旋分量的变化特点及其对暴雨落区的影响。

由于华北和东北处于中高纬度,准地转理论在这两个地区是最适用的,同时,盛夏时期,高空急流轴北跳到 $40^{\circ}\text{N}$ 以北,华北东北处于急流右侧辐散区,因此,华北和东北暴雨的形成机理与华南及江淮流域暴雨的形成机理有较大区别。华南暴雨更关注大气低层,特别是边界层,所以低空急流及其对水汽的输送至关重要。而江淮暴雨中低层相对于其他层次更重要,因为700 hPa上的切变及低涡等天气系统都在大气中低层。可华北暴雨及东北暴雨更关注大气中层及大气高层,如500 hPa上的西风槽、蒙古低涡以及东北冷涡等这些天气系统都处在大气中层及以上,系统前部都会出现高空暖平流及高空正涡度平流。由准地转理论可知,在这两种平流条件下,必然会出现垂直上升运动而进行调整,这样就会出现槽前及低涡前部的降水,所以华北、东北暴雨的形成机理与槽前辐散及低涡东南相位的上升运动有关。虽然准地转理论中垂直运动不强,只有厘米量级,但对于低层暖湿气流的启动起

着关键作用。还有一个重要方面就是高空急流,其右侧的辐散,特别是急流中心的右后侧的辐散对低层垂直上升运动的启动起了很关键的作用。这种由大气中高层气流运动探讨华北、东北暴雨的观点及做法在过去都已被关注到了(陶诗言,1980)。近几年关于华北暴雨的研究,主要集中在干侵入方面,即在大气中高层有暴雨区冷干侵入的天气现象。Gao et al. (2010)对华北暴雨过程的分析发现,在华北( $35^{\circ}\text{N}\sim 42^{\circ}\text{N}$ )的暴雨带上,有明显的冷干空气的侵入现象,来自高层的冷干空气入侵到北纬 $40^{\circ}\text{N}$ 及其以南的暴雨区,对华北暴雨有加强的作用。王东海等(2007)和Wang and Yang (2010)对东北暴雨的系统回顾和研究中揭示出在东北冷涡的天气背景下,干侵入也是东北暴雨形成的一个主要特点。这种冷干空气的入侵(Yang et al., 2009),大大促进了暴雨区内的不稳定(Yang and Gao, 2006; Yang et al., 2007a),促使垂直运动发展后,暴雨增大及加强。华北、东北暴雨由于受到干冷空气侵入而引起大气高层动量下传的影响,结果会使空气质点位能减小而动能增加,即出现空气质点有效位能向质点动能的转换。这就造成下暴雨的时候经常带有地面大风,即连风带雨同时出现,其中,华北飚线降水就是最明显的例子,而这种状况在华南及江淮出现较少。华北民间把这种暴雨称为“急性暴雨”。由于大风的阵性及分布不均匀,造成局地辐合辐散变化大,极易产生局地涡旋,所以,华北、东北降水很多系统都是局地涡旋系统,即有中尺度涡存在,这在华北暴雨的数值模拟试验中得到证实[见周玉淑等(2014)图7]。另外高空急流中心的移动引起的强辐散也是华北暴雨启动的重要机制,高空局地大风增强,会导致垂直运动明显增强,造成强对流发生,产生暴雨[见赵宇等(2011)图11]。

除了干侵入现象外,华北暴雨及东北暴雨过程中,有明显的非均匀饱和现象,意味着华北、东北地区干湿对比更明显。在华南及江淮流域,这种对比相对较小,特别是华南,在前汛期,低层空气湿度极大,干湿对比几乎没有。而华北东北不同,暴雨区是湿饱和的,但在其外是明显水汽不足的。陶祖钰(1980)对华北夏季一次暴雨过程的三维流场和湿度场进行的分析就揭示了湿急流的结构和形成过程,并指出这支急流和饱和凝结区相联系。在华北东北的暴雨区内,水汽饱和凝结一般也是非均

匀的, 这种现象会导致暴雨发生更加局地化, 有时还会强度很大, 这主要是非均匀饱和引起的局部湿度集中所致。针对这种现象, Gao et al. (2010) 提出非均匀饱和位温及维萨拉频率并组成里查逊数以探讨华北及东北暴雨的形成机理。并用切变风螺旋度和热成风螺旋度(王东海等, 2009)、广义  $Q$  矢量(Yang et al., 2007b; Yang and Wang, 2008) 等能反映水汽非均匀饱和以及气流旋转辐合抬升效应的新型物理量对东北冷涡暴雨进行诊断。

在华北地区, 盛夏也会出现暖区暴雨, 2012 年 7 月 21 日的北京大暴雨(简称“7.21”暴雨)就有两个峰值, 第一个峰值的降水就是暖区暴雨所造成的, 孙继松等(2012)和周玉淑等(2014)及刘璐等(2015)利用常规观测资料、地面加密自动站、多普勒雷达和逐小时雨量等多种观测资料以及雷达变分同化分析系统的高分辨率分析场资料, 详细分析了这次暖区暴雨的降水过程的不稳定层结演变和发生机理, 认为此次暴雨过程降水回波具有明显的“列车效应”传播特征, “列车效应”的初始对流起源于地形强迫造成的暖区内的中尺度辐合以及低空急流增强过程中的风速脉动, 低空急流提供大量的水汽条件, 在向西北运动过程中遇到了地形而被迫爬升, 地形的动力抬升强化了局地向上垂直运动, 且西南风急流又同东南风急流相遇, 产生局地强辐合, 形成中尺度对流中心和涡旋, 产生暖区暴雨。可见, 其形成机制与华南暖区暴雨形成机制有极类似之处。暖区暴雨的产生与大气低层湿空气输送及地形抬升等因素关系极大, 是暖区暴雨产生的不可缺少的重要因子。

除了槽前辐散及低涡附近上升运动及高空急流对暴雨的启动机制外, 以上研究强调了干侵入、非均匀饱和引起的湿度集中、局地辐合以及列车效应等在华北、东北暴雨中作用, 为华北、东北暴雨提供了新的认识和理解, 是华北东北暴雨形成机理研究方面的新进展。

## 5 暴雨预报方法研究

暴雨预报方法, 早期(即在 20 世纪 90 年代之前)主要是基于天气图的预报, 利用从地面到高空的天气图来识别槽脊、锋面、切变线、低涡等天气尺度的天气系统。在此基础上, 再根据气温、水汽等各方面条件预报未来 24 小时甚至再长一点时间的暴雨落区及雨量。当时的苏联气象学家发展了平

流动力理论, 即利用平流外推的办法来判别未来暴雨事件的发生。到了 1990 年代, 数值模式的发展使得模式预报取得极大进步, 天气图方法基本由数值预报方法所代替, 即利用数值模式来动力预报未来 24 小时甚至更长时间的暴雨, 包括暴雨落区、强度及移向等。数值预报的发展为暴雨预报的准确率提高带来了希望, 所以, 有一时期, 预报员中传说着大的天气形势场看欧洲中心的数值预报结果就够了, 降水预报看日本的预报结果就可以了, 这反映了数值预报无论对形势场预报或对降水预报都达到相当准确的程度, 为预报员报好天气预报带来了信心。尽管数值模式预报对系统性降水及暴雨预报有了很大的提高, 但由于暴雨的突发性、局地性及成因复杂, 所以暴雨预报的准确率与实际需要仍差距甚远。这就迫使气象学家及气象工作者在数值预报及天气图预报的基础上再寻找一些别的可行的方法。如“点聚图”方法, 用温压湿风这些气象要素做成点聚图, 若在点聚图上出现有利于暴雨发生的条件及因素就可以预报暴雨的出现, 这在单站使用比较方便, 所以很多县市气象局也常用这种方法进行暴雨预报。在 1980 年代, 由于人工智能的兴起与发展, 气象学者提出人工智能的 MOS 方法即在数值统计的前提下进行人工智能暴雨预报, 并结合神经网络甚至模糊数学等方法进行暴雨预报。早在 1970 年代开始, 王宗皓和李麦村(1974)提出利用数值统计与对策论相结合进行定时定量预报降水并在全国推广。在同一时间, 全国有相当多台站充分利用天气图, 对天气形势进行分型找相似型进行暴雨预报, 而且这种方法至今还在适用。本世纪初, 国外的“配料法”又在国内得到推广, 张小玲等(2010)发展了基于“配料”的暴雨预报方法, 即根据气象配料及冷暖气流和水汽条件等, 找出对暴雨发生的有利区域从而进行暴雨预报。

近年来的暴雨预报进展主要还体现在数值预报对暴雨的预报方面。随着大型计算机和并行计算理论的发展, 国内外的数值模式正在向全球化、精细化发展, 以适应多尺度、多目的应用要求, 模糊了大气环流模式和中尺度数值模式的界限, 其主要手段就是通过改进模式动力框架、离散化技术和计算方法、发展普适性的物理过程、资料同化方法和集合预报等实现(彭新东和李兴良, 2010)。与模式发展相对应的暴雨数值模拟预报的各个方面也得到了很大发展, 尤其是在各种新型观测资料的反

演和资料同化及集合预报方面。其中, 新型观测资料, 如地基 GNSS 大气水汽观测, 地基微波辐射计云水、温度和湿度观测, 风廓线雷达, 双偏振雷达云水粒子相态观测, 毫米波雷达云观测以及新一代天气雷达资料和卫星观测获得的非常规探测资料, 在我国暴雨机理分析和中尺度暴雨数值预报中得到了极大应用(万蓉, 2014), 国内的数值模式进展主要体现在 GRAPES 模式上, 国内的开发团队在引进和学习美国国家环境中心(NCEP)三维变分方法的基础上, 自主发展了 GRAPES 的三维变分系统并正在发展自主 GRAPES 的四维变分系统。在资料同化应用方面, 卫星资料同化进展显著, 分析认为在暴雨预报业务和科研中, 云迹风资料的同化使用可有效地改善高空风场分布, 改善高空风场质量, 修正控制试验中模式高空风场对中纬度高空西风急流前沿西风强度的描述, 使得模拟的暴雨强度与实际降水分布更加接近(周兵等, 2002), 云迹风资料同化对提高降水预报质量是一个有效途径, 值得进一步尝试(彭新东和李兴良, 2010)。目前, 以精细化预报服务需求为驱动力, 在数值预报技术持续进步和卫星资料同化应用快速发展等国际态势引领下, 国家级和区域中心数值预报业务与研发取得了明显进步, GRAPES\_MESO 全国区域中尺度数值预报子系统首先实现业务运行, 且技巧也在稳步提升(闻之辉等, 2010), 目前, GRAPES\_MESO 的模式水平分辨率和垂直层数已提高到 10 km 和 50 层, 非常规观测资料在区域模式中同化应用问题得以突破。同时, GRAPES\_GFS 全球数值预报研发成效显著且于 2015 年实现业务化, 业务上使用的卫星资料数量占比达到了 62%, 数据产品进入国家气象中心 micaps4 平台供预报员参考(中国气象局, 2016)<sup>①</sup>。

暴雨数值预报的另外一个进展还体现在集合预报方面。集合预报思想由 Epstein(1969)和 Leith (1974)最先提出, 在 20 世纪 70~80 年代主要集中于理论研究和数值试验; 进入 90 年代后, 随着计算机并行技术的发展, 1992 年集合预报系统在美国 NCEP 和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)投入业务运行后, 集合预报已越来越广泛应用于日常天气预报业务(杜钧, 2002; 李泽椿和陈德辉, 2002; 王晨稀和端义宏, 2003; 王晨稀等, 2007; 陈超辉

等, 2009; 张立凤和罗雨, 2009; 邓国等, 2010; 闻之辉等, 2010; 郝世峰等, 2011; 王晨稀, 2013)。江志红等(2009)考察政府间气候变化专门委员会第 4 次评估报告的 7 个全球模式及 5 个集合预报模式对极端降水指数的模拟能力后指出, 全球模式能较好地模拟极端降水指数气候场空间分布, 且集合预报能力优于大部分单个模式, 目前, 集合预报相关研究已深入到模式的初值扰动、多物理过程、多模式多分析初值的超级集合预报和混合集合等方面(毛恒青和王建捷, 2000; 陈静等, 2002), 如: 陈静等(2003)在研究非绝热物理过程对中国暴雨动力和热力场预报影响的基础上, 分析了对流参数化方案在中尺度暴雨预报中的作用, 讨论了利用模式扰动方法开展中国暴雨集合预报的可行性。刘琳等(2013)基于集合预报方法进行的中国极端降水预报的结果表明, 充分利用集合降水累积概率密度分布的尾端信息, 可为极端强降水提供科学合理的预报。Huang and Luo (2017)还利用美国、欧洲中心、日本、中国和韩国等不同国家的集合预报系统的输出资料评估了华南前汛期降水的定量预报, 指出强降水区上游的低空急流输送的暖湿空气是定量降水预报的关键因子, 局地强降水预报比持续性强降水预报具有更大的挑战。

自 2002 年以来, 在科技部奥运项目“北京夏季异常天气应急措施”的支持下, 高守亭及其团队进行了暴雨机理和预报方法的研究及技术研发。其基本思想是充分利用数值模式预报比较成功的预报产品, 如温、压、湿、风等产品, 并根据暴雨形成过程所需的动力、热力及水汽条件, 组合形成具有明确物理意义的动力物理量(称为动力因子), 并用多动力因子进行集合, 称为集合动力因子暴雨预报方法(Gao and Cao, 2007; Gao and Ran, 2009)。这种方法与数值预报在思路上有所差别, 数值预报在格点上用云微物理参数方案, 在次网格上用积云参数化方案预报降水, 主要体现了暴雨过程中的云微物理过程和积云参数化过程, 对动力过程体现不够充分。集合动力因子暴雨预报方法, 主要是体现大气的非均匀饱和性、波动性、平流作用以及强的上升运动。这些主要由大气的热动力过程及水汽相变特征所决定, 在暴雨落区预报方面优势明显。这种预报思路虽然与数值预报有所不同, 但动力因子

① 中国气象局. 2016. 数值天气预报发展规划. China Meteorological Administration. 2016. Development Plan of Numerical Weather Forecast.

的构建仍需利用数值模式预报的温压湿风等产品,所以集合动力因子预报方法实质上是数值预报产品的动力释用技术。在诸多动力因子中,最值得提及的是四个动力因子,一是对流涡度矢量(赵宇和高守亭, 2008; 高守亭等, 2013; 冉令坤等, 2013), 表达式为  $\vec{\xi} \wedge \nabla \theta_e$  ( $\vec{\xi}$  为涡度) 来指示暴雨落区, 因为在特大暴雨过程中, 湿等熵面  $\theta_e$  是垂直分布的, 其相应的梯度  $\nabla \theta_e$  是指向水平方向, 而在强暴雨过程中, 垂直涡度是最主要的, 多为一个强旋转系统, 所以有  $\vec{\xi} \wedge \nabla \theta_e = \left| \vec{\xi} \right| \left| \nabla \theta_e \right| \cos \theta = \left| \vec{\xi} \right| \left| \nabla \theta_e \right|$  是一个明显的大值, 因此, 利用对流涡度矢量可以判别特大暴雨的落区。二是湿热力平流动力因子 (Wu et al., 2011), 其定义为  $(-\vec{v} \cdot \nabla \theta) \cdot \nabla \theta^*$ , 能反映冷暖平流和湿热力梯度的共同作用, 可为雨季冷暖交汇的暴雨落区预报提供较为准确的判据依据。湿热力平流动力因子在贵州省的实际应用中, 在 5、6 月份, 对暴雨落区的预报成功率可达 70% 左右。第三个动力因子, 是波作用密度 (冉令坤等, 2013; Ran et al. 2014; Ran and Ping, 2015), 定义为  $\omega_e \cdot \nabla \theta_e^*$ , 其中,  $\omega_e$  是垂直运动的扰动量,  $\theta_e^*$  是广义湿位温的扰动量。在盛夏, 特别是在副高边缘, 冷空气影响已经很小, 暴雨仍经常发生, 但一般局地性较大, 这种副高边缘的局地性暴雨一般很难预报, 波作用密度动力因子能反映偏离大气平均态的波动效应, 暴雨区的垂直运动、温度场、湿度场及风场等要素都会明显偏离平均态, 能反映其波动特征, 所以利用该动力因子可以做夏季局地化的暴雨预报。第四个扰动因子是二阶湿位涡 (Gao et al., 2014; Li et al., 2016a), 其定义为  $\vec{\xi} \cdot \nabla \theta / \rho$  ( $\theta$  为位温,  $\rho$  为空气密度), 这时因为它是一个守恒量, 在下暴雨过程中, 暖湿空气从大气低层上升到大气中高层, 会把低值湿位涡的空气质点带到中高层, 而下雨过程中, 大气高层的高湿位涡质点又会随雨而下滑到大气中低层, 这样以来在暴雨区前后左右就会形成明显的湿位涡梯度, 而二阶湿位涡恰恰反映了这种梯度效应, 所以用二阶湿位涡去预报或诊断暴雨落区十分有效 (Gao et al., 2014; Li et al., 2016a)。除了以上介绍的动力因子外, 还有很多动力因子, 如: 广义湿位涡 (周玉淑, 2009; Zhou et al., 2009)、位势力管涡度 (Ran et al., 2013)、位势散度波作用密度 (冉令坤等, 2013) 和位势变形 (Li et al., 2016b) 等多动力因子, 分别从不同的角度反映暴雨落区, 并根据不同动力因子所能反映的动热

力过程, 对不同动力因子取不同权重后, 通过 MOS 方法建立了基于集合动力因子的 MOS 预报系统进行暴雨预报 (冉令坤等, 2011, 2014; 高守亭等, 2013)。总体来讲, 集合动力因子暴雨预报方法在模式预报基础上对数值预报结果进行动热力释用, 能对模式降水的预报做出相应的订正, 在暴雨落区预报方面优势明显, 已在国内多家台站得到了推广应用。

## 6 小结和讨论

本文主要回顾了近年来我国在华南前汛期暴雨、江淮梅雨锋暴雨及华北东北暴雨的研究和暴雨预报方法和理论方面的进展, 水平所限, 难免疏漏。目前, 我国的暴雨研究和预报在观测资料的获取和应用 (万蓉, 2014)、暴雨机理研究和预报理论方法建立以及数值模式发展等多方面都已经取得了长足进步, 但是也还存在不少问题, 如观测资料的质量控制、多源资料综合应用还存在不足, 模式物理过程的准确描述和动力框架的协调性能还不足于反应实际暴雨系统发展的动热力过程, 难以实现对暴雨预报的精细化、定点、定量和无缝隙等要求 (闫之辉等, 2010), 对暴雨中尺度系统的精细结构和发展机理的理解也还存在很多难点, 这些都是导致暴雨预报水平提高不快的瓶颈, 需要气象工作者和科研人员持之以恒地不断努力, 尤其是需要加强基于观测的暴雨中尺度系统的结构、发生发展动力过程的理论研究、模式物理过程改进及完善模式动力框架的协调性能, 以期在我国暴雨资料同化、暴雨中尺度系统的三维结构、发生发展机理和预报理论方法研究方面取得更大进步。此外, 目前的人工智能技术已经取得飞速进步且在一些领域得到推广应用, 如何把人工智能技术与大气科学研究和业务相结合以提高暴雨天气预报的准确率, 也是大气科学领域的科研和业务人员面临的迫切任务。

## 参考文献 (References)

- 包澄澜. 1986. 华南前汛期暴雨研究的进展 [J]. 海洋学报, 8 (1): 31-40.  
 Bao Chenglan. 1986. Progress on study of rainstorm in pre-flood season in South China [J]. Acta Oceanol. Sinica (in Chinese), 8 (1): 31-40.  
 贝耐芳, 赵思雄. 2002. 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析 [J]. 大气科学, 26 (4): 526-540. Bei Naifang, Zhao Sixiong. 2002. Mesoscale analysis of severe local heavy rainfall during the second stage of the 1998 Meiyu season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 526-540, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.04.10.



- 陈超辉, 王铁, 谭言科, 等. 2009. 2003 年江淮汛期多模式短期集合预报方法研究 [J]. 热带气象学报, 25 (4): 449–457. Chen Chaohui, Wang Tie, Tan Yanke, et al. 2009. Research of multi-model short-range ensemble forecasting techniques in forecasting rainy season over Changjiang–Huaihe basin in 2003 [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 25 (4): 449–457, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.04.010.
- 陈静, 陈德辉, 颜宏. 2002. 集合数值预报发展与研究进展 [J]. 应用气象学报, 13 (4): 497–507. Chen Jing, Chen Dehui, Yan Hong. 2002. A brief review on the development of ensemble prediction system [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 13 (4): 497–507, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.04.013.
- 陈静, 薛纪善, 颜宏. 2003. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究 [J]. 气象学报, 61 (2): 203–218. Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2003. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (2): 203–218, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2003.02.006.
- 崔春光, 林春泽, 王晓芳, 等. 2014. 2000 年以来我国长江中游区域暴雨研究进展 [J]. 气象科技进展, 4 (2): 6–15. Cui Chunguang, Lin Chunze, Wang Xiaofang, et al. 2014. Review of the study on heavy rain in the middle reaches of the Yangtze River since 2000 [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 4 (2): 6–15, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.001.
- 邓涤菲, 王玉淑, 王东海. 2012. 有限区域分解分析方法在 2006 年一次东北冷涡暴雨分析中的应用 [J]. 地球物理学报, 55 (6): 1852–1866. Deng Difei, Zhou Yushu, Wang Donghai. 2012. The application of wind and water-vapor flux partitioning technique to the structure of a northeast vortex in 2006 [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 55 (6): 1852–1866, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.006.
- 邓国, 龚建东, 邓莲堂, 等. 2010. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验 [J]. 应用气象学报, 21 (5): 513–523. Deng Guo, Gong Jiandong, Deng Liantang, et al. 2010. Development of mesoscale ensemble prediction system at National Meteorological Center [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 21 (5): 513–523, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.05.001.
- 杜钧. 2002. 集合预报的现状和前景 [J]. 应用气象学报, 13 (1): 16–28. Du Jun. 2002. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 13 (1): 16–28, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2002.01.002.
- Epstein E S. 1969. Stochastic dynamic prediction [J]. Tellus, 21(6): 739–759, doi:10.1111/j.2153-3490.1969.tb00483.x.
- Fang J, Wu R S. 1998. Frontogenesis, evolution and the time scale of front formation [J]. Adv. Atmos. Sci., 15(2): 233–246, doi:10.1007/s00376-998-0042-4.
- 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 2011. 梅雨期青藏高原东移对流系统影响江淮流域降水的研究 [J]. 气象学报, 69 (4): 581–600. Fu Shenming, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2011. A study of the impacts of the eastward propagation of convective cloud systems over the Tibetan Plateau on the rainfall of the Yangtze–Huaihe River basin [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (4): 581–600, doi:10.11676/qxxb2011.051.
- 高守亭, 雷霆, 王玉淑, 等. 2002. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析 [J]. 应用气象学报, 13 (6): 662–670. Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu, et al. 2002. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in torrential rain systems [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 13 (6): 662–670, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.06.003.
- 高守亭, 冉令坤, 李娜, 等. 2013. 集合动力因子暴雨预报方法研究 [J]. 暴雨灾害, 32 (4): 289–302. Gao Shouting, Ran Lingkun, Li Na, et al. 2013. The “Ensemble Dynamic Factors” approach to predict rainstorm [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 32 (4): 289–302, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.04.001.
- Gao S T, Cao J. 2007. Physical basis of generalized potential temperature and its application to cyclone tracks in nonuniformly saturated atmosphere [J]. Geophys. Res., 112 (D18): D18101, doi:10.1029/2007JD008701.
- Gao S T, Ran L K. 2009. Diagnosis of wave activity in a heavy-rainfall event [J]. Geophys. Res., 114 (D8): D08119, doi:10.1029/2008JD010172.
- Gao S T, Zhou Y S, Lei T. 2002. Structural features of the Meiyu front system [J]. Acta Meteor. Sinica, 16 (2): 195–204.
- Gao S T, Yang S, Chen B. 2010. Diagnostic analyses of dry intrusion and nonuniformly saturated instability during a rainfall event [J]. J. Geophys. Res., 115 (D2): D02102, doi:10.1029/2009JD012467.
- Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004a. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (12): L12113, doi:10.1029/2003GL019152.
- Gao S T, Zhou Y S, Cui X P, et al. 2004b. Impacts of cloud-induced mass forcing on the development of moist potential vorticity anomaly during torrential rains [J]. Adv. Atmos. Sci., 21 (6): 923–927, doi:10.1007/BF02915594.
- Gao S T, Yang S, Xue M, et al. 2008. Total deformation and its role in heavy precipitation events associated with deformation-dominant flow patterns [J]. Adv. Atmos. Sci., 25 (1): 11–23, doi:10.1007/s00376-008-0011-y.
- Gao S T, Xu P C, Li N, et al. 2014. Second order potential vorticity and its potential applications [J]. Sci. China Earth Sci., 57 (10): 2428–2434, doi:10.1007/s11430-014-4897-1.
- Geng B. 2008. Some statistical characteristics of Meiyu/Baiu frontal depressions [J]. Sola, 4: 137–140, doi:10.2151/sola.2008-035.
- 郝世峰, 潘劲松, 李冲, 等. 2011. 择优法降水集合预报试验的研究 [J]. 热带气象学报, 27 (3): 336–344. Hao Shifeng, Pan Jinsong, Li Chong, et al. 2011. Ensemble prediction experiments on precipitation by using optimization method [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 27 (3): 336–344, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.03.006.
- 何斌, 高坤, 翟国庆. 2003. 野外试验资料在暴雨分析过程中的应用 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 30 (4): 461–465. He Bin, Gao Kun, Zhai Guoqing. 2003. Application of the observation in the field experiment to the analysis of heavy rainfall processes [J]. J. Zhejiang Univ. (Sci. Ed.) (in Chinese), 30 (4): 461–465, doi:10.3321/j.issn:1008-9497.2003.04.025.
- 何立富, 陈涛, 孔期. 2016. 华南暖区暴雨研究进展 [J]. 应用气象学报, 27 (5): 559–569. He Lifu, Chen Tao, Kong Qi. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in south China [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 27 (5): 559–569, doi:10.11898/1001-7313.20160505.
- 胡伯威. 2005. 梅雨锋上 MCS 的发展、传播以及与低层“湿度锋”相关联的 CISK 惯性重力波 [J]. 大气科学, 29 (6): 845–853. Hu Bowei. 2005. Evolution and propagation of MCSs over Meiyu fronts and inertia-gravitational wave-CISK related to “low-level moisture frontal zone” [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6):

- 845–853, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.06.01.
- 胡伯威, 彭广. 1996. 暖切变型江淮梅雨锋结构及其形成和维持机制 [J]. 大气科学, 20 (4): 463–472. Hu Bowei, Peng Guang. 1996. The structure of the warm shear-line type Jianghuai Meiyu front and the mechanism of its formation and maintenance [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20 (4): 463–472, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.04.11.
- 胡伯威, 崔春光, 房春花. 2001. 1998年7月21–22日鄂东沿江连日特大暴雨成因探讨 [J]. 大气科学, 25 (4): 479–491. Hu Bowei, Cui Chunguang, Fang Chunhua. 2001. Causes of a two-day successively extremely heavy rain along the Changjiang valley in the eastern Hubei Province during 21–22 July 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 479–491, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.04.05.
- 吴正华, 华北暴雨组. 1992. 华北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 182pp. Wu Zhenghua, Group of Torrential Rain in North China. 1992. The Torrential Rain in North China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 182pp.
- 黄士松. 1986. 华南前汛期暴雨 [M]. 广州: 广东科技出版社, 9–10. Huang Shisong. 1986. Rainstorm During Prerainy Season in South China (in Chinese) [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 9–10.
- Huang L, Luo Y L. 2017. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for south China during the presummer rainy season [J]. J. Geophys. Res., 122 (16): 8494–8516, doi:10.1002/2017JD026512.
- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 2009. 7个IPCC AR4模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. 大气科学, 33 (1): 109–120. Jiang Zhihong, Chen Weilin, Song Jie, et al. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 109–120, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.10.
- Jiang Z N, Zhang D L, Xia R D, et al. 2017. Diurnal variations of presummer rainfall over southern China [J]. J. Climate, 30 (2): 755–773, doi:10.1175/JCLI-D-15-0666.1.
- Kuo Y H, Chen G T J. 1990. The Taiwan Area Mesoscale Experiment (TAMEX): An overview [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 71 (4): 488–503, doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0488:TTAMEA>2.0.CO;2.
- Leith C S. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts [J]. Mon. Wea. Rev., 102 (6): 409–418, doi:10.1175/1520-0493(1974)102<0409:TSOMCF>2.0.CO;2.
- 李泽椿, 陈德辉. 2002. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用 [J]. 应用气象学报, 13 (1): 1–15. Li Zechun, Chen Dehui. 2002. The development and application of the operational ensemble prediction system at National Meteorological Center [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 13 (1): 1–15, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.01.001.
- 李柏, 周玉淑, 张沛源. 2007. 新一代天气雷达资料在2003年淮河流域暴雨模拟中的初步应用: 模拟降水和风场的对比 [J]. 大气科学, 31 (5): 826–838. Li Bai, Zhou Yushu, Zhang Peiyuan. 2007. Application of the China new generation weather radar data to the torrential rain simulation over the Yangtze–Huaihe River basin in 2003: Contrast of precipitation and wind [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 826–838, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.07.
- 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 Meteor. Sinica (in Chinese), 71 (4): 593–605, doi:10.11676/qxxb2013.065.
- Li N, Gao S T, Ran L K. 2016a. A PV-gradient related quantity in moist atmosphere and its application in the diagnosis of heavy precipitation [J]. Atmos. Res., 167: 285–297, doi:10.1016/j.atmosres.2015.08.009.
- Li N, Ran L K, Gao S T. 2016b. The impact of deformation on vortex development in a baroclinic moist atmosphere [J]. Adv. Atmos. Sci., 33 (2): 233–246, doi:10.1007/s00376-015-5082-y.
- 刘黎平, 阮征, 覃丹宇. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨过程的中尺度结构个例分析 [J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 34 (12): 1193–1201. Liu Liping, Ruan Zheng, Qin Danyu. 2005. Case studies on mesoscale structures of heavy rainfall system in the Yangtze River generated by Meiyu front [J]. Sci. China Ser. D Earth Sci, 48 (8): 1303–1311, doi:10.1360/03yd0319.
- 刘琳, 陈静, 程龙, 等. 2013. 基于集合预报的中国极端强降水预报方法研究 [J]. 气象学报, 71 (5): 853–866. Liu Lin, Chen Jing, Cheng Long, et al. 2013. Study of the ensemble-based forecast of extremely heavy rainfalls in China: Experiments for July 2011 cases [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 71 (5): 853–866, doi:10.11676/qxxb2013.044.
- 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.
- Liu L, Ran L K, Gao S T. 2018. Analysis of the characteristics of inertia-gravity waves during an orographic precipitation event [J]. Adv. Atmos. Sci, 35 (5): 604–620, doi:10.1007/s00376-017-7159-2.
- 陆汉城, 吕梅. 1997. 梅雨锋及锋上气旋发展的副热带特征 [J]. 暴雨: 灾害, (1): 71–78. Lu Hancheng, Lü Mei. 1997. Subtropical character of Meiyu front and development of cyclone on the front [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), (1): 71–78.
- Luo Y L, Chen Y R X. 2015. Investigation of the predictability and physical mechanisms of an extreme-rainfall-producing mesoscale convective system along the Meiyu front in East China: An ensemble approach [J]. J. Geophys. Res., 120 (20): 10593–10618, doi:10.1002/2015JD023584.
- 毛恒青, 王建捷. 2000. 集合预报业务使用现状和趋势 [J]. 气象, 26 (6): 26–30. Mao Hengqing, Wang Jianjie. 2000. The operational use of ensemble prediction products and its future [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 26 (6): 26–30.
- 蒙伟光, 张艳霞, 戴光丰, 等. 2007. 华南沿海一次暴雨中尺度对流系统的形成和发展过程 [J]. 热带气象学报, 23 (6): 521–530. Meng Weiguang, Zhang Yanxia, Dai Guangfeng, et al. 2007. The formation and development of a heavy rainfall mesoscale convective system along southern China coastal area [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 23 (6): 521–530, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.06.001.
- 倪允琪, 周秀骥, 张人禾, 等. 2006. 我国南方暴雨的试验与研究 [J].

- 应用气象学报, 17 (6): 690–704. Ni Yunqi, Zhou Xiuji, Zhang Renhe, et al. 2006. Experiments and studies for heavy rainfall in southern China [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 17 (6): 690–704, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.06.007.
- 彭新东, 李兴良. 2010. 多尺度大气数值预报的技术进展 [J]. 应用气象学报, 21 (2): 129–138. Peng Xindong, Li Xingliang. 2010. Advances in the numerical method and technology of multi-scale numerical prediction [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 21 (2): 129–138, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.02.001.
- 平凡, 唐细坝, 高守亭, 等. 2014. 长江和淮河流域汛期洪涝大气环流特征的比较 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (4): 766–782. Ping Fan, Tang Xiba, Gao Shouting, et al. 2014. A comparative study of the atmospheric circulations associated with rainy-season floods between the Yangtze–Huaihe River basin [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 57 (7): 1464–1479, doi:10.1007/s11430-013-4802-3.
- 冉令坤, 周玉淑, 杨文霞. 2011. 强对流降水过程动力因子分析和预报研究 [J]. 物理学报, 60 (9): 099201. Ran Lingkun, Zhou Yushu, Yang Wenxia. 2011. Analysis and forecasting of heavy-rainfall event by strong convection [J]. *Acta Phys. Sinica* (in Chinese), 60 (9): 099201.
- 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.
- 冉令坤, 刘璐, 李娜, 等. 2013. 台风暴雨过程中位势散度波作用密度分析和预报应用研究 [J]. 地球物理学报, 56 (10): 3285–3301. Ran Lingkun, Liu Lu, Li Na, et al. 2013. The analysis of the potential-divergence wave activity density and its application to typhoon precipitation [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56 (10): 3285–3301, doi:10.6038/cjg20131006.
- Ran L K, Ping F. 2015. A pseudoenergy wave-activity relation for ageostrophic and non-hydrostatic moist atmosphere [J]. *Chin. Phys. B*, 24 (5): 059201, doi:10.1088/1674-1056/24/5/059201.
- Ran L K, Chen C S. 2016. Diagnosis of the forcing of inertial-gravity waves in a severe convection system [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33 (11): 1271–1284, doi:10.1007/s00376-016-5292-y.
- Ran L K, Li N, Gao S T. 2013. PV-based diagnostic quantities of heavy precipitation: Solenoidal vorticity and potential solenoidal vorticity [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (18): 10506, doi:10.1002/jgrd.50756.
- Ran L K, Hao S C, Qi Y B. 2014. Analysis of pseudomomentum wave-activity density in a heavy rainfall event in East China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 7(1): 42–48, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0055.
- 沈杭锋, 翟国庆, 尹金方, 等. 2013. 长江下游梅汛期尺度涡旋特征分析 [J]. 大气科学, 37 (4): 923–932. Shen Hangfeng, Zhai Guoqing, Yin Jinfang, et al. 2013. Feature analysis of mesoscale vortex over lower reaches of Yangtze River during Meiyu period [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (4): 923–932, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12075.
- 孙继松. 2005. 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. 2005. 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.
- 孙晶. 2011. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统研究若干进展 [J]. 气象科技, 39 (3): 257–265. Sun Jing. 2011. Advances in researches on meso-scale convective systems related to Meiyu heavy rainfall [J]. *Meteor. Sci. Technol.* (in Chinese), 39 (3): 257–265, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2011.03.001.
- 孙继松, 杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的  $\beta$  中尺度暴雨 [J]. 大气科学, 32 (6): 1352–1364. Sun Jisong, Yang Bo. 2008. Meso- $\beta$  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.
- 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. 2007. 梅雨期暴雨个例模拟及其中小尺度结构特征分析研究 [J]. 大气科学, 31 (1): 1–18. Sun Jing, Lou Xiaofeng, Hu Zhijin, et al. 2007. A numerical simulation on torrential rain during the Meiyu period and analysis of mesoscale and microscale structure of convective systems [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (1): 1–18, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.01.
- 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. Sun Jisong, He Na, Wang Guorong, et al. 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolution and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 31 (3): 218–225.
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2004. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究 [J]. 大气科学, 28 (5): 675–691. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (5): 675–691, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.05.03.
- Sun J H, Zhang F Q. 2012. Impacts of mountain–plains solenoid on diurnal variations of rainfalls along the Meiyu front over the East China Plains [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (2): 379–397, doi:10.1175/MWR-D-11-00041.1.
- 许小峰, 孙照渤. 2003. 非地转平衡流激发的重力惯性波对梅雨锋暴雨影响的动力学研究 [J]. 气象学报, 61 (6): 655–660. Xu Xiaofeng, Sun Zhaobo. 2003. Dynamic study on influence of gravity wave induced by unbalanced flow on Meiyu front heavy rain [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 61 (6): 655–660, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.06.002.
- 谈哲敏, 伍荣生. 2000a. 地形上空边界层流中低层锋面结构的理论研究. I: 冷锋、均匀地转流 [J]. 气象学报, 58 (2): 137–150. Tan Zhemin, Wu Rongsheng. 2000a. A theoretical study of low-level frontal structure in the boundary layer over orography. Part I: Cold front and uniform geostrophic flow [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 58 (2): 137–150, doi:10.11676/qxxb2000.015.
- 谈哲敏, 伍荣生. 2000b. 地形上空边界层流中低层锋面结构的理论研究. II: 暖锋、均匀地转流 [J]. 气象学报, 58 (3): 265–277. Tan Zhemin, Wu Rongsheng. 2000b. A theoretical study of low-level frontal structure in the boundary layer over orography. Part II: Warm front and uniform geostrophic flow [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 58 (3): 265–277, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.03.002.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyan.

1980. Heavy Rain in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- 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 Zuyu. 1980. The structure and formation of the moist jet stream [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 38 (4): 331–340, doi:10.11676/qxxb1980.039.
- 陶祖钰, 葛国庆, 郑永光, 等. 2004. 2004年7月北京和上海两次重大气象事件的异同及其科学问题 [J]. 气象学报, 62 (6): 882–887. Tao Zuyu, Ge Guoqing, Zheng Yongguang, et al. 2004. Similarities and differences between two disastrous weather events occurred in Beijing and Shanghai July 2004 and the aroused scientific problems [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 62 (6): 882–887, doi:10.11676/qxxb2004.085.
- 万蓉. 2014. 我国暴雨研究中新型探测资料反演技术及其应用 [J]. 气象科技进展, 4 (2): 24–35. Wan Rong. 2014. Research progress of the unconventional observing technology and the data used in the study of rainstorm in China [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 4 (2): 24–35, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.003.
- 王晨稀. 2013. 热带气旋集合预报研究进展 [J]. 热带气象学报, 29 (4): 698–704. Wang Chenxi. 2013. Advances in tropical cyclone ensemble prediction [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 29 (4): 698–704, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.04.020.
- 王晨稀, 端义宏. 2003. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究 [J]. 应用气象学报, 14 (1): 69–78. Wang Chenxi, Duan Yihong. 2003. Experiment and research of short-range ensemble forecasting techniques in forecasting Meiyu precipitation [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 14 (1): 69–78, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.01.008.
- 王晨稀, 姚建群, 梁旭东. 2007. 上海区域降水集合预报系统的建立与运行结果的检验 [J]. 应用气象学报, 18 (2): 173–180. Wang Chenxi, Yao Jianqun, Liang Xudong. 2007. The establishment and verification of the operational ensemble forecast system for Shanghai regional precipitation [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 18 (2): 173–180, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.02.006.
- 王东海, 钟水新, 刘英, 等. 2007. 东北暴雨的研究 [J]. 地球科学进展, 22 (6): 549–560. Wang Donghai, Zhong Shuixin, Liu Ying, et al. 2007. Advances in the study of rainstorm in Northeast China [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 22 (6): 549–560, doi:10.3321/j.issn.1001-8166.2007.06.001.
- 王东海, 杨帅, 钟水新, 等. 2009. 切变风螺旋度和热成风螺旋度在东北冷涡暴雨中的应用 [J]. 大气科学, 33 (6): 1238–1246. Wang Donghai, Yang Shuai, Zhong Shuixin, et al. 2009. The application of shearing wind helicity and thermal wind helicity in northeastern cold vortex rainfall event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1238–1246, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.10.
- Wang D H, Yang S. 2010. An atmospheric dry intrusion parameter and its application [J]. Acta Meteor. Sinica, 24 (4): 492–500.
- Wang H, Luo Y L, Jou B J D. 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX: Observational analysis [J]. J. Geophys. Res., 119 (23): 13206–13232, doi:10.1002/2014JD022339.
- 王宗皓, 李麦村. 1974. 天气预报中的概率统计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 206pp. Wang Zonghao, Li Maicun. 1974. Probability Statistics in Weather Forecasting (in Chinese) [M]. Beijing: Sciences Press, 206pp.
- 王建捷, 李泽椿. 2002. 1998年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析 [J]. 气象学报, 60 (2): 146–155. Wang Jianjie, Li Zechun. 2002. Numerical simulation and diagnostic analysis on mesoscale convective systems of a torrential rain case in Meiyu period of 1998 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 60 (2): 146–155, doi:10.11676/qxxb2002.018.
- 王晓芳, 崔春光, 胡伯威. 2007. 与水平风切变强度不均匀相联系的 CISK 惯性重力波 [J]. 应用气象学报, 18 (6): 760–768. Wang Xiaofang, Cui Chunguang, Hu Bowei. 2007. CISK inertia-gravitational wave related to horizontal wind shear intensity nonhomogeneous [J]. J. Appl. Meteor. Sci., 18 (6): 760–768, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.06.004.
- 王立琨, 郑永光, 王洪庆, 等. 2001. 华南暴雨试验过程的环境场和云团特征的初步分析 [J]. 气象学报, 59 (1): 115–119. Wang Likun, Zheng Yongguang, Wang Hongqing, et al. 2001. Preliminary analysis of environment and cloud clusters during Huanan rainstorm experiment [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 59 (1): 115–119, doi:10.11676/qxxb2001.013.
- 王璐璐, 孙建华, 陈潇潇, 等. 2015. 梅雨期一次线状对流系统的结构特征研究 [J]. 热带气象学报, 31 (6): 766–781. Wang Lulu, Sun Jianhua, Chen Xiaoxiao, et al. 2015. The structural characteristics of convective lines of Meiyu front [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 31 (6): 766–781, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.06.005.
- 伍荣生. 2002. 梅雨锋生与锋面对流 [C]// 大气科学发展战略——中国气象学会第25次全国会员代表大会暨学术年会论文集. 北京: 中国气象学会. Wu Rongsheng. 2002. Meiyu frontogenesis and accompanying convections [C]// Proceedings of the 25th National Congress of Chinese Meteorological Society and Academic Annual Meeting—Strategy of Atmospheric Science Development (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.
- Wu X D, Ran L K, Chu Y L. 2011. Diagnosis of a moist thermodynamic advection parameter in heavy-rainfall events [J]. Adv. Atmos. Sci., 28 (4): 957–972, doi:10.1007/s00376-009-9057-8.
- 许长义, 林永辉, 管兆勇. 2012. 梅雨锋上两类中尺度对流系统形成的边界层特征 [J]. 大气科学学报, 35 (1): 51–63. Xu Changyi, Lin Yonghui, Guan Zhaoyong. 2012. The boundary layer characteristics of two types of mesoscale convective systems along a Meiyu front [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 35 (1): 51–63, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2012.01.006.
- 薛纪善. 1999. 1994年华南夏季特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–185. Xue Jishan. 1999. A Study on the Summer Heavy Rainfall in South of China in 1994 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–185.
- 闫之辉, 王雨, 朱国富. 2010. 国家气象中心业务数值预报发展的回顾与展望 [J]. 气象, 36 (7): 26–32. Yan Zhihui, Wang Yu, Zhu Guofu. 2010. The review and outlook on the development of operational NWP in NMC [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36 (7): 26–32.
- 杨帅, 高守亭, 王东海. 2007. 湿饱和流中的 Richardson 数和不稳定的研究. 地球物理学报, 50 (2): 376–386. Yang Shuai, Gao Shouting, Wang Donghai. 2007. A study of Richardson number and instability in moist saturated flow [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 50 (2): 377–386, doi:10.3321/j.issn.0001-5733.2007.02.007.
- Yang S, Gao S T. 2006. Modified Richardson number in non-uniform

- saturated moist flow [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 23 (11): 3003–3006, doi:10.1088/0256-307X/23/11/033.
- Yang S, Gao S T, Wang D H. 2007a. A study of Richardson number and instability in moist saturated flow [J]. *Chinese J. Geophys.*, 50 (2): 365–375, doi:10.1002/cjg2.1044.
- Yang S, Gao S T, Wang D H. 2007b. Diagnostic analyses of the ageostrophic  $\bar{Q}$  vector in the non-uniformly saturated, frictionless, and moist adiabatic flow [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D9): D09114, doi:10.1029/2006JD008142.
- Yang S, Wang D H. 2008. The curl of  $\bar{Q}$  vector: A new diagnostic parameter associated with heavy rainfall [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 1 (1): 36–39.
- Yang S, Cui X P, Ran L K. 2009. Analyses of dry intrusion and instability during a heavy rainfall event that occurred in northern China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 2 (2): 108–112, doi:10.1080/16742834.2009.11446779.
- Yang S, Gao S T, Lu C G. 2014. A generalized frontogenesis function and its application [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31 (5): 1065–1078, doi:10.1007/s00376-014-3228-y.
- Yang S, Gao S T, Lu C G. 2015. Investigation of the Meiyu front using a new deformation frontogenesis function [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32 (5): 635–647, doi:10.1007/s00376-014-4147-7.
- Yang S, Zuo Q J, Gao S T. 2017. Revisit to frozen-in property of vorticity [J]. *Chin. Phys. B*, 26 (8): 089201, doi:10.1088/1674-1056/26/8/089201.
- 杨舒楠, 路屹雄, 于超. 2017. 一次梅雨锋暴雨的中尺度对流系统及低层风场影响分析 [J]. *气象*, 43 (1): 21–33. Yang Shunan, Lu Yixiong, Yu Chao. 2017. Analysis on mesoscale convective system and impact of low-level wind in a Meiyu heavy rainfall event [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 43 (1): 21–33, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.01.003.
- 姚秀萍, 孙建元, 马嘉理. 2017. 江淮切变线研究的回顾与展望 [J]. *高原气象*, 36 (4): 1138–1151. Yao Xiuping, Sun Jianyuan, Ma Jiali. 2017. Advances on research of Yangtze–Huaihe shear line [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 36 (4): 1138–1151, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00015.
- 易军, 寿绍文, 张庆奎. 2015. 一次梅雨锋暴雨过程中的重力波特征 [J]. *干旱气象*, 33 (6): 918–925. Yi Jun, Shou Shaowen, Zhang Qingkui. 2015. Characteristics of gravity wave of a Meiyu front heavy rainfall from 7 to 9 July 2007 [J]. *J. Arid Meteor.* (in Chinese), 33 (6): 918–925, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-06-0918.
- 翟国庆, 王智, 何斌. 2003. 长江中下游梅雨期中小尺度涡旋族发生演变分析 [J]. *气象学报*, 61 (6): 661–672. Zhai Guoqing, Wang Zhi, He Bin. 2003. Formation and evolution analysis of the mesoscale vortex group in the middle and lower reaches during Meiyu of the Yangtze River [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 61 (6): 661–672, doi:10.11676/qxxb2003.067.
- 郑婧, 孙素琴, 许爱华, 等. 2015. 强锋区结构的梅雨锋短时暴雨形成和维持机制 [J]. *高原气象*, 34 (4): 1084–1094. Zheng Jing, Sun Suqin, Xu Aihua, et al. 2015. Mechanism of formation and maintenance for a torrential rain on strong Meiyu front [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 34 (4): 1084–1094, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00019.
- 张丙辰. 1990. 长江中下游梅雨锋暴雨的研究 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang Bingchen. 1990. A Study of Meiyu Front Torrential Rain over Yangtze River Basin (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 张立凤, 罗雨. 2009. 基于 BGM 的暴雨集合预报初始扰动发展分析 [J]. *热带气象学报*, 25 (5): 571–575. Zhang Lifeng, Luo Yu. 2009. Study on the evolution of initial errors in ensemble forecast of heavy rains based on BGM [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 25 (5): 571–575, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.05.007.
- 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 2004. 梅雨锋上的三类暴雨 [J]. *大气科学*, 28 (2): 187–205. Zhang Xiaoling, Tao Shiyuan, Zhang Shunli. 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (2): 187–205, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.02.03.
- 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 2010. 基于“配料”的暴雨预报 [J]. *大气科学*, 34 (4): 754–766. Zhang Xiaoling, Tao Shiyuan, Sun Jianhua. 2010. Ingredients-based heavy rainfall forecasting [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (4): 754–766, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.08.
- 张家国, 黄小彦, 周金莲, 等. 2013. 一次梅雨锋上中尺度气旋波引发的特大暴雨过程分析 [J]. *气象学报*, 71 (2): 228–238. Zhang Jianguo, Huang Xiaoyan, Zhou Jinlian, et al. 2013. Analysis of an excessive rainstorm event initiated by a mesoscale cyclonic wave along the Meiyu front [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 71 (2): 228–238, doi:10.11676/qxxb2013.027.
- Zhang R H, Ni Y Q, Liu L P, et al. 2011. South China Heavy Rainfall Experiments (SCHeREX) [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89A: 153–166, doi:10.2151/jmsj.2011-A10.
- 周玉淑. 2009. 广义湿位涡在江淮流域暴雨分析和预报中的应用 [J]. *大气科学*, 33 (5): 1101–1110. Zhou Yushu. 2009. Application of generalized moist potential vorticity to analysis and forecast of the torrential rain over the Changjiang–Huaihe River basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (5): 1101–1110, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.19.
- 赵思雄. 2011. 近年来江淮流域致洪暴雨特征分析 [J]. *气象与减灾研究*, 34 (1): 1–5. Zhao Sixiong. 2011. Characteristics analysis of flood-causing rainstorms over Changjiang–Huaihe River basin in recent years [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research* (in Chinese), 34 (1): 1–5, doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2011.01.001.
- 赵玉春. 2011. 梅雨锋对引发暴雨的中尺度对流系统发生发展影响的研究 [J]. *大气科学*, 35 (1): 81–94. Zhao Yuchun. 2011. Impacts of Meiyu front upon the initiation and development of mesoscale convection systems producing rainstorms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (1): 81–94, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.07.
- 赵玉春, 王叶红. 2009. 近 30 年华南前汛期暴雨研究概述 [J]. *暴雨灾害*, 28 (3): 193–202, 208. Zhao Yuchun, Wang Yehong. 2009. A review of studies on torrential rain during pre-summer flood season in South China since the 1980's [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 28 (3): 193–202, 208, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2009.03.001.
- 赵思雄, 孙建华. 2013. 近年来灾害天气机理和预测研究的进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 297–312. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2013. Study on mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 297–312, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12317.
- 赵宇, 高守亭. 2008. 对流涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究 [J].

- 大气科学, 32 (3): 444–456. Zhao Yu, Gao Shouting. 2008. Application of the convective vorticity vector to the analysis of a rainstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 444–456, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.03.
- 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 Yu, Cui Xiaopeng, Gao Shouting. 2011. A study of structure of mesoscale systems producing a heavy rainfall event in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 945–962, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.05.14.
- 赵宇, 裴昌春, 杨成芳. 2017. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统触发和组织化的观测分析 [J]. 气象学报, 75 (5): 700–716. Zhao Yu, Pei Changchun, Yang Chengfang. 2017. Observational analysis of initiation and organization of meso-scale convective systems in a heavy rainfall event associated with Meiyu front [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75 (5): 700–716, doi:10.11676/qxxb2017.051.
- 周玉淑, 李柏. 2010. 2003 年 7 月 8–9 日江淮流域暴雨过程中涡旋的结构特征分析. 大气科学, 34 (3): 629–639. Zhou Yushu, Li Bai. 2010. Structural analyses of vortex causing torrential rain over the Changjiang–Huaihe River basin during 8 and 9 July 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 629–639, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.14.
- 周玉淑, 邓国, 黄仪虹. 2003. 长江流域一次暴雨过程中的不稳定条件分析 [J]. 气象学报, 61 (3): 323–333. Zhou Yushu, Deng Guo, Huang Yihong. 2003. Analysis on instability condition during a torrential rain over Yangtze River basin [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (3): 323–333, doi:10.11676/qxxb2003.031.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 29 (2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 195–204, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.02.04.
- 周兵, 徐海明, 吴国雄, 等. 2002. 云迹风资料同化对暴雨预报影响的数值模拟 [J]. 气象学报, 60 (3): 309–317. Zhou Bing, Xu Haiming, Wu Guoxiong, et al. 2002. Numerical simulation of CMWDA with its impacting on torrential rain forecast [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 60 (3): 309–317, doi:10.11676/qxxb2002.037.
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. 98 华南暴雨科学试验研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–228. Zhou Xiuji, Xue Jishan, Tao Zuyu, et al. 2003. The Study on the Scientific Experiment of Rainstorm in South China in 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–228.
- Zhou Y S, Gao S T, Shen S S P. 2004. A diagnostic study of formation and structures of the Meiyu front system over East Asia [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (6): 1565–1576, doi:10.2151/jmsj.82.1565.
- Zhou Y S, Deng G, Cheng H L, et al. 2005a. Synoptic features of the second Meiyu period in 1998 over China [J]. Acta Meteor. Sinica, 19 (1): 31–43.
- Zhou Y S, Deng G, Lei T, et al. 2005b. The thermodynamic and dynamical features of double front structures during 21–31 July 1998 in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 22 (6): 924–935, doi:10.1007/BF02918691.
- Zhou Y S, Liu L P, Deng G. 2009. Comparisons of the generalized potential temperature in moist atmosphere with the equivalent potential temperature in saturated moist atmosphere [J]. Adv. Meteor., 2009: 105265, doi:10.1155/2009/105265.
- 周玉淑, 刘璐, 朱科锋, 等. 2014. 北京“7.21”特大暴雨过程中中尺度系统的模拟及演变特征分析 [J]. 大气科学, 38 (5): 885–896. Zhou Yushu, Liu Lu, Zhu Kefeng, et al. 2014. Simulation and evolution characteristics of mesoscale systems occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 885–896, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13185.
- 朱民, 陆汉城, 余志豪. 1998. 梅雨锋  $\alpha$  中尺度气旋发展中的正反馈机制研究 [J]. 大气科学, 22 (5): 763–770. Zhu Min, Lu Hancheng, Yu Zhihao. 1998. Study of positive feedback mechanism for meso- $\alpha$  scale cyclone growing on Meiyu front [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (5): 763–770, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.05.11.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法 [M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 649pp. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Principle and Method of Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 649pp.