

崔春光,王斌,张文刚,等,2026.梅雨锋暴雨野外科学试验设计与实践[J].气象,52(3):257-272. Cui C G, Wang B, Zhang W G, et al, 2026. Design and implementation of integrative Meiyu frontal heavy rainfall experiment[J]. Meteor Mon, 52(3): 257-272(in Chinese).

梅雨锋暴雨野外科学试验设计与实践^{*}

崔春光^{1,2} 王 斌¹ 张文刚¹ 王晓芳¹

1 中国气象局武汉暴雨研究所 全国暴雨研究中心/中国气象局流域强降水重点

开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

2 灾害天气科学与技术全国重点实验室,北京 100081

提 要: 梅雨锋暴雨是我国长江流域及东亚区域所特有的强降水天气现象,开展梅雨锋暴雨野外科学试验,深入研究梅雨锋暴雨热动力过程、水汽输送、微物理结构及其演变机理,具有重要的科学价值。夏季长江流域降水过程超过 40% 以上的水汽来自南亚的印度洋—孟加拉湾,且存在一支来自青藏高原的水汽通道,60% 以上降水又与高原及高原东侧系统有密切联系,因此,对南亚水汽向长江流域输送通道观测及高原东移云团垂直结构演变观测的研究十分重要。为此,中国气象局武汉暴雨研究所对南亚及青藏高原南坡水汽向长江流域输送、高原东移云团影响梅雨锋暴雨、梅雨锋锋面结构、云微物理过程以及梅雨锋系统上下游效应机理进行深入研究,建立了从水汽源头、高原系统源地至长江中下游的暴雨野外科学试验体系,开展了梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测、典型山地暴雨观测、高原东移云团垂直结构观测、雅鲁藏布大峡谷水汽通道特征和演变观测、极端暴雨系统的跟踪观测等一系列暴雨野外科学试验,研究结果可为今后组织同类试验提供有益的借鉴。

关键词: 梅雨锋暴雨,野外科学试验,水汽,观测

中图分类号: P411

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.030902

Design and Implementation of Integrative Meiyu Frontal Heavy Rainfall Experiment

CUI Chunguang^{1,2} WANG Bin¹ ZHANG Wengang¹ WANG Xiaofang¹

1 National Rainstorm Research Center/CMA Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

2 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Beijing 100081

Abstract: The Meiyu frontal heavy rainfall is a heavy precipitation phenomenon of China's Yangtze River Basin and the East Asian Region. Conducting integrative field experiments on Meiyu frontal heavy rainfall to thoroughly study the thermodynamic and dynamic processes, moisture transport, microphysical structure, and their evolution mechanisms has important scientific value. In summer, over 40% of the moisture for precipitation in the Yangtze River Basin originate from the Indian Ocean and the Bay of Bengal in South Asia. Moreover, there is also a moisture pathway from the Qinghai-Xizang Plateau, and more than 60% of the precipitation are closely related to the plateau and weather systems on its eastern side. Therefore, the observational study of the South Asian moisture transport pathway to the Yangtze River Basin and of the vertical structural evolution of eastward-moving plateau cloud clusters is very important. To this end, the Wuhan Institute of Heavy Rain of China Meteorological Administration conducted in-depth studies on the

^{*} 国家自然科学基金项目(42230612)、全国暴雨研究开放基金(BYKJ2025Z08、BYKJ2025Z07、BYKJ2024Z01)和湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金(2023AFD093)共同资助

2026 年 1 月 27 日收稿; 2026 年 3 月 3 日收修定稿

第一作者:崔春光,主要从事中尺度天气学和暴雨科学试验研究. E-mail:cgcai@whhr.com.cn

mechanism for moisture to be transported from South Asia and the southern slope of Qinghai-Xizang Plateau into the Yangtze River Basin, on the mechanism how eastward-moving plateau cloud clusters affect Meiyu frontal heavy rainfall, and on the frontal structure of the Meiyu frontal surface, cloud microphysical processes, and the upstream to downstream effects of the Meiyu frontal system. They have established a field experiment system for heavy rainfall spanning from moisture source regions and plateau-system source areas to the middle and lower reaches of Yangtze River, and carried out a series of field experiments, which include observation of Meiyu frontal surface and mesoscale systems of heavy rainfall, observation of typical orographic heavy rainfall, observation of the vertical structure of eastward-moving plateau cloud clusters, observation of the characteristics and evolution of the moisture channel in the Yarlung Zangbo Grand Canyon, and tracking observation of extreme heavy rainfall systems. The research results can provide useful references for organizing similar experiments in the future.

Key words: Meiyu frontal heavy rainfall, integrative field experiment, water vapor, observation

引 言

2026 年世界气象日的主题是“测今日气象, 护明日家园”。一直以来, 观测在应对气象灾害中发挥着基础性的作用。据统计, 全球气象灾害及其衍生灾害占自然灾害的 91%、经济损失的 87%, 其中降水引发洪涝灾害的直接经济损失占 74% (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2019)。在中华人民共和国应急管理部发布的我国 2024 年十大自然灾害中, 其中 8 次是由极端暴雨引发, 因此研究暴雨及其衍生灾害是国家防灾减灾的迫切需求。长江流域是我国暴雨洪涝灾害最为频发、多发的地区之一, 每年汛期(尤其是梅雨期)大范围暴雨引发的洪涝灾害给该流域经济社会发展和人民生命财产安全带来了严重的威胁和损失, 如 1991 年、1998 年、2003 年、2007 年、2011 年、2016 年、2020 年、2021 年等年份梅雨期降水都带来较大影响(丁一汇, 1993; 陶诗言等, 2004; 王晓芳等, 2011; 张芳华等, 2020; 杨浩等, 2022)。

梅雨锋暴雨是长江流域主要的强降水天气现象。过去几十年国内外针对梅雨锋暴雨的研究已取得不少成果, 近年来随着数值预报的改进和精细化发展, 梅雨锋暴雨的预报水平也在不断提高(倪允琪和周秀骥, 2005; Zhang et al, 2011; 罗亚丽等, 2020)。但目前对梅雨锋暴雨的认识, 尤其是在影响梅雨锋强降水形成和发展的水汽条件、云环境场特征、云微物理特征等方面还存在较大不足, 多数数值模式云参数化方案无法合理地表达实际降水过程的物理特性, 严重制约了数值模式定时、定点、定量预

报能力的提升(崔春光等, 2014)。

梅雨锋降水是几种不同尺度天气系统相互作用的结果。在卫星云图上, 梅雨锋表现为一条水平尺度可达数千千米的带状云区, 云带内颜色灰暗的为中低云(分布广), 在其中镶嵌着多个白亮的云团(云顶温度低), 代表对流活动旺盛的地区, 即中尺度对流系统(MCS), 是产生强降水的直接系统(Ninomiya and Akiyama, 1992; 覃丹宇等, 2006)。常规的观测及分析手段已难以满足梅雨锋降水云结构和微物理过程的深入研究需求, 亟需开展地面和卫星联合观测, 以及利用飞机直接观测云中的微物理量。通过综合分析各种观测结果, 获得梅雨锋降水云可靠的宏微观特征信息, 可为研究梅雨锋上云和降水的发生、发展机理及模式云微物理过程奠定良好的资料基础, 最终根据大量的观测结果, 研发适合我国区域特色的模式参数, 提高模式预报的准确率。国内外的多项对流云降水大型外场试验结果均表明, 只有采用多途径探测设备的联合观测, 才能有效控制观测资料误差, 应用产品的反演才有可靠的科学依据(Jensen et al, 2016; Luo et al, 2017; Zhao et al, 2019; 丁一汇等, 2020; Cui et al, 2021a)。

中国气象局武汉暴雨研究所(以下简称武汉暴雨所)对南亚及青藏高原南坡水汽向长江流域输送、高原东移云团影响梅雨锋暴雨、梅雨锋锋面结构、云微物理过程以及梅雨锋系统上下游效应机理进行深入研究, 初步建立了从水汽源头、高原系统源地直至长江中下游的暴雨野外科学试验体系。本文将针对梅雨锋暴雨开展的野外科学试验, 从科学目标、设计思想、设备布局和试验开展等方面进行详细介绍。

1 试验科学目标

在青藏高原大地形影响、西风与季风共同作用下,梅雨锋暴雨是我国长江流域及东亚区域所特有的强降水天气现象(陶诗言,1980)。相关研究发现,夏季长江流域降水过程 60% 以上与高原及高原东侧系统有密切联系,且存在一支来自青藏高原的水汽通道(Yang H et al,2019;Yu et al,2007;覃丹宇等,2006)。因此,高原水汽向长江流域输送通道的观测及高原东移云团垂直结构演变的观测研究也十分重要。另外,地形也是长江中游暴雨频发的关键因子之一(崔春光等,2002;赵玉春等,2012),在长江中游地形的关键点上开展暴雨野外观测试验具有非常重要的科学价值。为此,武汉暴雨所逐步建立从水汽源头、高原系统源地直至长江中下游的梅雨锋暴雨科学试验体系(图 1)。自 2010 年开始,武汉暴雨所依托该体系,组织开展了一系列梅雨锋暴雨野外科学试验,包括:(1)梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测试验;(2)典型山地暴雨观测试验;(3)高原东移云团垂直结构观测试验;(4)雅鲁藏布大峡谷水汽通道特征和演变观测试验;(5)极端暴雨系统的跟踪观测试验。

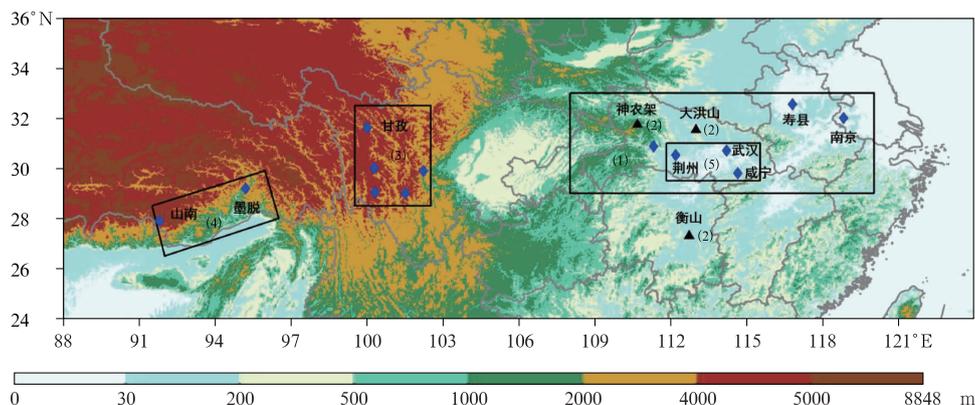
上述试验围绕影响梅雨锋暴雨形成和发展的热动力与水汽条件、云环境场特征、云微物理特征等信息的获取,分别聚焦在水汽输送、低值系统来源、梅雨锋多尺度系统内部因子和局地地形相互作用、梅

雨锋降水与云微物理相互关系等方面,既相对独立,又相互关联(图 2),共同为深化梅雨锋暴雨中小尺度机理认识、优化区域数值模式提供支撑。

1.1 梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测试验

长江流域梅雨期暴雨的触发和维持,本质上是大尺度环流、梅雨锋、切变线或低涡、急流和对流等多尺度系统(以下简称梅雨多尺度系统)内部因子和局地地形相互作用的结果(Wang et al,2014;Chen et al,2017;Fu et al,2017b;Guan et al,2020)。其内部结构以及相应的天气系统参见相应文献(Cui et al,2021a)。

梅雨锋降水是多尺度天气系统相互作用的结果,其中云物理过程起重要作用(Johnson et al,2007;Chen et al,2019)。对长江流域梅雨期的对流云团特别是深对流云团的宏微观结构和热动力特征进行高时空分辨率高精度的观测,获得该流域对流云团活动特征的新认知,是研究长江流域梅雨锋暴雨的基础。因此,梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测试验的科学目标为:通过地基、飞机、卫星联合观测,深入研究梅雨锋云系中小尺度的水平和垂直结构、宏微观物理特性和过程以及其与降水发生、发展的关系;揭示梅雨锋雨带形成过程中水汽和环境场条件的作用,梅雨锋对流云团中各水成物的转化及相应的热动力特征;降低数值模式云微物理参数化方案的不确定性,优化获得最适用于梅雨锋降水预报的云微物理参数化方案。



注:蓝色菱形表示加密观测站位置,黑色三角形代表山地暴雨观测试验站,数字 1~5 分别代表试验 1~5 的观测区域,黑色方框代表研究区域;填色代表海拔高度。

图 1 从水汽和高原系统源地到长江中下游的梅雨锋暴雨野外科学试验体系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Integrative Meiyou Frontal Heavy Rainfall Experiment (IMFRE) from the water vapor and plateau-system source areas to the middle and lower reaches of Yangtze River

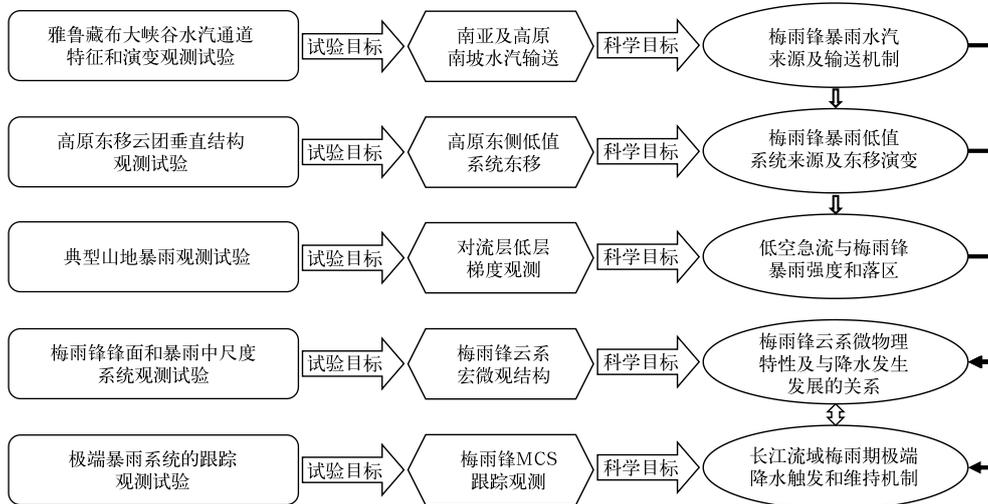
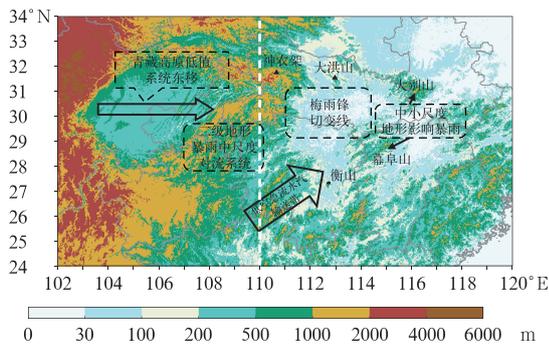


图 2 梅雨锋暴雨野外科学试验系列中各试验之间的相互关联示意图

Fig. 2 Interconnection diagram of various experiments of IMFRE

1.2 典型山地暴雨观测试验

如图 3 所示,影响长江中游梅雨锋暴雨的天气系统主要有青藏高原东移低值系统、梅雨锋切变线、西南急流、地形影响的中小尺度天气系统以及深入内陆的变性台风系统(Cui et al, 2015),其中地形作用至关重要。长江中游地区的中小尺度地形通过动力强迫、热力差异、水汽辐合影响暴雨的形成、强度和落区,是该区域暴雨频发的关键因子之一(崔春光等, 2002; 赵玉春等, 2012)。在这些地形的关键点上开展暴雨野外观测试验具有非常重要的科学价值。



注:填色为海拔高度,黑色三角形代表长江中游主要山脉和山地梯度观测所在位置,白色竖直虚线为 110°E 所在位置。

图 3 长江中游地形、山脉及影响梅雨锋暴雨的主要天气系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of terrain, mountains, and major weather systems affecting Meiuyu frontal heavy rainfall in the middle reaches of Yangtze River

鄂西神农架地处我国二级到三级地形转换的关键区,即 110°E 所在位置,位于高原低涡影响长江中下游地区的主要路径上(崔春光等, 2000),也是湖北省内暴雨中尺度对流系统的重要源地。通过开展该关键区域的梯度加密观测,有助于开展高原低涡对长江中游暴雨发生发展的影响机制研究。

湖南衡山受南海夏季风影响特别明显,处于我国夏季降水日变化位相转变的关键区(彭嘉栋等, 2019)。衡山站的风场变化能反映东亚夏季风的进退和我国主要雨带的推移。在日常预报业务中,衡山气象站的风向、风速资料是预报强降水落区的重要指标,比如该站风场从南风转为北风,对该区域暴雨发生发展有 2~7 h 的提前指示作用,在湖南省多次重大灾害性、转折性、关键性天气过程中得到了检验和应用(叶成志等, 2016)。因此,在衡山上建设梯度气象观测系统,对研究长江中下游暴雨天气具有十分重要的科学意义。

湖北省内的大洪山雄踞江汉平原北部,是省内一座独立内山,因周边是平原,山体落差近 1000 m,是非常理想的边界层垂直梯度自然观测平台。且大洪山是湖北极端暴雨易发区与山洪地质灾害高风险区,如山麓的随县柳林 2021 年“8·12”极端强降水事件,6 h 降水量达到 463 mm(贺晓露等, 2023),因此其具备研究暴雨、强对流等灾害性天气科学试验基地的先天自然条件。

大量研究表明,对流层低层尤其是 850 hPa 附近大气的风场、温度、湿度条件与暴雨的发生发展密切相关,如 850 hPa 西南急流、切变线、低涡等是产

生暴雨的重要天气系统(许美玲等,2004;陶诗言和卫捷,2007)。因此,典型山地暴雨观测试验的科学目标为:在高海拔山地形成梯度观测,获取对流层低层850 hPa附近大气要素状态,深入分析长江上游低值系统东移、西南低空急流水汽输送对下游暴雨强度和落区的影响机制,以及局地地形对极端暴雨触发和维持的作用机制。

1.3 高原东移云团垂直结构观测试验

青藏高原被称为世界第三极,夏季高原上的对流旺盛,在某些条件下,高原的对流会向东移出,这些移出的对流系统有时会触发西南涡,从而大大加强四川盆地附近的局地对流活动,造成较强的暴雨(Yasunari and Miwa,2006;傅慎明等,2011)。在较强的引导气流作用下,西南涡或其引发的对流系统会向东移动,这些系统的东移在某些条件下会进一步触发长江中下游大别山地区的中尺度涡旋,从而大大加强下游的局地对流活动,最终造成暴雨灾害(Yasunari and Miwa,2006)。1991—2004年逐小时降水观测统计显示,高原东移云团引起的长江流域降水占该区域总降水量的70%以上(Yu et al,2007),其中高原深对流云具有明显的东传特性,是引发下游暴雨和洪涝灾害最主要的系统(覃丹宇等,2006;师春香等,2000)。因此,研究高原东移云团过程中云宏微观参数演变、云团东移过程中与长江流域大气环境场的相互作用,进而获得青藏高原东移云团引发长江流域暴雨的概念模型及其动力学因子,有着重要的科学意义和实际应用价值。高原东移云团垂直结构观测试验的科学目标为:联合气象卫星和地基站多仪器观测,对夏季高原东移云团进行重点加密观测,分析青藏高原东移云团的宏微观云参数特征;结合再分析资料,采用模拟、热动力诊断相结合的方法,分析高原东移云团引发长江暴雨的大气环境场特征;诊断高原东移云团引发长江流域暴雨的关键热动力因子,从而建立高原东移云团引发长江流域暴雨的概念模型。

1.4 雅鲁藏布大峡谷水汽通道特征和演变观测试验

相关研究(Yang H et al,2019)发现,在典型强梅雨年,来自南亚印度洋—孟加拉湾的水汽输送异常强烈(超过40%),同时段气候态(40年)的水汽贡献仅25%。因此,南亚水汽输送通道观测对长江流域梅雨锋暴雨研究非常重要。青藏高原东南坡位于

南亚次大陆与高原的交接过渡地带,海拔从4500 m以上迅速降低到200 m左右,气候涵盖了高山的高寒气候和平原的热带季风气候,西风带和东亚季风在此交汇,年总降水量超过2000 mm,局地甚至超过3000 mm,如林芝市墨脱县西让村,年降水量高达3800 mm。观测表明,雅鲁藏布大峡谷充沛的水汽、极端的降水和陡峭地形,是非常理想的极端暴雨科学试验场。因此,雅鲁藏布大峡谷水汽通道特征和演变观测试验的科学目标为:在长江流域暴雨的水汽输送和天气系统源地开展水汽和云降水观测,获取精细的水汽和云降水垂直廓线信息;明确梅雨锋暴雨的关键水汽源地贡献与输送路径,揭示水汽通道与大尺度环流系统的耦合机制;验证峡谷地形对水汽输送的强迫增强效应,为梅雨锋暴雨的数值预报模型提供观测约束和参数优化。

1.5 极端暴雨系统的跟踪观测试验

以往的梅雨锋暴雨研究大多基于固定站点的观测数据,并获得了暴雨发生条件、热动力过程、云微物理过程的基本认知(孙建华等,2006;Wen et al,2016;Cui et al,2021a;2021b),但由于造成长江流域极端降水的对流云团时空变化较显著,固定站点观测无法对其有效捕捉,因此缺乏对长江流域极端降水系统的云团尺度热动力过程及多尺度交互作用的深入认知。以跟踪观测与固定站网相结合的外场试验,才能捕捉梅雨锋内云和降水发生发展的完整过程,是获取高时空分辨率云-降水宏微观特征和热动力结构的最佳途径,也是深入认识长江流域梅雨期极端降水触发和维持机制的前提(Geerts et al,2017;Parsons et al,2019)。因此,极端暴雨系统的跟踪观测试验科学目标为:通过跟踪观测获取多个典型MCS的热动力结构数据,建立长江流域梅雨多尺度系统的高时空分辨率综合数据集;在大尺度环流、梅雨锋、切变线或低涡、急流和对流的耦合作用框架内,揭示长江流域极端降水的触发和维持机制;评估区域模式的极端降水预报技巧,并探讨模式物理参数化方案的适用性和可能的改进方法。

2 试验设计思想与观测布局

2.1 梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测试验

(1) 设计思想

通过地基、飞机、卫星联合观测,获取梅雨锋上

降水云系的宏微观特征数据,重点是降水云内的微物理参数及其水汽和环境场数据,研究梅雨锋降水云发生发展的机理,评估与优化数值模式云微物理参数化方案。因此,该试验观测目标包括:一是通过地基综合观测反演深对流云宏微观特征参量,利用风廓线雷达、微波辐射计、天气雷达、双偏振雷达、云雷达、激光雨滴谱仪等观测,综合分析和反演深对流云的高低空急流、风切变等风场结构、温度平流、云量、云水量、云冰量、云滴有效半径以及降水粒子大小、数量、相态分布等参量;二是通过卫星遥感数据反演云参数,利用我国风云系列静止卫星高时间分辨率(夏季 15 min)观测,反演梅雨锋云顶的温度和高度、云系上端的云冰量、云滴有效半径以及云光学厚度等;三是通过飞机云中观测数据的云微观分析与对比,分析梅雨锋降水云内水平和垂直方向上的微物理量,并开展飞机观测与地基遥测的协同观测,用以验证地基反演的梅雨锋降水云内的微物理量。试验设计框图如图 4 所示。

(2) 观测布局

该试验范围覆盖长江中、下游流域。试验区域包括 7 个地基观测中心站,具体位置如图 5 所示,其中 I 区位于湖北省,属于长江中游;II 区位于安徽省和江苏省,属于长江下游。中游观测区包括秭归、襄

阳、江陵和咸宁 4 个地基观测中心站,下游观测区包括寿县、合肥和江宁 3 个地基观测中心站。地基观测设备基本可以分为 3 类:一类是单点垂直廓线观测设备,包括微波辐射计、云雷达、激光雷达、云高仪、微雨雷达和气球探空等;另一类是三维观测设备,包括 C 波段和 X 波段双偏振雷达以及 S 波段多普勒天气雷达;第三类是单点地面观测设备,包括一维和二维雨滴谱仪,GNSS 水汽站、自动气象站等。这些设备相互配合,可以获得三维立体、高时空分辨率的云和降水宏微观特征数据。

飞机探测飞行区域是以江陵站为中心 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 正方形区域(图 5 的地基站 3 和黄色矩形区域),探测飞机型号为空中国王 320,起降机场为宜昌三峡国际机场,距离江陵站 104 km。飞机携带 DMT 公司的粒子探测系统,其基本情况如表 1 所示。飞机探测飞行路线以不同高度的水平绕飞为主,再结合 1~2 次的垂直飞行,具体为:飞机起飞后以一定角度爬高到云顶或最大 7000 m 高度,然后在飞行区域内进行绕飞,每个高度保持平稳飞行一周,然后下降 300 m 进行再次水平探测飞行。如此反复在不同高度穿云直到最低高度 1500 m,然后再进行云底和云顶之间的垂直飞行各一次。

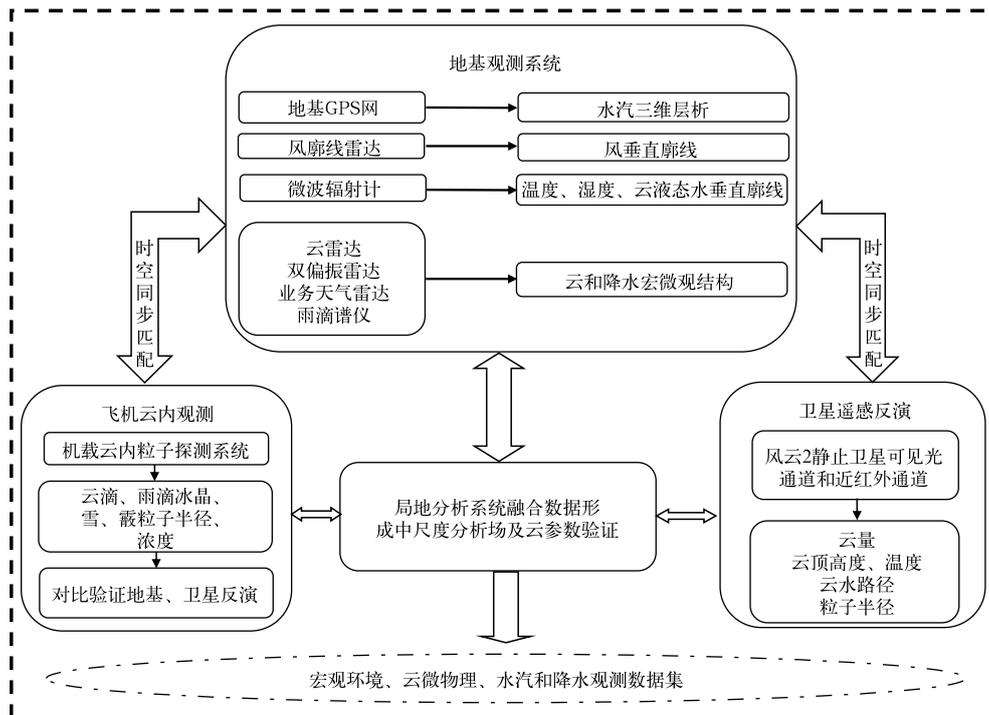
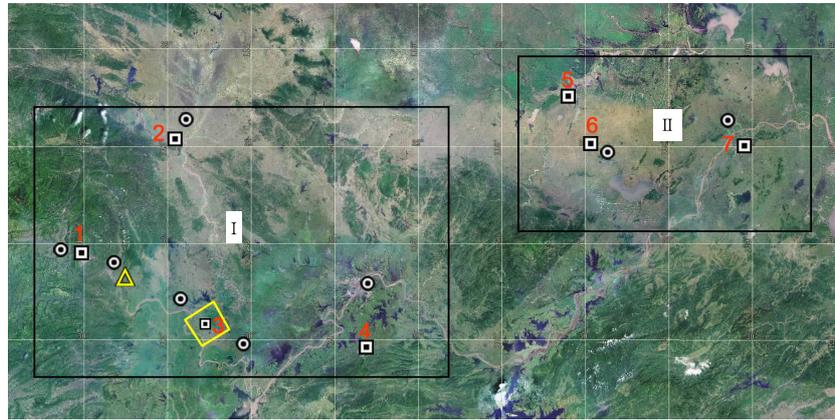


图 4 梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测试验设计示意图

Fig. 4 Schematic diagram of observation experiment design for Meiyu frontal surface and mesoscale systems of heavy rainfall



注:黑色方形表示 7 个地基观测中心站所在位置,1~7 分别代表秭归、襄阳、江陵、咸宁、寿县、合肥和江宁站;黑色圆形表示天气雷达所在位置;黄色三角形表示探测飞机起降机场;黄色矩形为飞机探测飞行区域;数字 I 和 II 分别代表长江中游、下游观测区。

图 5 梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测试验布局(Cui et al, 2021b)

Fig. 5 Layout of observation experiment for Meiyu frontal surface and mesoscale systems of heavy rainfall (cited from Cui et al, 2021b)

表 1 机载探测仪器基本情况

Table 1 Basic information of the airborne detection instruments

设备名称	测量范围	通道数量	主要探测对象
CDP(云粒子探头)	2~50 μm	30	云滴、冰晶
CIP(云粒子图像探头)	12.5~1562.5 μm	62	大云滴、冰雪晶
PIP(降水粒子图像探头)	50~6250 μm	62	降水粒子、霰、冰雪晶
PCASP(气溶胶粒子探头)	0.095~3.1 μm	30	气溶胶
CCN-100(云凝结核探头)	0.25~10.25 μm	20	云凝结核
AIMMS(综合气象测量系统)			温度、气压、湿度、风速和风向等
KPR(Ka 波段云雷达)	-35~35 dBz		云、弱降水
WCM(总水含量探头)	$10^{-4} \sim 10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$		云、降水

2.2 典型山地暴雨观测试验

(1) 设计思想

在长江上游低值系统东移路径、西南低空急流水汽输送带以及典型极端暴雨频发区的关键点位,获取对流层低层 850 hPa 附近大气要素状态,对上述系统影响暴雨发生发展机制进行深入研究。由于业务常规观测难以获得长序列连续的高空观测数据,而高山站(海拔 1~3 km)远离城镇,接近自由大气底部,其观测资料受城市化和局地环境影响较小,能真实反映大尺度天气系统的演变特征。因此,该试验的观测目标为:利用山地地形优势,在高海拔山地的不同高度上布设自动气象站,形成梯度观测,有效补充高空探测站点稀少、频次低的缺陷,获取高频次的对流层低层观测资料。

(2) 观测布局

在湖北神农架 5 个不同高度上布设 6 要素自动

气象站(图 6a),形成梯度观测。在湖南衡山 5 个不同高度上布设 6 要素自动气象站以及 1 台地基双频 GPS 接收机,探测梯度气象要素和整层可降水量(图 6b)。全天候连续实时获取地面风向、风速、雨量、温度、湿度、气压等气象要素,以及高时间密度的水汽、温度垂直廓线信息。

如图 6c 所示,在湖北随州大洪山建设由 3 个观测分系统(共 5 个场地)组成的暴雨立体垂直观测站,其分别为:云降水垂直观测分系统,设备包括边界层风廓线雷达、微波辐射计、微雨雷达、GNSS/MET 水汽站、激光雨滴谱仪;山地梯度气象观测分系统,由 4 块场地组成,海拔高度间隔 200~300 m,设备均为 6 要素自动气象站;强天气立体观测分系统,设备包括 X 波段相控阵双偏振雷达、GNSS/MET 水汽站、激光雨滴谱仪。所有分系统共同组成大洪山暴雨立体垂直观测系统,具有温度、湿度、风场、水汽、降水粒子的垂直廓线观测能力。

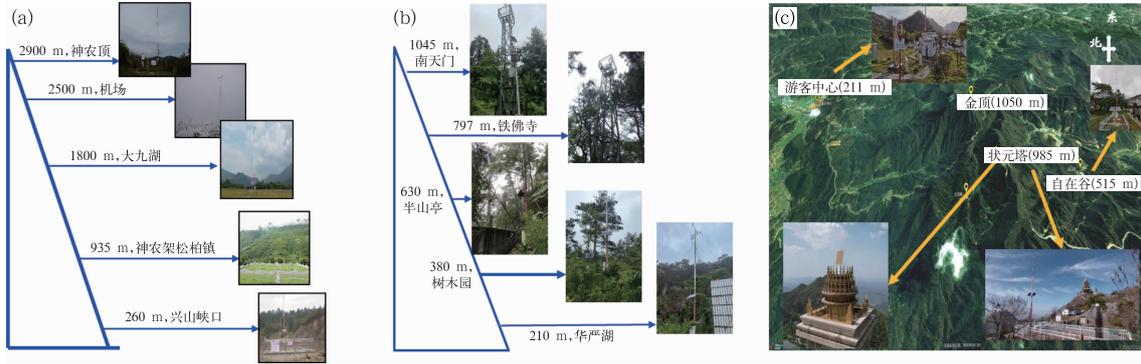


图 6 典型山地暴雨观测试验布局

(a) 神农架梯度观测, (b) 衡山梯度观测, (c) 大洪山梯度观测

Fig. 6 Layout of observation experiment for typical mountain heavy rainfall

(a) Shennongjia gradient observation, (b) Hengshan gradient observation, (c) Dahongshan gradient observation

2.3 高原东移云团垂直结构观测试验

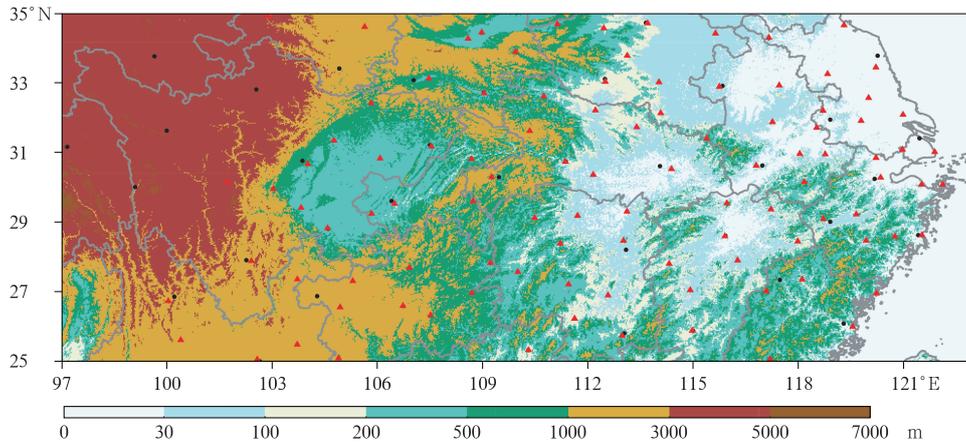
(1) 设计思想

高原东移云团的时空尺度跨越了青藏高原到长江中下游地区 (Xu and Zipser, 2011), 涉及大尺度和小尺度天气系统。因此, 针对试验科学目标, 试验对夏季高原东移云团和长江中游梅雨锋暴雨频发区域进行联合加密观测, 获取青藏高原云团源地及东移路径上的宏微观云参数特征, 深入研究高原东移云团引发长江流域暴雨的机理。据此, 试验观测网的设计原则为: 以业务为基础, 建立气象综合观测重点和加强区、重点和加强时段; 精细化观测, 关键区布设毫米波云雷达、X 波段双偏振雷达、微波辐射计、风廓线雷达等设备, 实现温度、湿度、风场和水凝物(云和降水)垂直精细化结构的观测; 观测内容需

紧密与机理、模式需求相结合, 同时兼顾研究验证与对比需求。

(2) 观测布局

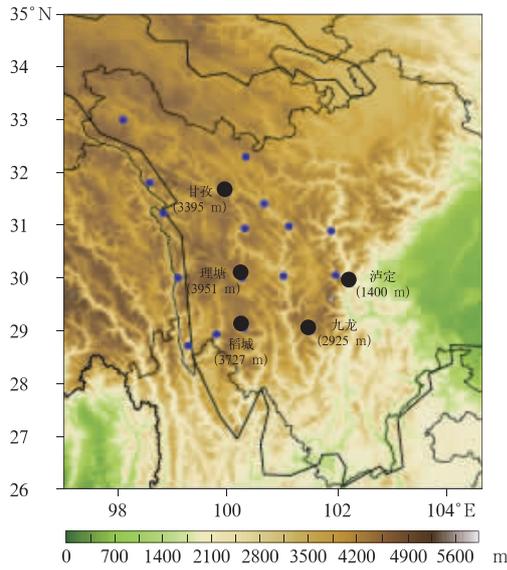
高原东移云团综合观测网由业务观测网覆盖的重点观测区 (25°~35°N, 97°~121°E) 及加强观测区 (高原东侧区域和长江中游) 构成。重点观测区主要依托该区域的业务观测系统 (图 7), 包括 95 部业务雷达、44 部探空设备、地面自动站、卫星等。对于加强观测区, 在青藏高原东坡的四川省甘孜州建设理塘、甘孜、九龙、稻城和泸定 5 个加密观测站 (图 8), 架设毫米波云雷达、X 波段双偏振雷达、微波辐射计、风廓线雷达等设备, 联合业务观测网, 捕捉高原东侧降水云团的垂直结构特征。在长江中游以暴雨监测外场试验基地设备为主, 捕捉长江中游云和强降水的垂直结构特征。



注: 红色三角形代表雷达站, 黑色圆点代表探空站, 填色为海拔高度。

图 7 高原东移云团综合观测重点观测区域

Fig. 7 Intensive observation area for integrative observation of eastward-moving plateau cloud clusters



注:黑色圆点为增强观测站点,蓝色圆点为业务观测台站。

图 8 高原东移云团高原东侧加强观测区站点及海拔高度(填色)

Fig. 8 Dense observation stations and their altitude (colored) on the east side of the plateau for eastward-moving plateau cloud clusters

2.4 雅鲁藏布大峡谷水汽通道特征和演变观测试验

(1)设计思想

针对试验科学目标,试验需要在南亚—孟加拉湾水汽输送通道路径开展精细的水汽垂直结构观测,因此选择青藏高原东南坡水汽通道内的林芝市(墨脱县、波密县)和山南市(错那县勒布沟)两个观测区域,分别代表雅鲁藏布大峡谷水汽通道典型区和复杂地形多雨区,布设相关观测设备,与现有业务观测网结合,获取更高时空分辨率的水汽梯度信息、云降水垂直廓线和微物理特征信息,为研究梅雨锋暴雨的上下游效应机理提供观测支撑。

(2)观测布局

一是利用雅鲁藏布大峡谷陡峭地形特点,在林芝市和山南市布设水汽梯度观测系统,建设 10 个不同海拔高度的 GNSS 水汽站,各站点距离 15~40 km,相当于获取该区域不同高度层的水汽含量信息(图 9)。二是针对水汽输送、云降水宏微观结构、山地局地地形强迫等观测需求,相应地选择了风场、温度、水汽、降水粒子等气象要素的垂直廓线观测设备。在墨脱县集中布设垂直廓线观测设备(表 2),保证各种观测具有良好的时空一致性,有利于数据的综合应用。此外,为了更准确地评估不同



图 9 青藏高原东南坡水汽通道观测站点分布
Fig. 9 Distribution of observation stations along the water vapor channel in Southeast Qinghai-Xizang Plateau

表 2 青藏高原东南坡水汽通道观测设备
Table 2 List of observation equipment for the water vapor channel in Southeast Qinghai-Xizang Plateau

观测区域	观测设备	数量
墨脱县	GNSS 水汽站	6
	边界层廓线雷达	1
	二维成像雨滴谱仪	1
	毫米波测云仪	1
	微波辐射计	1
	微型降水廓线仪	2
波密县	毫米波测云仪	1
错那县勒布沟	GNSS 水汽站	3
隆子县	GNSS 水汽站	1

设备的观测误差,对多种设备的观测要素进行重叠,如微波辐射计与 GNSS 水汽站均可获取整层大气水汽含量,可实现观测结果的交叉验证与对比分析。微雨雷达和二维成像雨滴谱仪均能观测降水粒子谱数据,可将雨滴谱仪数据作为基准,检验微雨雷达的观测误差,进而优化数据质量控制方案。

2.5 极端暴雨系统的跟踪观测试验

(1)设计思想

针对试验科学目标,试验需要通过跟踪观测梅雨锋上 MCS 的完整演变过程,因此,该试验观测目标是以固定站点观测为主,联合地基、飞机及气象卫星的移动(跟踪)观测,综合观测反演深对流云宏微观特征参量,获取高时空分辨率云-降水微物理结构和热动力结构信息,并对观测和反演数据进行质量评估分析,最终定量给出各种云-降水反演结果的误差。试验设计如图 10 所示。

(2)观测布局

本试验区域以位于长江中游江汉平原为重点观测区域,该区布设了密度较高的固定观测站网,自西至东涵盖宜昌、襄阳、随州、荆州、武汉、咸宁共 6 个

大气综合垂直廓线观测站,搭配一批业务天气雷达和边界层风廓线雷达站,站点水平间隔约 100 km。该区域每年梅雨期间暴雨频发,是理想的极端强降水外场科学试验区域。针对梅雨多尺度系统,布设的观测设备如下。

①天气尺度:以固定的业务观测网为主,包括业务探空、业务天气雷达、国家业务气象站和气象卫星等。卫星数据包括我国的风云四号和三号、日本的葵花卫星和美国的 GPM 卫星数据。

②中尺度:以固定观测网为主,包括业务 S 波段双偏振雷达、对流层和边界层风廓线雷达、加密气球探空、微波辐射计、毫米波雷达、激光(和二维视频)雨滴谱仪、地基 GNSS 水汽站、区域自动气象站、闪电定位监测网等。

③云团尺度:由于业务天气雷达只有 9 个仰角的体扫观测模式,垂直分辨率粗糙,且远距离回波区域在 1 km 以下有盲区,无法获得云团尺度的精细三维结构。因此,对流云团观测以 2 个移动观测超级站为主,每个移动观测超级站包括移动气球探空、边界层风廓线雷达、微波辐射计、移动毫米波云雷达、云高仪、激光测风雷达、微雨雷达、车载 C(或 X)波段双偏振雷达、二维视频雨滴谱仪、便携式 6 要素自动气象站等设备(部分设备如图 11 所示)。

3 试验开展

3.1 梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测试验

武汉暴雨所于 2018—2020 年开展梅雨锋锋面和暴雨中尺度系统观测试验研究。试验区域覆盖长江中、下游流域,并在宜昌、荆州、武汉、咸宁、合肥、寿县、南京设立加密观测站。试验在国内首次实现了飞机对梅雨锋降雨云内的水平和垂直结构观测,飞行 16 架次,加密观测了 15 次暴雨过程,基本实现了试验设定的观测目标并取得了一系列研究成果。研究成果主要包括:国内首次组织了地-空-星基联合观测的梅雨锋暴雨外场观测试验,综合评估了星载雷达、地基双偏振雷达、微雨雷达和微波辐射计等遥感数据误差特征,建立了多源观测融合分析数据集;通过飞机对梅雨锋降水云内部结构的探测,首次获得暖云降水粒子垂直演变的观测事实(Cui et al, 2021b);综合飞机、地基雷达和卫星数据,揭示了暖云降水以雨滴碰并增长为主的微物理特征,以及不同类型降水的微物理结构差异(Sun et al, 2020; Zhou et al, 2020; Fu et al, 2020; Zhang et al, 2020; Yang et al, 2020; Liu et al, 2020; Cui et al, 2020;

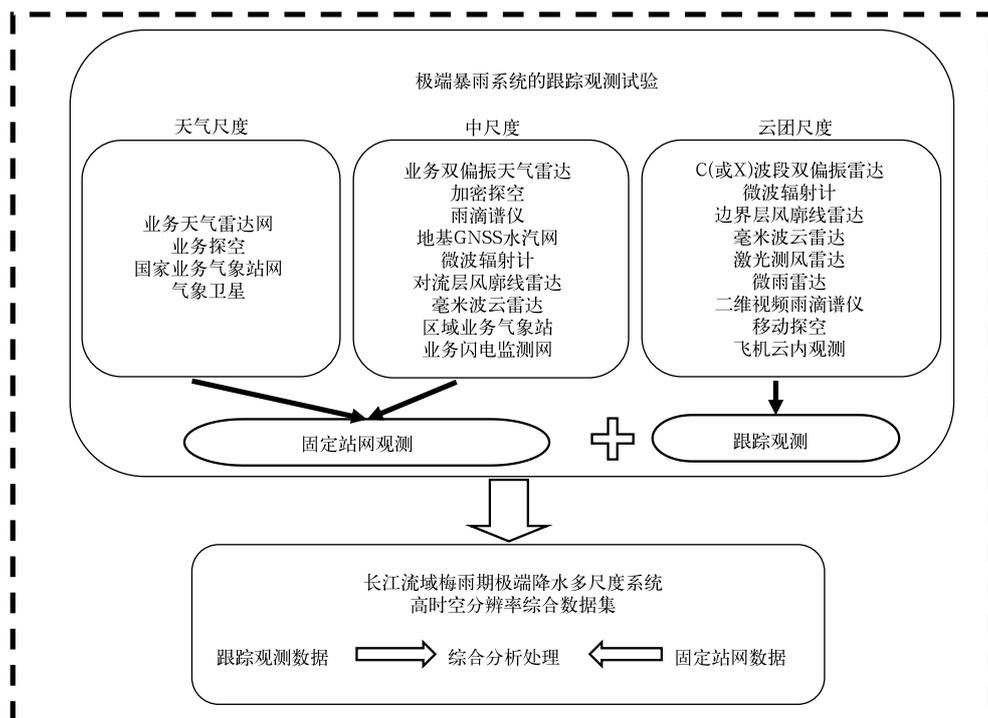
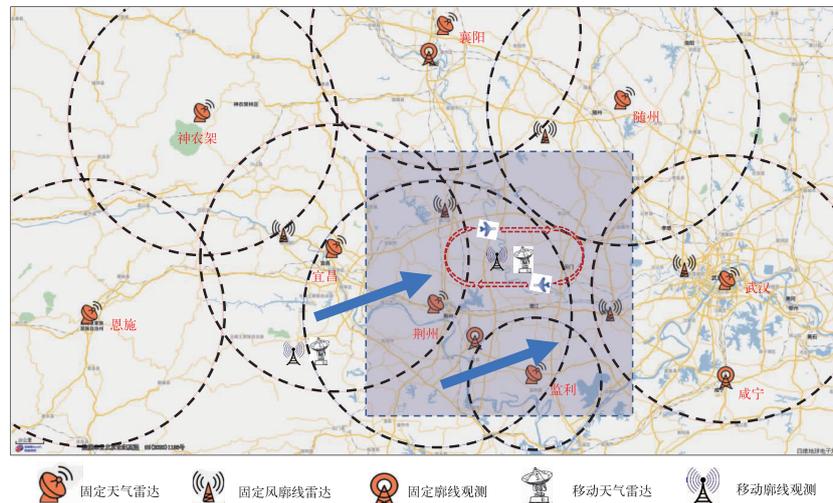


图 10 极端暴雨系统的跟踪观测试验设计示意图

Fig. 10 Schematic diagram of tracking observation experiment design for extreme heavy rainfall systems



注:阴影区为跟踪观测目标区,箭头表示降水系统主要移动路径方向,黑色虚线圆圈表示固定天气雷达站 100 km 距离,其中 X 波段雷达为 50 km 距离(图中监利雷达)。

图 11 极端暴雨系统的跟踪试验布局

Fig. 11 Layout of tracking observation experiment for extreme heavy rainfall systems

2021a;2021b)。上述观测分析更深入地阐明了梅雨锋云系和降水的微物理特性,并在改进中尺度模式云微物理参数化方案上取得初步进展,基本实现了该试验设定的观测分析、机理认识和模式改进等方面的研究目标。

3.2 典型山地暴雨观测试验

2010年和2014年武汉暴雨所分别建成神农架和衡山梯度站,开展典型山地暴雨观测试验。2022年在湖北大洪山建成暴雨立体垂直观测基地,开展山地云降水垂直廓线观测。

围绕西南急流对下游暴雨发生、发展影响机制这一试验研究目标,利用衡山观测数据和业务资料,针对湖南不同天气型强降水天气过程,陈静静等(2015)建立了具有指示意义的5类衡山站风场型,系统定量地阐述了高山站风场对低层环流的代表性及其对下游区域强降水过程的指示作用,叶成志等(2016)在此基础上自主研发了“高山站气象资料应用暴雨预报业务系统”。

在神农架梯度观测分析上,赵娴婷等(2013)分析了2010—2011年6—8月神农架及周边地区高山自动气象站观测的逐时资料,发现该区域夏季降水时次随着海拔的增高而增多的趋势,东北坡和东南坡降水日变化呈单峰型变化趋势,峰值出现在午后至傍晚。2010—2011年夏季多数站点盛行风向具有一致性,局地风场受地形影响较大,日变化明显,其可能是由山谷风效应引起的。东北坡松柏站夜间

盛行西北风,水汽大幅度减少,白天盛行东南风,水汽增加,这可能是午后降水时次明显增多的原因之一。

3.3 高原东移云团垂直结构观测试验

2017—2020年武汉暴雨所组织实施高原东移云团垂直结构增强观测试验,建立了数据集,评估了微波辐射计和边界层风廓线雷达数据质量,开发了适应高原观测条件的云雷达、双偏振雷达自适应观测模式、数据质量控制方法以及云底、云顶、云厚、降水粒子相态等宏微观物理量的反演算法(徐桂荣等,2019;万霞等,2020;Chen et al,2020)。

本试验利用观测数据,开展了高原东移云团路径以及宏微观物理特性演变研究,利用卫星观测得到高原云团3条主要移动路径(Yang R Y et al,2019;王婧羽等,2019;麦子等,2020;Mai et al,2020;王晓芳等,2020)。其中东移路径的云团呈现多层云增多,对流云比例增加,层云比例下降,降水对流属性逐渐增强的特性(Li et al,2019),这揭示了高原复杂地形影响大气和云垂直结构的效应和差异。另外,比较了高原至下游不同海拔地区雨滴谱的主要差异及其与雨强和对流的关系,结果表明:高原地区随海拔增加,小粒子浓度逐渐减小;平原地区小粒子数浓度更高(李山山等,2020)。

以试验数据为基础,揭示了青藏高原东移云团引发长江流域暴雨的大气环境场特征(Fu et al,2017a;2019),诊断了青藏高原东移云团引发长江流域暴雨的关键动力学因子(Fu et al,2017b;2018;汤

欢等,2020),重构了雨滴的下落末速度与直径之间的关系及雨滴的谱形参数与斜率二项式关系,并引入云微物理参数化方案,改进了模式降水预报(Zhou et al,2024)。

3.4 雅鲁藏布大峡谷水汽通道特征和演变观测试验

武汉暴雨所参与第二次青藏高原综合科学考察,自2019年1月开始,在雅鲁藏布江流域下游墨脱站(海拔1279 m)进行加密观测。观测期间主要利用MP-3000A型地基微波辐射计分别对有、无降水时水汽密度和液态水含量等垂直变化进行探测。另外,在西藏山南市错那县勒布沟布设了1台激光雨滴谱仪,开展青藏高原东南坡水汽通道降雨微物理特性观测。在前期试验观测基础上,武汉暴雨所继续增强加密观测能力,于2024年新购置设备17台(套),在西藏林芝市和山南市,建设高原水汽和云降水观测系统,获取高时空分辨率的水汽梯度和云降水垂直廓线信息(图10和表2)。目前观测系统正在建设中。

围绕试验研究目标,武汉暴雨所初步开展了雅鲁藏布大峡谷水汽垂直分布特征研究。杨浩等(2019)分析发现在雅鲁藏布大峡谷水汽等具有以下

特征:(1)水汽密度在有降水时均高于无降水,水汽密度随高度明显减小,有降水时更明显;(2)有降水或无降水时,液态水含量在1.8 km以下均表现为随高度先减后增,降水时液态水含量要高于无降水;(3)气象要素的日变化主要体现在2 km以下,也有较明显的年变化特征。

3.5 极端暴雨系统的跟踪观测试验

2023—2025年武汉暴雨所联合国家卫星气象中心、国家气象中心,以江汉平原、大别山区为试验区域,以卫星联合地基观测,采用固定站网结合移动观测的方式,开展极端暴雨系统的跟踪观测试验。试验期间,布设5个加密观测站,观测设备包括固定S+X双偏振雷达组网、长江中下游地区14时(北京时间)业务加密探空、机动C波段双偏振雷达和毫米波云雷达、FY-4B卫星快扫云图及GIIRS加密观测、地基垂直观测设备、移动风廓线雷达、移动气球探空等。试验成功捕捉了9次大范围暴雨过程,发现了强降水时存在罕见的超强低空急流现象(高度1~3 km, $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),其对降水强度、位置以及演变的影响正在进一步分析中(图12)。该试验还将在2026—2027年继续开展,以获取更多的观测个例。

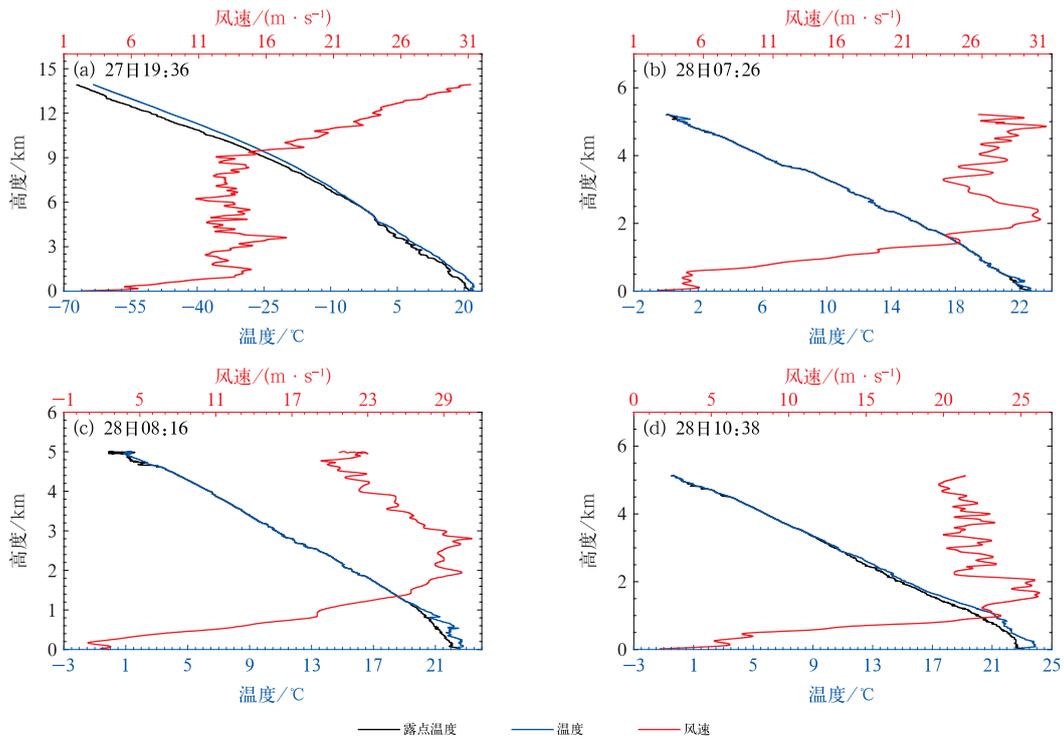


图 12 2024年6月(a,b)第1次和(c,d)第2次咸宁站移动气球加密探空观测的超强低空急流

Fig. 12 Super low-level jet observed by two mobile balloon soundings at Xianning Station on (a, b) the first time and (c, d) the second time in June 2024

试验取得的研究进展为:(1)改进多源观测融合分析技术,建立近三年长江中游强降水个例的1 km、15 min频次的稠密观测融合同化分析数据集;(2)揭示了长江流域强梅雨和弱梅雨年的降水微物理参数特点和其差异,以及层状降水粒子下落演变特征(Li et al, 2020);(3)研发了多种地基观测数据质量控制和反演算法,以及卫星多通道观测雨团的融合算法;(4)诊断了梅雨期夜间急流的增强机制,揭示了非绝热加热对梅雨锋的反馈作用和降水-对流-锋面相互作用机制(Wang et al, 2019; Hu et al, 2019; 2021; 2022);(5)发展了北斗水汽同化技术和双偏振雷达资料同化方法;(6)改进了区域模式雨滴碰并破碎效率、冰核活化方案等云微物理方案。

4 结论与展望

武汉暴雨所依托梅雨锋暴雨科学试验体系,设计并开展了一系列野外科学试验。这些试验从设计到实施有以下几个特点,可为今后组织同类试验提供借鉴。

第一,试验的科学目标完整系统。这一系列试验涵盖了南亚及青藏高原南坡水汽向长江流域输送、高原东移云团影响梅雨锋暴雨、梅雨锋锋面、热动力、水汽与云微物理结构以及梅雨锋系统上下游效应机理等研究目标,既相对独立,又相互关联,共同推动梅雨锋暴雨中小尺度机理的深入认识和区域数值模式的优化改进。

第二,试验的方案设计重点突出。所有试验均是紧密围绕影响梅雨锋暴雨形成和发展的热动力和水汽条件、云环境场特征、云微物理特征等方面的信息获取,注重水汽、云降水垂直结构的精细探测,发展关键位点的加密探测,结合业务观测网,实现了点面有机结合,形成了水汽-云-降水-强降水演变的综合观测布局。

第三,试验的组织实施持续性好。自2010年以来,围绕试验科学目标和观测目标,武汉暴雨所不间断地开展梅雨锋暴雨野外科学试验。以试验数据为基础,系统地推进观测分析、数据融合同化、机理认识和模式参数化方案改进等工作,取得了一系列科研成果。这也说明试验的设计是科学合理的,可以为长江流域暴雨研究提供崭新全面的观测方略。

综上所述,与以往类似试验相比,梅雨锋暴雨野外科学试验实现了四个方面的转变:(1)以往试验主要针对梅雨锋暴雨系统本身,梅雨锋暴雨野外科学试验则不仅观测梅雨锋暴雨系统,也观测其上游相

联系的高原水汽输送通道和东移系统,实现了全局扩展探索;(2)以往试验仅在水平尺度开展了精细观测,梅雨锋暴雨野外科学试验则注重水平和垂直尺度观测的结合,捕捉高时空分辨率的水汽-云-降水宏微观特征的动态演变信息;(3)以往试验受限于观测条件,未实现星-地-空基的协同观测,梅雨锋暴雨野外科学试验则开展了大量的卫星、飞机和地基联合观测,并通过多源协同观测获得降水粒子垂直演变的观测事实;(4)以往试验采取的是固定站网加密观测,梅雨锋暴雨野外科学试验则初步探索了移动跟踪梅雨锋暴雨系统的观测,包括风云四号卫星的快扫成像,时空分辨率高达1 min、250 m,以及地基移动廓线观测系统的协同配合,实现了梅雨锋暴雨系统降水强度、位置以及演变的跟踪观测。

虽然梅雨锋暴雨野外科学试验取得了一些成就,但也存在以下几个问题:

(1)在外场试验中,目标观测理论研究还存在不足,后续需要加强伴随模式确定观测目标区和敏感区的理论和方法研究,确定观测最优时空布局策略。

(2)试验区域属于东亚季风深厚湿层背景下的暴雨频发区,如何深入揭示弱对流背景下极端降水的发生机制,阐释与其他区域(如欧洲、北美)极端降水机制存在的不同,需要在后续相关研究进一步加强。

(3)在外场试验分年度实施过程中,还需要制订更明确的年度目标,每年的试验目标也需要更具体,试验主题更突出。比如分年度设计梅雨锋锋面、切变线、双低空急流等重点试验目标,逐一完成试验任务,最终实现总体科学目标。

(4)不同的试验数据应用程度不一致,如典型山地暴雨观测试验,只是分析了本站资料代表性及局地变化特征,对下游区域强降水的指示作用及影响机制还有待深入研究。又如雅鲁藏布大峡谷水汽通道特征和演变观测试验,囿于观测设备有限,目前只分析了本地水汽、温度、湿度的局地变化特征,后续随着观测系统建设完成,将进一步加强资料应用。

随着观测布局的进一步优化和观测能力的持续提升,梅雨锋暴雨野外科学试验将继续在长江流域开展,为我国中东部暴雨研究提供基础平台,揭示高原云团移动路径上云和降水微物理特性及其演变规律,提升对梅雨锋暴雨发生和形成机理的认识。

参考文献

- 陈静静,叶成志,傅承浩,等,2015. 5类南岳高山气象站风场对湖南不同天气型强降水的指示作用[J]. 暴雨灾害,34(2):126-132.

- Chen J J, Ye C Z, Fu C H, et al, 2015. Indicative significance of five patterns of wind at the Nanyue Mountain Meteorological Station on various severe precipitation events in Hunan[J]. *Torr Rain Dis*, 34(2): 126-132(in Chinese).
- 崔春光, 房春花, 胡伯威, 等, 2000. 地形对低涡大暴雨影响的数值模拟试验[J]. *气象*, 26(8): 14-18. Cui C G, Fang C H, Hu B W, et al, 2000. Numerical simulation of the topographic effects on torrential rain with south west China vortex[J]. *Meteor Mon*, 26(8): 14-18(in Chinese).
- 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 C G, Lin C Z, Wang X F, 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*, 4(2): 6-15(in Chinese).
- 崔春光, 闵爱荣, 胡伯威, 2002. 中尺度地形对“98.7”鄂东特大暴雨的动力作用[J]. *气象学报*, 60(5): 602-612. Cui C G, Min A R, Hu B W, 2002. Dynamic effect of mesoscale terrain on “98.7” extremely heavy rain in the east of Hubei Province [J]. *Acta Meteor Sin*, 60(5): 602-612(in Chinese).
- 丁一汇, 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨的研究[M]. 北京: 气象出版社. Ding Y H, 1993. Study on Persistent Torrential Rain over the Yangtze-Huaihe River Basins in 1991 [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 丁一汇, 胡雯, 黄勇, 等, 2020. 淮河流域能量和水分循环研究进展[J]. *气象学报*, 78(5): 721-734. Ding Y H, Hu W, Huang Y, et al, 2020. The main scientific achievements of the first China-Japan cooperative GAME/HUBEX experiments: a historical review[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(5): 721-734(in Chinese).
- 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 S M, Sun J H, Zhao S X, 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-Huai River Basin [J]. *Acta Meteor Sin*, 69(4): 581-600(in Chinese).
- 贺晓露, 郝元甲, 祁海霞, 等, 2023. 湖北“8·12”极端降水特征及成因初探[J]. *暴雨灾害*, 42(1): 13-23. He X L, Hao Y J, Qi H X, et al, 2023. Analysis of characteristics and causes of “8·12” extreme precipitation in Hubei Province[J]. *Torr Rain Dis*, 42(1): 13-23(in Chinese).
- 李山山, 王晓芳, 万蓉, 等, 2020. 青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征[J]. *高原气象*, 39(5): 899-911. Li S S, Wang X F, Wan R, et al, 2020. The characteristics of raindrop spectrum in different altitude region on the eastern slope of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteor*, 39(5): 899-911(in Chinese).
- 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等, 2020. 中国暴雨的科学及预报: 改革开放 40 年研究成果[J]. *气象学报*, 78(3): 419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al, 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3): 419-450(in Chinese).
- 麦子, 傅慎明, 孙建华, 2020. 近 16 年暖季青藏高原东部两类中尺度对流系统(MCS)的统计特征[J]. *气候与环境研究*, 25(4): 385-398. Mai Z, Fu S M, Sun J H, 2020. Statistical features of two types of mesoscale convective systems (MCSs) generated over the eastern Tibetan Plateau during 16 consecutive warm seasons [J]. *Climatic Environ Res*, 25(4): 385-398(in Chinese).
- 倪允琪, 周秀骥, 2005. 我国长江中下游梅雨锋暴雨研究的进展[J]. *气象*, 31(1): 9-12. Ni Y Q, Zhou X J, 2005. Review on study of heavy rainfall within the Meiyu front in the middle and lower reaches of the Changjiang River[J]. *Meteor Mon*, 31(1): 9-12(in Chinese).
- 彭嘉栋, 叶成志, 张剑明, 等, 2019. 中国中部典型高山气象站风速的均一性检验及其变化特点[J]. *气象与环境学报*, 35(4): 139-144. Peng J D, Ye C Z, Zhang J M, et al, 2019. Homogeneity test and variation characteristics of wind speed at two typical high mountainous meteorological stations in Central China[J]. *J Meteor Environ*, 35(4): 139-144(in Chinese).
- 覃丹宇, 方宗义, 江吉喜, 2006. 典型梅雨暴雨系统的云系及其相互作用[J]. *大气科学*, 30(4): 578-586. Qin D Y, Fang Z Y, Jiang J X, 2006. The cloud systems of heavy rainfall in the typical Meiyu period and their interactions[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(4): 578-586(in Chinese).
- 师春香, 江吉喜, 方宗义, 2000. 1998 长江大水期间对流云团活动特征研究[J]. *气候与环境研究*, 5(3): 279-286. Shi C X, Jiang J X, Fang Z Y, 2000. A study on the features of severe convective cloud clusters causing serious flooding over Changjiang River Basin in 1998[J]. *Climatic Environ Res*, 5(3): 279-286(in Chinese).
- 孙建华, 周海光, 赵思雄, 2006. 2003 年 7 月 3~5 日淮河流域大暴雨中尺度对流系统的观测分析[J]. *大气科学*, 30(6): 1103-1118. Sun J H, Zhou H G, Zhao S X, 2006. An observational study of mesoscale convective systems producing severe heavy rainfall in the Huaihe River Basin during 3-5 July 2003[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(6): 1103-1118(in Chinese).
- 汤欢, 傅慎明, 孙建华, 等, 2020. 一次高原东移 MCS 与下游西南低涡作用并产生强降水事件的研究[J]. *大气科学*, 44(6): 1275-1290. Tang H, Fu S M, Sun J H, et al, 2020. Investigation of severe precipitation event caused by an eastward-propagating MCS originating from the Tibetan Plateau and a downstream southwest vortex[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(6): 1275-1290(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社. Tao S Y, 1980. *Torrential Rain in China* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 陶诗言, 卫捷, 2007. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系[J]. *气象*, 33(3): 10-18. Tao S Y, Wei J, 2007. Correlation between monsoon surge and heavy rainfall causing flash-flood in southern China in summer [J]. *Meteor Mon*, 33(3): 10-18(in Chinese).
- 陶诗言, 张小玲, 张顺利, 等, 2004. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究[M]. 北京: 气象出版社. Tao S Y, Zhang X L, Zhang S L, et al, 2004. Research on Meiyu Frontal Rainstorm Disasters in the Yangtze River Basin [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 万霞, 徐桂荣, 万蓉, 等, 2020. 青藏高原东坡甘孜云雷达观测的非降水云垂直结构特征分析[J]. *暴雨灾害*, 39(5): 442-450. Wan X, Xu G R, Wan R, et al, 2020. Vertical structure of non-precipitation cloud obtained from cloud radar observation at Ganzi in the

- eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Torr Rain Dis*, 39(5): 442-450(in Chinese).
- 王婧羽,王晓芳,汪小康,等,2019. 青藏高原云团东传过程及其中尺度对流系统的统计特征[J]. *大气科学*, 43(5): 1019-1040. Wang J Y, Wang X F, Wang X K, et al, 2019. Statistical characteristics of eastward propagation of cloud clusters from the Tibetan Plateau and mesoscale convective systems embedded in these cloud clusters[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(5): 1019-1040(in Chinese).
- 王晓芳,黄华丽,黄治勇,2011. 2010年5—6月南方持续性暴雨的成因分析[J]. *气象*, 37(10): 1206-1215. Wang X F, Huang H L, Huang Z Y, 2011. The causation analysis of persistent heavy rain over southern China during May—June 2010[J]. *Meteor Mon*, 37(10): 1206-1215(in Chinese).
- 王晓芳,李超,杨浩,等,2020. 青藏高原东移云团研究进展[J]. *暴雨灾害*, 39(5): 433-441. Wang X F, Li C, Yang H, et al, 2020. Research progress on eastward-moving cloud clusters from the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Torr Rain Dis*, 39(5): 433-441(in Chinese).
- 徐桂荣,张志刚,万霞,等,2019. 地基微波辐射计反演的青藏高原东侧甘孜大气温湿廓线分析[J]. *暴雨灾害*, 38(3): 238-248. Xu G R, Zhang W G, Wan X, et al, 2019. Analysis on atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Torr Rain Dis*, 38(3): 238-248(in Chinese).
- 许美玲,段旭,孙绩华,等,2004. 与低空急流相伴的暴雨天气诊断分析[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 26(4): 320-324. Xu M L, Duan X, Sun J H, et al, 2004. Diagnostic study on the torrential rains coupling with the lower southwest jets in Yunnan[J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci Ed)*, 26(4): 320-324(in Chinese).
- 杨浩,崔春光,王晓芳,等,2019. 气候变暖背景下雅鲁藏布江流域降水变化研究进展[J]. *暴雨灾害*, 38(6): 565-575. Yang H, Cui C G, Wang X F, et al, 2019. Research progresses of precipitation variation over the Yarlung Zangbo River Basin under global climate warming[J]. *Torr Rain Dis*, 38(6): 565-575(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小康,等,2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. *气象*, 48(5): 571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 571-579(in Chinese).
- 叶成志,潘志祥,蔡荣辉,2016. 高山气象站资料代表性及应用价值研究[M]. 北京:气象出版社. Ye C Z, Pan Z X, Cai R H, 2016. Study on the Representativeness and Application Value of Data from Alpine Meteorological Stations[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 张芳华,陈涛,张芳,等,2020. 2020年6—7月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J]. *气象*, 46(11): 1405-1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F, et al, 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June—July 2020[J]. *Meteor Mon*, 46(11): 1405-1414(in Chinese).
- 赵娴婷,赵玉春,赖安伟,等,2013. 神农架及周边地区夏季气象要素时空特征初步分析[J]. *暴雨灾害*, 32(3): 268-275. Zhao X T, Zhao Y C, Lai A W, et al, 2013. Preliminary analysis of summer meteorological fields in Shennongjia and its surrounding areas[J]. *Torr Rain Dis*, 32(3): 268-275(in Chinese).
- 赵玉春,许小峰,崔春光,2012. 中尺度地形对梅雨锋暴雨影响的个案研究[J]. *高原气象*, 31(5): 1268-1282. Zhao Y C, Xu X F, Cui C G, 2012. Case study of the impact of mesoscale topography on the Meiyu frontal rainstorm[J]. *Plateau Meteor*, 31(5): 1268-1282(in Chinese).
- Chen G, Zhao K, Wen L, et al, 2019. Microphysical characteristics of three convective events with intense rainfall observed by polarimetric radar and disdrometer in Eastern China[J]. *Remote Sens*, 11(17): 2004.
- Chen G X, Sha W M, Iwasaki T, et al, 2017. Diurnal cycle of a heavy rainfall corridor over East Asia[J]. *Mon Wea Rev*, 145(8): 3365-3389.
- Chen Y L, Chen G C, Cui C G, et al, 2020. Retrieval of the vertical evolution of the cloud effective radius from the Chinese FY-4 (Feng Yun 4) next-generation geostationary satellites[J]. *Atmos Chem Phys*, 20(2): 1131-1145.
- Cui C G, Dong X Q, Wang B, et al, 2021a. Integrative monsoon frontal rainfall experiment (IMFRE-I): a mid-term review[J]. *Adv Atmos Sci*, 38(3): 357-374.
- Cui C G, Dong X Q, Wang B, et al, 2021b. Phase two of the integrative monsoon frontal rainfall experiment (IMFRE) over the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2020[J]. *Adv Atmos Sci*, 38(3): 346-356.
- Cui C G, Wan R, Wang B, et al, 2015. The mesoscale heavy rainfall observing system (MHROS) over the middle region of the Yangtze River in China[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(19): 10399-10417.
- Cui W J, Dong X Q, Xi B K, et al, 2020. Cloud and precipitation properties of MCSs along the Meiyu frontal zone in central and southern China and their associated large-scale environments[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(6): e2019JD031601.
- Fu S M, Cao J, Jiang X W, et al, 2017a. On the variation of divergent flow; an eddy-flux form equation based on the quasi-geostrophic balance and its application[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(5): 599-612.
- Fu S M, Sun J H, Luo Y L, et al, 2017b. Formation of long-lived summertime mesoscale vortices over Central East China; semi-idealized simulations based on a 14-year vortex statistic[J]. *J Atmos Sci*, 74(12): 3955-3979.
- Fu S M, Liu R X, Sun J H, 2018. On the scale interactions that dominate the maintenance of a persistent heavy rainfall event: a piecewise energy analysis[J]. *J Atmos Sci*, 75(3): 907-925.
- Fu S M, Mai Z, Sun J H, et al, 2019. Impacts of convective activity over the Tibetan Plateau on plateau vortex, southwest vortex, and downstream precipitation[J]. *J Atmos Sci*, 76(12): 3803-3830.
- Fu Z K, Dong X Q, Zhou L L, et al, 2020. Statistical characteristics of raindrop size distributions and parameters in Central China during the Meiyu seasons[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(19): e2019JD031954.
- Geerts B, Parsons D, Ziegler C L, et al, 2017. The 2015 plains elevated convection at night field project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(4): 767-786.
- Guan P Y, Chen G X, Zeng W X, et al, 2020. Corridors of Mei-yu-

- season rainfall over eastern China[J]. *J Climate*, 33(7):2603-2626.
- Hu Y, Deng Y, Lin Y L, et al, 2021. Dynamics of the spatiotemporal morphology of Meiyu fronts: an initial survey[J]. *Climate Dyn*, 56(9):2715-2728.
- Hu Y, Deng Y, Lin Y L, et al, 2022. Indirect effect of diabatic heating on Meiyu frontogenesis[J]. *Climate Dyn*, 59(3):851-868.
- Hu Y, Deng Y, Zhou Z M, et al, 2019. A statistical and dynamical characterization of large-scale circulation patterns associated with summer extreme precipitation over the middle reaches of Yangtze River[J]. *Climate Dyn*, 52(9):6213-6228.
- Jensen M P, Petersen W A, Bansemir A, et al, 2016. The midlatitude continental convective clouds experiment (MC3E) [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 97(9):1667-1686.
- Johnson D E, Tao W K, Simpson J, 2007. A study of the response of deep tropical clouds to large-scale thermodynamic forcings. Part II: sensitivities to microphysics, radiation, and surface fluxes [J]. *J Atmos Sci*, 64(3):869-886.
- Li C, Deng Y, Cui C G, et al, 2020. Hydrometeor budget of the Meiyu frontal rainstorms associated with two different atmospheric circulation patterns[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(16):e2019JD031955.
- Li C, Wang X F, Zhou L L, et al, 2019. Cloud features of Tibetan Plateau vortex category cloud cluster over different regions along the eastward-moving path in summer[J]. *Adv Meteor*, 2019(1):2149357.
- Liu L, Cui C G, Deng Y, et al, 2020. Localization and invigoration of Meiyu front rainfall due to aerosol-cloud interactions: a preliminary assessment based on WRF simulations and IMFRE 2018 field observations [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(13):e2019JD031952.
- Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al, 2017. The southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX)[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(5):999-1013.
- Mai Z, Fu S M, Sun J H, et al, 2020. Key statistical characteristics of the mesoscale convective systems generated over the Tibetan Plateau and their relationship to precipitation and southwest vortices[J]. *Int J Climatol*, 41(S1):E875-E896.
- Ninomiya K, Akiyama T, 1992. Multi-scale features of Baiu, the summer monsoon over Japan and the East Asia[J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 70(1B):467-495.
- Parsons D B, Haghi K R, Halbert K T, et al, 2019. The potential role of atmospheric bores and gravity waves in the initiation and maintenance of nocturnal convection over the southern Great Plains [J]. *J Atmos Sci*, 76(1):43-68.
- Sun Y T, Dong X Q, Cui W J, et al, 2020. Vertical structures of typical Meiyu precipitation events retrieved from GPM-DPR[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(1):e2019JD031466.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2019. Economic losses, poverty & disasters: 1998-2017[R]. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Wang X F, Cui C G, Cui W J, et al, 2014. Modes of mesoscale convective system organization during Meiyu season over the Yangtze River Basin[J]. *J Meteor Res*, 28(1):111-126.
- Wang X K, Dong X Q, Deng Y, et al, 2019. Contrasting pre-Meiyu and Meiyu extreme precipitation in the Yangtze River Valley: influencing systems and precipitation mechanisms[J]. *J Hydrometeorol*, 20(9):1961-1980.
- Wen L, Zhao K, Zhang G F, et al, 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and micro rain radar data[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 121(5):2265-2282.
- Xu W X, Zipser E J, 2011. Diurnal variations of precipitation, deep convection, and lightning over and east of the eastern Tibetan Plateau[J]. *J Climate*, 24(2):448-465.
- Yang H, Xu G Y, Wang X F, et al, 2019. Quantitative analysis of water vapor transport during Meiyu front rainstorm period over the Tibetan Plateau and Yangtze-Huai River Basin[J]. *Adv Meteor*, 2019(1):6029027.
- Yang J M, Li J X, Li P R, et al, 2020. Spatial distribution and impacts of aerosols on clouds under Meiyu frontal weather background over Central China based on aircraft observations[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(15):e2019JD031915.
- Yang R Y, Zhang Y C, Sun J H, et al, 2019. The characteristics and classification of eastward-propagating mesoscale convective systems generated over the second-step terrain in the Yangtze River Valley[J]. *Atmos Sci Lett*, 20(1):e874.
- Yasunari T, Miwa T, 2006. Convective cloud systems over the Tibetan Plateau and their impact on meso-scale disturbances in the Meiyu/Baiu frontal zone[J]. *J Meteor Soc Japan*, 84(4):783-803.
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al, 2007. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. *Geophys Res Lett*, 34(13):L13703.
- Zhang R H, Ni Y Q, Liu L P, et al, 2011. South China heavy rainfall experiments (SCHeREX)[J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 89A:153-166.
- Zhang W G, Xu G R, Xi B K, et al, 2020. Comparative study of cloud liquid water and rain liquid water obtained from microwave radiometer and micro rain radar observations over Central China during the monsoon [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(20):e2020JD032456.
- Zhao K, Huang H, Wang M J, et al, 2019. Recent progress in dual-polarization radar research and applications in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 36(9):961-974.
- Zhou L L, Dong X Q, Fu Z K, et al, 2020. Vertical distributions of raindrops and Z-R relationships using microrain radar and 2-D video disdrometer measurements during the Integrative Monsoon Frontal Rainfall Experiment (IMFRE) [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(3):e2019JD031108.
- Zhou Z M, Du M Y, Hu Y, et al, 2024. An evaluation and improvement of microphysical parameterization for a heavy rainfall process during the Meiyu season[J]. *Remote Sens*, 16(9):1636.