

2000年以来我国长江中游区域暴雨研究进展

崔春光 林春泽 王晓芳 李俊 彭涛 张文刚

(中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 长江中游地区是暴雨多发区和重灾区, 深入认识该区域暴雨形成的中、小尺度天气系统、分析暴雨发生机理与发展暴雨、洪水预报技术, 对于我国防洪减灾具有重要意义。针对长江中游区域暴雨从观测到资料分析、机理研究, 再到数值预报与水文应用研究, 重点从暴雨外场观测试验及资料反演和中尺度资料融合技术、长江中游暴雨MCS(中尺度对流系统)观测分析和理论研究、中尺度暴雨数值模式研究和长江中游水文气象耦合的暴雨洪水预报系统四个方面介绍了2000年以来我国科研业务单位的主要研究进展, 并对制约长江中游区域暴雨研究深入与预报水平提高的主要问题进行了简要讨论, 对未来的研究趋势进行了展望。

关键词: 资料融合, 中尺度对流系统, 水文气象耦合

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.001

Review of the Study on Heavy Rain in the Middle Reaches of the Yangtze River Since 2000

Cui Chunguang, Lin Chunze, Wang Xiaofang, Li Jun, Peng Tao, Zhang Wengang

(Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China

Meteorological Administration, Wuhan 430074)

Abstract: The middle reaches of the Yangtze River are frequently-occurring heavy rain areas. It is important to have the knowledge of heavy rain mesoscale and small-scale weather systems in these areas, their mechanism, and develop the heavy rain and flood forecasting technology for the flood control and hazard mitigation. From the heavy rain field observation experiment, data inversion and fusion technology, observation analysis and theoretical research on heavy rain mesoscale convective systems, the mesoscale numerical model, and the hydrometeorological coupling rainstorm and flood forecasting system which are the most crucial aspects of observation data analysis, mechanism, numerical prediction, and hydrological application of the study on heavy rain in the middle reaches of the Yangtze River, the main research progress has been briefly reviewed in China since 2000. The problems which obstruct the research depth and forecast quality were also discussed. Finally, the research development tendency was prospected.

Key words: data fusion; mesoscale convective systems; hydrometeorological coupling

1 引言

长江中游是我国暴雨频发区域, 受中高纬西风带环流系统、亚洲季风系统以及高原东移低值系统的共同作用, 每年5到9月, 暴雨过程频繁, 且持续时间长, 时空分布不均, 既有梅雨期的大范围持续性降水, 也有盛夏局地突发性强降水, 所造成的灾害重、损失大。对长江中游影响最大主要降水集中在每年6月中旬到7月中旬, 即长江梅雨期, 该时期长江流域是极地冷空气和热带暖湿空气频繁交汇的地带, 梅雨

锋上的中尺度天气系统活跃, 它们的活动不仅维持了梅雨期持续性的降水, 而且给暴雨的产生创造了十分有利的条件^[1]。暴雨是由中小尺度天气系统直接造成的, 但它的发生发展是多尺度环流和天气系统相互作用的结果, 因而暴雨形成是一个十分复杂的问题^[2]。长江中游区域长江、汉江东西横贯, 洞庭湖、鄱阳湖水系密布, 大小水库众多, 是我国防汛的关键区域。因此长江中游区域暴雨尤其是梅雨锋暴雨的研究受到国内外气象学者和我国科研、业务机构的广泛关注和高度重视, 在国家和地方各类科研项目的推动下, 研究工作取得了明显进步。本文对2000年以来我国长江中游区域暴雨研究进展做一些概括性归纳和总结, 重点从暴雨外场观测试验及资料反演和中尺度资料融合技术、长江中游暴雨MCS观测分析和理论研究、中尺

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2014年1月20日
第一作者: 崔春光(1964—), Email: Cgcui@whhr.com.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106006、GYHY201206028), 国家自然科学基金(40930951)

度暴雨数值模式研究和长江中游水文气象耦合的暴雨洪水预报系统四个方面进行介绍，并对制约长江中游区域暴雨研究深入与预报水平提高的主要因素进行讨论，对未来开展的重点工作与研究趋势进行了展望。

2 暴雨外场观测试验及资料反演和中尺度资料融合技术

2.1 暴雨外场观测试验

由于引发暴雨的中尺度对流系统具有一定的频发性、突发性以及较小的时空分辨率，使得常规气象观测难以捕获，因此在重点区域开展中尺度暴雨研究的外场观测试验以获取中尺度暴雨三维结构信息对于深入研究暴雨形成机理与提高暴雨预报水平尤为重要。1998年长江流域大洪水以来，国内开展了多次暴雨野外观测试验。如国家973“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”2001—2002年汛期开展的长江中下游暴雨外场观测试验以梅雨锋内中尺度暴雨为主要观测对象，获取了大量暴雨过程实时加密资料，极大地推动了长江梅雨锋暴雨中尺度研究和预报^[3]。国家973“我国南方致洪暴雨监测与预测理论和方法研究”于2008年、2009年5月1日—7月20日实施了我国南方暴雨野外科学试验^[4-5]，该观测试验是迄今为止国内在单一项目支持下规模最大、装备最为先进的一次暴雨外场观测试验，对我国汛期雨带的主要影响区域及其北抬的完整过程实施加密观测，涉及四个观测区和十三省两市，几乎覆盖整个长江以南地区。投入的设备有55部雷达，48部探空，7000个地面观测站，以及特种设备如C波段和X波段双偏振多普勒雷达与8

毫米波云雷达，组织的多雷达组网观测获取的资料为分析研究暴雨云内水凝物分布、发展对流云微物理过程提供了良好基础，并首次在外场观测试验中实施了机载下投式探空观测，获取了近40条气象廓线的观测资料。

在前述两个973项目支持下开展的暴雨外场观测试验，是国内无论从观测、分析到应用都较为先进的 β 中尺度暴雨加密观测试验，尤其是在多遥感途径联合观测、新型装备研制与中试、高时空分辨率的中尺度气象分析场生成等方面进行了有力探索，武汉暴雨研究所作为主要参与单位之一，在此过程中逐步打下了坚实的设备与技术基础。2002年至今，武汉暴雨研究所依托气象业务观测网，在气象灾害频发的长江中游地区建设具备高密度水汽监测、高空观测、云观测、边界层观测、定量降水估算校准观测等功能的 β 中尺度暴雨监测外场试验基地（见图1），目前已建成了咸宁、武汉、荆州三个探测基地，与黄石、孝感、荆门、仙桃、神农架、黄冈等多个观测点，在长江中游初步形成了点面相结合的观测布局。基地探测设备包括不同类型和功能的车载雷达、边界层廓线雷达、GPS移动探空系统、微波辐射计、地基GPS/MET站、激光雨滴谱仪、神农架高山梯度气象观测网等。此外，各个基地还设有业务天气雷达、业务高空探空站、自动气象站、雨量站等多种常规观测设备，可对长江中游重要暴雨天气系统的风场、水汽场、降水场、云和降水粒子相态分布进行固定的实时综合观测。2010—2013年汛期，武汉暴雨所在基地内组织多次长江中游梅雨锋暴雨多遥感途径联合观测试验，成

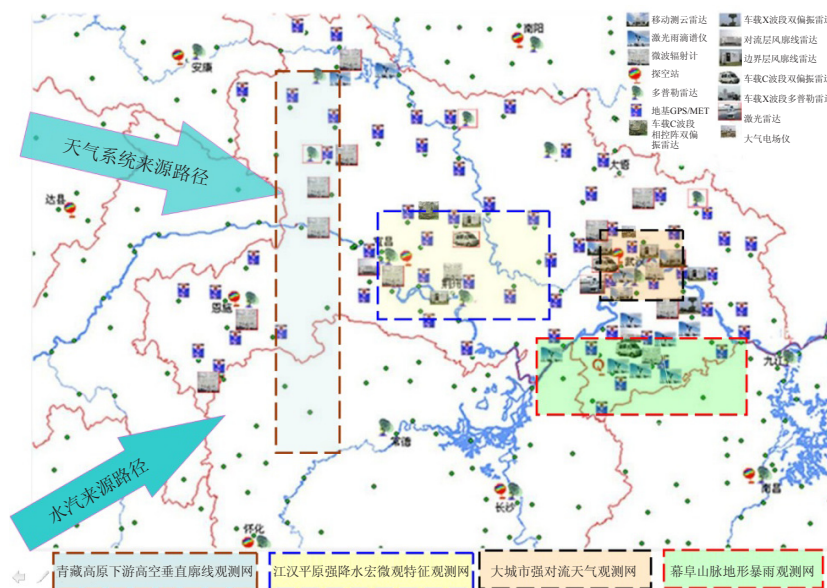


图1 长江中游暴雨监测外场试验基地区域示意图

功捕捉了多次梅雨期重要天气过程，积累了大量多途径高精度同步观测资料，有效推动了暴雨监测预警技术、暴雨机理、暴雨预报等方面研究工作的开展。

2.2 资料反演技术

气象卫星和雷达是目前遥感探测暴雨的两种主要手段，在暴雨的监测预警中发挥了重要作用，但其探测得到的基本信息远不能满足暴雨分析的需求，为了得到更多有效的信息，资料反演技术应运而生。科学有效的反演技术能够准确地解译遥感资料中包含的暴雨相关信息，对分析暴雨的发生及发展机制、改进和提高暴雨的预报水平有非常重要的意义。

目前对于暴雨的分析预报具有重要指示作用的参数包括风场、温度场、云特性等，能够详细描述暴雨云团的动力及热力形成条件、云团特征等信息。基于单多普勒雷达和静止卫星云图的风场反演已有数十年历史，其反演技术已比较成熟，随着遥感技术和数学方法的不断发展，数值微分方法和正则化方法被用来提高云导风的反演精度^[6]，取得了理想的效果。基于雷达风场反演的基本算法，国内外许多学者对其进行了改进^[7-9]，一定程度上提高了反演精度，但距离业务使用还有一定差距，因此变分法和多雷达风场反演方法被提出。通过比较验证发现，变分法对于风场反演具有较高精度，四维变分法能够反演得到低层风场信息^[10]，刘黎平^[11]采用三维变分法实现了双多基地多普勒雷达系统三维风场的有效反演。利用双多普勒雷达同步观测，得到两个方向的径向速度资料，再与其他约束条件结合就可以得到风场的三维结构^[12]，罗昌荣等^[13]利用该方法有效地分析了台风外围强带状回波风场结构特征。彭亮等^[14]将小粒子示踪法用于3mm多普勒雷达云内空气垂直速度的反演。Rosenfeld提出的卫星微物理反演分析方法，对于云的微物理特征的获取提供了非常有效的方法，该方法已在NOAA^[15-16]、FY^[17-19]、MODIS^[20]等卫星资料分析中应用，得到了云的微物理及垂直结构特征。根据Z-qr关系及定常暖云方案，利用雷达反射率因子可以对云的微物理量进行反演^[21]。刘黎平等^[22]利用地基Ka波段雷达探测的回波强度、粒子下落速度和速度谱宽数据，在忽略空气上升速度和湍流对雷达观测的速度谱宽的影响前提下，对云液态水含量及滴谱参数进行了反演，并与机载探测数据进行了对比，结果显示两者结果比较一致。大气温度及湿度廓线的探测主要利用星载大气探测仪，其中ATOVS是具有代表性的一种，采用一维变分技术，同时对辐射传输方程做扰动处理，对大气廓线的反演效果较好^[23-24]。最小方差算法被用于NOAA/

AMSU资料海面大气温度垂直廓线的反演，并明显提高了对流层大部分区域的反演精度^[25]，而利用特征向量统计反演算法由MODIS资料同样可以反演得到大气温湿廓线^[26]。王曦等^[27]利用FY-3A微波辐射计亮温数据，通过建立适用于微波波段的物理迭代算法，反演得到了晴空海域的大气湿度廓线。王祥等^[28]利用FY-3A卫星近红外波段资料，分别利用双通道比值法与三通道比值法反演了大气水汽含量，并与实测数据进行对比，发现三通道比值法精度更高。经过长时间的积累和不断改进，资料反演技术较之前取得了明显提高，但其中仍存在一些问題，例如单雷达风场反演算法主要以科研为主，目前还无法达到普适性，难以业务化应用，卫星资料反演主要针对海洋区域，对受复杂地形影响的陆地区域难以开展有效的反演等。随着计算机水平及传感器探测精度的提高，资料反演技术必将会越来越高效，探测资料中更多的有效信息将会被解译，为暴雨的分析研究提供帮助。

2.3 中尺度资料融合技术

随着我国中尺度观测系统的建设与完善，卫星、雷达、微波辐射计、GPS、风廓线仪等非常规观测手段日益丰富，所获取的高时空分辨率的探测资料为暴雨中尺度系统的深入分析和预报能力的提高提供了可靠保证，然而这些非常规资料各自独立，且能提供的直接产品大多采用形态学（如回波形状、云图形态）来做定性分析，对中尺度暴雨系统结构特征分析十分有限^[5]。中尺度资料融合技术可以将分布在全国的地面站观测要素，连同来自卫星、雷达、微波辐射计、GPS、风廓线仪等的各种资料融合成整体，形成包含丰富中尺度信息的中尺度分析场，并可为中尺度数值模式提供高质量的初始场。这为解决多源非常规观测资料在暴雨中尺度天气分析与预报中有效应用的难题提供了一个有效手段。

20世纪90年代以来，国际上普遍采用资料同化技术综合处理各类气象观测数据来重建长期而连续的格点再分析资料，并逐渐使用变分同化取代了最优插值技术，以四维变分同化为基础的集合—变分同化和混合资料同化技术更是成为了未来资料同化的主流发展方向^[29]。近10年，我国资料同化技术取得了长足进步，但依然缺少系统的中尺度资料融合分析工具。武汉暴雨研究所于2005年与美国NOAA下属的地球系统实验室合作引进了局地分析系统（LAPS），并成功进行了本地化开发，完成了LAPS系统对我国探空资料、地面资料、多普勒雷达资料等的融合同化^[30]。LAPS系统的基础算法是在背景场基础上采用

距离权重插值得到网格点值, 然后对气温、气压、风的关系采用三维变分进行约束, 对垂直水汽分布采用一维变分进行约束。早在1996年LAPS系统已为夏季亚特兰大奥运会提供服务^[31]。GOES卫星辐射资料、GPS水汽等资料同化进入LAPS系统后提高了LAPS系统的水汽分析能力^[32]。武汉暴雨所结合暴雨过程对雷达资料、GPS水汽资料的应用开展了相关研究^[33-34]。国家973“我国南方致洪暴雨监测与预测理论和研究方法”利用由武汉暴雨所引进的LAPS分析系统, 融合了2008—2009年5月1日—7月20日我国南方暴雨野外科学试验期间所获取的华南、华中、江淮和长三角观测区加密观测探空资料、多普勒雷达资料和地面资料, 生成了水平分辨为5km, 时间分辨为3h的LAPS中尺度分析资料, 批量检验结果表明, LAPS生成的中尺度分析系统能抓住80%以上引发暴雨过程的中尺度影响系统, 尤其对 α 中尺度或 β 中尺度系统具有较好的中尺度再现能力, 对于观测区域内由 β 中尺度低涡东移及切变线引成的暴雨过程, LAPS中尺度分析场均能很好地再现其中尺度影响系统的发展演变过程, LAPS中尺度分析场的位势高度、温度、相对湿度、风向和风速的分析误差均在观测误差范围内^[5]。目前在武汉暴雨所业务运行的LAPS系统, 融合了长江流域30多部雷达资料及卫星、GPS、自动气象站等资料, 实现大范围雷达资料的综合应用, 提供3h更新5km分辨率垂直21层近40种物理量的中尺度气象分析场(见图2)。NOAA新开发的变分LAPS系统(VAR-LAPS), 是基于多重网格法上的变分同化系统, 具有传统LAPS系统计算速度快等优点, 并可灵活地在不同的网格上使用不同的约束条件以达到最优的效果^[35]。VAR-LAPS利用多尺度变分技术解决了旧版本在客观分析中平衡与约束不能同时应用、遥感观测数据没有最佳融合、交叉变量协方差不能直接应用等问题。Li等^[36-37]利用该系统开展多普勒雷达资料同化

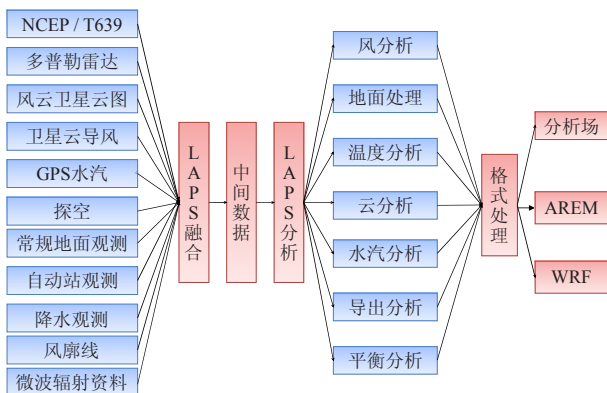


图2 武汉暴雨研究所LAPS系统流程图

对中国海域海温的预报。武汉暴雨所正在开展VAR-LAPS对新型探测资料如风廓线、GPS水汽等的融合同化试验研究。VAR-LAPS作为中尺度资料融合支撑系统将在建立更优暴雨中尺度分析场数据集与提高数值预报模式初始场质量等方面有着广泛的应用前景。

3 长江中游暴雨MCS观测分析和理论研究

3.1 长江中游MCS的观测特征

产生暴雨的MCS雷达回波上呈现了多种多样的组织结构形态, 王晓芳等^[38]将MCS分为线状和非线状, 其中线状又分为8个确定的类型(TS、LS、PS、BL四类MCS为移动型, 而BB、TL/AS、EL、LL四类MCS是准静止的), 而非线状的MCS组织结构特征不显著, 主要是大片回波中嵌有或多或少的无组织强对流回波。Zheng等^[39]通过研究我国中东部地区的MCS, 考虑到线状弓形回波对流和层状对流易造成大风等剧烈天气, 将弓状回波(BE)和无层状降水的随流线(NS)单独分类。爬线是产生剧烈天气的中尺度对流系统, 最近孟智勇^[40]对我国东部的爬线特征也进行了研究。

MCS常形成在有利的天气尺度条件下, 如副热带高压、热带气旋、中高纬度槽前、冷涡、槽后等, Meng等^[40]统计发现有三分之一的爬线形成于短波槽天气形势下。当副热带高压、中高纬度冷空气活动、高原中尺度系统东移、南海季风涌等多尺度天气系统的协同作用在这些系统处于活跃期时, 梅雨锋上出现暴雨, 但并不是整个梅雨锋带上普降强降水, 降水还存在不均匀性, 这说明降水强弱还与局地的气象条件特别是垂直风切变密切相关^[41-43]。根据实际个例分析和数值模拟, 总结几类线状MCS的结构模型, 并探讨了它们发生发展的可能机制^[44-45]。

长江流域线状MCS多形成在长江两岸附近, 在宜昌至武汉沿江两岸、湖南东北部是MCS的高发地, 其次为重庆沿江北部、重庆南部至鄂西、大别山两侧、湖南和江西交界山区, 沿地形的低洼地和河谷平地是MCS的多发地。MCS移动路径为东、东偏北、东偏南、南四种, 这与环境场的引导气流有关, MCS日变化活动特征表现为多锋型^[38, 46], MCS生命史较长, 水平尺度大, 日落减弱, 午夜再度发展, 即湿对流。陈炯等^[47]分析中国暖季短时强降水特征, 发现它与MCS的日变化特征一致。祁秀香等^[48]统计得到2007年夏季我国大陆深对流活动主要集中在4个区域, 除华南沿海地区外, 其余三个: 青藏高原, 云贵高原东部及四川、重庆, 江淮流域等都是中纬度带区, 江淮流域深对流日变化也呈多峰型且明显东传。

3.2 MCS 的理论研究

胡伯威^[49]用一个包含简单积云对流参数化的线性模式讨论在长江流域相当正压性质的梅雨锋上深厚惯性重力波的发生、传播和频散性质，发现与积云对流加热场有最密切关系的低层湿度条件及其水平分布不均匀性质都对扰动的波速和稳定度有重要影响，最有利出现不稳定发展的地方是在“低层湿度锋区”南界附近，因此这里是中尺度对流系统（MCS）的活跃地带。关于频散性质的分析表明，能允许群速度大于相速度的低层湿度条件及其水平分布的特征值范围比较宽。而在上述稳定度接近中性的条件下最有利于出现沿“湿度锋区”轴向的上、下游效应。这个结果也许能很好地解释：在梅雨锋上，恰恰是当一个旺盛的MCS达到顶点而开始趋向衰减时，在它的上、下游很快发展起新的MCS，新、旧MCS一起形成“云团波串”这样一个重要而有趣的观测事实。同样在虚拟高度坐标系中，水平风切变强度不均匀分布对CISK惯性重力波不稳定有重要作用。在一般干的层结大气中，实际可能出现再强的水平风切变的影响也难以使惯性重力波变得不稳定；只有在积云对流潜热参与，原为弱稳定条件下，水平风切变强度不均匀能促使低空急流北侧不稳定扰动的发生发展。而水平风切变强度不均匀对不稳定贡献最大的区域是梅雨锋南侧的急流轴附近^[50]。

许小峰等^[51]进一步研究了湿度锋上中尺度对流系统生成和维持的惯性重力波捕获和增长机制（图3）。陈志明^[52]基于位涡异常与中尺度对流系统发展密切相关的分析事实，在引入水汽变化方程的基础上，通过定义相当湿位涡，导出了非均匀饱和大气中的相当湿位涡方程，

$$\frac{d\zeta}{dt} = \lambda f \frac{L}{c_p T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} / \frac{\partial \theta^*}{\partial z} \right) (-V_g \cdot \nabla_h q),$$

由于 $\lambda f \frac{L}{c_p T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} / \frac{\partial \theta^*}{\partial z} \right) > 0$ ，可以看出，在有正水汽平流

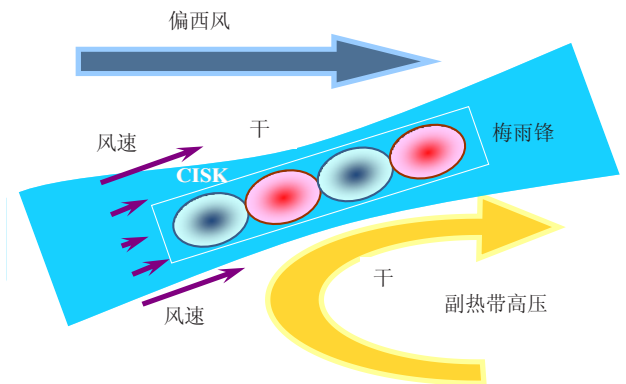


图3 湿度锋上云团波串发生发展示意图^[51]

$(-V_g \cdot \nabla_h q > 0)$ 的区域，将促进正涡度增长 $(\frac{d\zeta}{dt} > 0)$ ，有利于中尺度气旋涡加强，起到对流组织化的作用。反之，则不利于中尺度低值系统活动。

关于MCS中对流单体的触发和组织，国外已有一些比较成熟的理论，如RKW理论^[53]，当冷丘产生的负涡度环流与切变正涡度环流近于平衡，那么入流空气便可垂直地上升对对流是有利的。一个强的、长生命期的爬线系统应该在环境风场与对流的相互作用处于一种最佳状态中出现，这种最佳状态可概括为：对流上升运动可以使对流有效位能充分释放，而不被冷丘或切变产生的环流所干扰，即 $C/\Delta U \approx 1$ 。“RKW”理论不仅用在解释爬线结构，后来Parker等^[54]也用它来很好地解释其他线状对流系统如LS MCS的结构特征。Parker^[55]进一步指出，PS MCS的后向建立和平行于对流线降水的发展很大程度上是由环境风垂直切变造成，高层平行于对流线的气流对水物质的输送是平行层状降水形成的重要原因。

Bao等^[56]用理想二维数值模拟探讨了风暴中新生单体产生的两种不同的机制，一种在Rotunno提出的“最优切变态” ($C \approx \Delta U$) 下新单体在地面冷丘和阵风锋附近分离产生；另一种在“亚最优切变态” ($\Delta U < 0$, 即 $C > \Delta U$) 下，由于环境风场存在反向切变，此时密度流产生的水平涡度要大于环境风切变产生的水平涡度，密度流将向外扩展较快，使两者处于“亚最优切变态”，此时多单体雷暴系统中的新对流单体不再是从密度流前沿的阵风锋前上升气流分离出来，而是由发展旺盛的主体对流体在其前部中低层激发的垂直上升运动引起的。

3.3 中尺度地形对 MCS 的影响

长江中游地区多中尺度地形，长江中游暴雨尤其是（特）大暴雨的发生，与这些地形密不可分。在估计山脉迎风坡降水方面，早期Smith^[57]提出的简单线性模型降水率的大小由水汽混合比、正交于山脉的风速大小和地形梯度决定。之后，考虑了云微物理过程中云水—雨水的转化时间、雨水下落时间对地形降水的影响^[58-59]。当湿大气地形费劳德数 $Fr \gg 1$ 或者 $Fw \gg 1$ 时，气流爬过山脉产生的水平扰动小，线性理论对地形降水能做出较好的解释；当 $Fr \ll 1$ 或者 $Fw \ll 1$ 时，气流发生水平扰动大，线性理论很难再适用^[60]。地形阻滞效应限制了该模型的应用^[61-62]。

赵玉春等^[63]根据长江中下游中小尺度地形特征和梅雨锋上MCS发展的典型探空曲线，设计理想数值试验来研究中尺度地形对流降水模态，探讨了不同地形

高度、尺度、形状（水平形态比）、环境气流以及旋转效应对降水模态和分布的影响，发现地形重力波破碎触发对流是地形对流降水的主要机制之一，地形重力波的形成、特征和传播受到环境条件制约，也受到地形自身参数的影响。单一的地形动力参数不能完全决定地形对流降水的模态。同时，在天气系统发展的不同阶段，地形相对于对流暴雨系统的位置不同，地形对暴雨对流系统的影响存在着差异^[64]。廖移山等^[65]通过对一次特大暴雨过程的天气学机理分析，探讨了冷空气与复杂地形的交叉阻挡对暖湿气流的强迫抬升作用。地形对暴雨对流系统的影响还值得进一步研究。

4 中尺度暴雨数值模式研究

4.1 中尺度暴雨数值模式发展概述

武汉暴雨所自20世纪80年代开始发展降水模式的研究和业务工作，先后发展了华中暴雨数值预报准业务系统（简称CRONWS）、暴雨中尺度分析预报系统（简称MAPS）等，1999年开始，与中科院大气所合作，在国家“973”项目的支持下，基于LASG“REM”模式，发展了新一代暴雨数值模式系统AREM^[66]，采用 η 坐标，抓住了东亚区域的地形特点^[67]，充分考虑暴雨模式中水汽等要素的强梯度分布特征，设计了两步正定保形水汽平流方案^[68]，设计了独特的E网格“半格距差分方案”，保证了模式运行效率、精度和稳定度等特点^[69]。2007年，在行业专项的支持下，针对制约暴雨模式发展的多源资料利用、资料同化、物理过程等关键技术开展了研究，在原有简单初值系统（客观分析）的基础上，发展了先进的多源资料融合技术、四维变分同化技术等，发展了冷云微物理方案，改进和完善了模式边界层、陆面物理过程等方案，同时建立了快速循环预报系统和集合预报系统等，暴雨的定量预报水平得到了显著提高。

4.2 资料同化技术

李红莉等^[30, 33-34]开展了多普勒雷达、风云二号卫星云图、GPS水汽、风廓线雷达、微波辐射计、自动站、地面降水等多源观测资料的同化应用研究，并实现了上述多源观测资料在同一个平台进行同化，并开展了相应的数值预报试验。结果表明，融合同化雷达径向风资料能显著改善中尺度风场结构，GPS水汽资料能调整分析区的湿度场，风廓线雷达能调整风场结构、微波辐射计主要通过反演相对湿度廓线调整模式的湿度场。地面资料是资料同化中的难点，在解决稠密地面资料在模式中的应用方面，武汉暴雨研究所发展了一套降水资料的一维变分同化技术，通过反演大

气温、湿廓线调整模式的初始场^[70]。以上多源资料的融合均明显增加了模式初始场的中尺度信息，进而提高了模式对强降水的预报能力。

此外，武汉暴雨研究所与地球流体力学数值模拟国家重点实验室合作，发展了一种新的快速有效的四维变分资料同化方法——基于历史拟合投影技术的四维变分同化方法（HSP-4Dvar），该方法解决了国际上经典四维变分中B矩阵低估和奇异处理困难的难题，同时克服了经典四维变分依靠伴随模式和计算量巨大问题，不仅提高了四维变分同化的精度，同时计算时效节省20倍^[71-72]。

近年来，适应性观测成为数值预报领域发展的热点，武汉暴雨研究所利用WRF模式的伴随同化系统，开展了短期预报误差对观测资料的敏感性研究，该研究可为提高资料同化效率、优化观测网络以及开展目标观测试验提供科学依据。

4.3 中尺度模式关键物理过程的改进

在物理过程改进中，重点考虑了那些对中尺度暴雨过程短期预报有重要影响的物理过程，主要包括显、隐式网格尺度云和降水过程、积云对流过程、边界层过程以及地-气交换过程等。在新发展的冷云微物理过程中，考虑了包括水汽、云水、云冰、雨水、雪5种不同相态水物质，以及各种凝结水物质之间凝结/蒸发、凝华/升华、冻结/融化、集聚和碰并等25种复杂的云微物理过程，更好地描述了暴雨成云至雨的变化过程。通过网格变换和变量变换，解决了MYJ方案与AREM模式的匹配问题，通过对边界层观测资料的研究，用更能合理反映地表湿度的变化的通量方案替代了蒸发方案^[73]。在引进Wang云微物理过程的基础上，修改了冰核的数密度以及雹的截获参数，并对时间尺度的公式进行了修改，改进了对台风和热带、副热带降水的描述能力。此外，通过陆面物理过程引入，改进了模式对下垫面强迫（包括感热，潜热）的估计，从而改进模式预报效果^[74-75]。

4.4 快速更新循环预报技术

在LAPS云分析技术的基础上，武汉暴雨研究所发展了一套3h快速更新同化预报系统（AREM-RUC）^[76]。该系统于2009年5月下旬投入准业务运行，AREM-RUC每3h更新同化一次，实现了多普勒雷达、加密自动站、GPS水汽等局地高频资料在模式中的应用，这对及时捕捉大气变化和中小尺度天气系统、提高降水预报准确率有重要意义；同时热启动技术的加入^[77]，有效地抑制了模式的SPIN-UP现象，使模式在短时预报上的应用成为可能。AREM-RUC成

功预报出湖北汛期多次强降水过程，TS评分表明，该系统明显高于原有的模式系统^[78]，特别是在大雨、暴雨、大暴雨等强降水等级。

4.5 暴雨集合预报技术

暴雨对模式的初值和物理过程都非常敏感，初值扰动的结构比扰动的大小更重要^[79]，精细的小尺度扰动可以改进对强降水的集合预报^[80]。在对物理过程扰动的研究中，初步的结果表明随机物理过程方法更适合于接近正压的暖湿环境中的梅雨锋暴雨。此外还开展了基于集合敏感性的目标观测以改进暴雨预报的研究。图4给出了针对一次西南低涡东移过程的集合敏感性试验，通过改善敏感区中敏感因子（水汽和风场）的观测可以改进对西南低涡的路径预报，结果表明，集合预报在认识暴雨机制、开展目标观测方面的潜在用途^[81]。基于Breeding方法，2009年建立了11个成员的中尺度集合预报系统，提供降水概率等级和预报产品，检验结果表明，由于能提供更多预报信息，集合预报系统优于单一的确定性预报，能有效提高对暴雨预报决策的科学性^[82]。

4.6 暴雨数值预报业务支撑系统

基于以上研究，武汉暴雨研究所建立起了相对完善的区域数值预报体系，其中包括资料融合系统、确定性预报系统、快速更新循环和集合预报系统等。此外，针对精细化预报的需求，建立了基于WRF3.4模式的精细化预报系统，采用WRF3Dvar，目前以上系统均已实现业务化运行，在预报业务中发挥着技术支撑作用。

5 长江中游水文气象耦合的暴雨洪水预报系统

长江中游河流、水库、湖泊众多，汛期防汛形势紧张，迫切需求水文气象耦合的暴雨洪水预报系统来

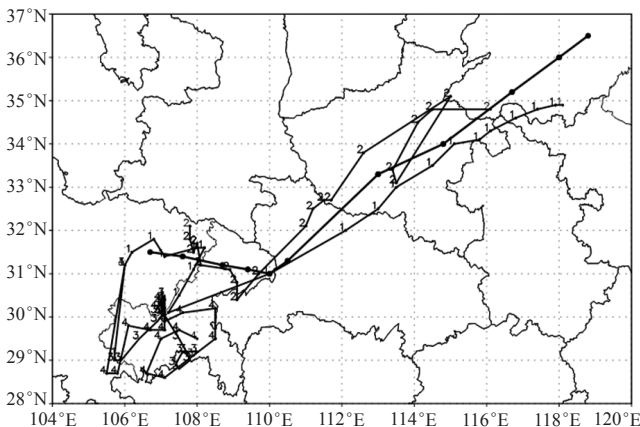


图4 改进敏感区观测后的低涡路径预报试验（标识1和2的点名分别为改进水汽场和风场的低涡预报路径）

开展预报与防汛决策服务。提高洪水预报精度和延长预见期，必须从提高降雨估算精度开始，结合降雨预报，采取流域降雨径流模型和河道洪水演算模型的途径来实现。早在30多年前，陈金荣等^[83]从长江流域防洪的丰富实践中对水文气象预报已做了精辟而深刻的论述，指出气象预报同水文预报的结合为防洪和水库调度等工作，带来巨大的优越性和必要性，是水文预报发展的必然趋势。文中阐述的基本思想在水文气象预报技术已有许多新的发展和进步的今天，仍然具有指导意义。当前，气象模式和水文模型分别是气象和水文领域里最先进的工具，水文模型与气象模式耦合开展洪水预报必然成为未来发展的方向。

5.1 降水降尺度技术

洪水预报中充分有效地利用天气预报及气象信息，其首要任务就是解决降水信息场与水文模型之间的时间和空间尺度上匹配的问题，缩小两者的尺度差异，寻找水文气象结合的契机。为了有效地提高定量降水估算预报产品在水文预报中的应用，国内外学者从雷达资料同化、模式嵌套、高分辨的区域数值模式、动力释用技术等多方面系统地开展了降尺度方法研究。

5.1.1 观测降水降尺度

基于新一代多普勒雷达探测技术和雨量计实测资料，采用卡尔曼滤波、最优插值、变分、统计权重等多种校正方法，研发高分辨的定量降水估算校正技术^[84-85]。万玉发等提出了一种基于准同雨团样本概念的雷达与雨量计实时同步结合的降雨估算新技术^[86]。

5.1.2 预报降水降尺度

基于中尺度数值模式通过资料同化、模式嵌套、动力释用、空间统计等技术提高定量降水预报精度，提高降水分辨率，缩小了天气模式与水文模型网格尺度的差异。例如，中国气象局武汉暴雨研究所利用数值模式动力释用降尺度技术将强降水构成分解为大尺度降水、不稳定降水和地形影响降水，基于AREM模式利用高分辨率（2km×2km）的地形因子（海拔高度、坡度、坡向等）诊断数值模式预报降水，建立精简实用的动力释用降尺度模型，开展试验流域降水预报降尺度试验，获取高时空分辨率（1h、2km×2km）的数值模式降水预报信息^[87]。

5.2 水文气象耦合技术与实践

水文气象耦合技术主要是利用气象业务中雷达估算降雨及数值预报降雨技术来刻画水文模型的输入场，以改变目前水文模型中降雨量估算的落后方式，进一步提高降雨场估算和预报的时空精度，从而提高洪水模拟预报水平。

5.2.1 雷达定量降水估算 (QPE) 与水文模型的耦合

雷达估算降水有时空分辨率高的优点, 可以比较客观地反映降水量相对大小的分布趋势。许继军等^[88]、彭涛等^[89]利用武汉、宜昌天气雷达资料结合水文模型对三峡库区清港河、香溪河、白莲河等流域进行了水文预报试验, 结果表明: 利用雷达估测降雨, 与水文模型相匹配, 较好地发挥了二者在表现降雨空间分布变化方面的优势, 能够有效地提高洪水预报精度。

5.2.2 定量降水预报 (QPF) 与水文模型的耦合

目前, 定量降水预报 (QPF) 应用于水文预报模型是被水文气象学界普遍认同的发展方向之一。为此长江水利委员会、武汉大学、武汉暴雨所已开展过相关试验: 杨文发等^[90]考虑预见期内的降水预报信息, 采用降水预报与洪水预报耦合的方法, 对1998年汛期发生在长江上游三峡区间的一次暴雨洪水过程进行了预报试验; 李超群、郭靖等^[91-92]基于数值模式定量降水预报产品构建了清江隔河岩、汉江丹江口流域的水文气象耦合模型, 开展洪水预报的研究; 崔春光、彭涛等^[93-94]基于中尺度数值模式 (AREM) 将定量降水预报及其降水集合预报产品引入洪水预报领域, 延长了洪水预见期, 提高了洪水预报精度, 拓展了洪水不确定性预报的新方法。

5.3 水文气象耦合的暴雨洪水预报系统

洪水预报系统是在计算机上实现洪水预报联机作业的运行系统, 它靠快速、准确地收集、存储和处理水情、雨情, 通过各种专业数学模型进行洪水预报, 从而及时、准确地做出洪水流量过程的预报, 提高了洪水预报的时效性和精确度。

5.3.1 中国洪水预报系统

在我国, 洪水预报系统研制始于1985年, 至20世纪90年代中期, 我国从无到有基本上普及了洪水预报系统。当前, 洪水预报系统研制进展较快, 已开发了具有中国特色的专家交互式洪水预报系统。水利部水文局开发的“中国洪水预报系统” (CNFFS) 和长江委水文局开发的“WIS水文预报平台” (WISHFS) 便是代表性的成果。中国洪水预报系统采用C/S结构, 以全国统一的实时水情数据库为依托, 以地理信息系统为平台, 能方便地构建五类洪水预报方案, 具有标准的、通用的预报模型方法库, 可任意选择多模型、多方法制定预报方案, 具有人工和自动优选结合的模型率定功能, 具有定时预报和人机交互预报功能, 可干预任何信息源和预报过程, 具有全面完善的系统管理功能等, 已在25个流域机构和省 (直辖市、自治区) 的水文部门推广应用^[95]。

5.3.2 流域水文气象实时预报系统

近几年, 中国气象局武汉暴雨研究所在GIS技术以及高分辨的DEM数据的支持下, 基于定量降水估算 (QPE)、定量降水预报 (QPF)、水文预报模型和实时洪水预报技术, 通过雷达测雨技术、中尺度暴雨预报模式技术获取高时空分辨率的水文资料 (降雨等) 场输入水文模型来进行实时水文气象预报 (见图5), 基于Asp.net技术自主设计研发了web形式的流域水文气象实时预报系统, 并实现了与气象信息综合分析处理系统 (MICAPS) 有机融合, 研发了基于MICAPS系统平台的暴雨洪涝预报预警模块。目前系统成功应用于三峡库区、淮河王家坝、清江水布垭等12个流域^[96]。

6 讨论与展望

对近年来我国长江中游区域暴雨研究进展进行了回顾与总结, 得出制约该区域暴雨研究深入与预报水平提高的因素主要体现在以下几个方面。

(1) 已有的外场加密观测试验没有得到能清晰反映暴雨 β 中尺度对流系统三维动力热力结构、云微物理结构以及用于诊断分析其发生发展物理机制的加密观测资料, 更没有针对暴雨数值预报模式物理过程方案研发和改进进行有针对性的观测设计和野外观测试验。

(2) 长江中游处于复杂的中小尺度地形环境中, 且引发暴雨的中尺度对流系统存在着多种组织类型。不同复杂地形环境下、不同组织类型的暴雨中尺度对流系统启动、组织、发展、维持和消亡的主要物理机制是什么、之间存在着何种差异并不清楚。

(3) 基于高时空分辨率的卫星、雷达、GPS水汽、风廓线仪、微波辐射计以及地面加密自动站等多源观测, 众多资料亟待质量控制和最大效益的综合应

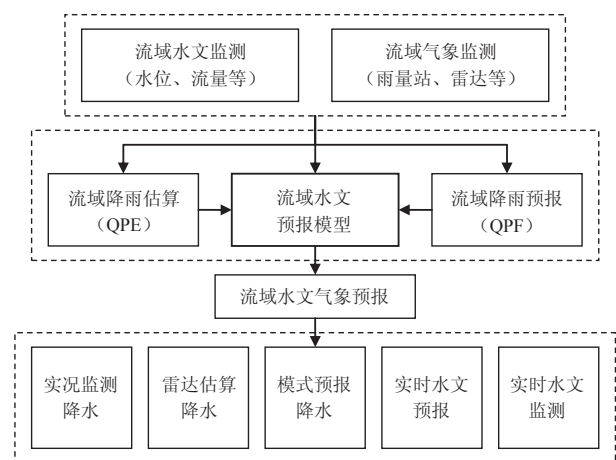


图5 流域水文气象实时预报结构及数据流程

用,尤其是卫星、雷达等高分辨率的遥感资料急需得到有效的融合和同化。区域暴雨数值预报模式中缺乏针对东亚天气特点和青藏高原大地形影响下模式物理过程的描述,对暴雨预报的不确定性研究不够充分。

(4) 水文预报模式和气象预报模式耦合技术研发进展缓慢,时空分辨率的差异导致气象模式与流域水文模型耦合效果不佳,定量降水估算产品在流域洪水预报中未能得到有效合理的应用。

针对上述问题,未来我国长江中游区域暴雨研究可重点开展以下几点工作。

(1) 开展青藏高原东侧及其下游关键区大气边界层科学试验、沿海雨锋切变线、低空急流带、水汽输送带剖面观测、深入内陆的台风暴雨系统野外科学观测,中尺度观测资料融合与反演技术。

(2) 重点研究水汽输送、对流扰动、大气日变化、地形以及惯性重力波等因子对暴雨中尺度对流系统发生发展的影响机制,揭示长江中游暴雨天气系统结构和形成机理。

(3) 开展多源探测资料的同化和云分析技术研究,发展高分辨率非静力暴雨数值模式系统与适合我国区域特色的模式边界层和云微物理过程方案。

(4) 突破以暴雨洪水为对象的水文气象耦合关键技术,建立长江中游干、支流水文气象预报系统。

参考文献

- 陶诗言,等.中国之暴雨.北京:科学出版社,1980.
- 丁一汇,张建云,等.暴雨洪涝.北京:气象出版社,2009.
- 倪允琪,刘黎平,高梅,等.长江中下游梅雨锋暴雨野外科学试验.北京:气象出版社,2004.
- 倪允琪,周秀骥,张人禾,等.我国南方暴雨的试验与研究.应用气象学报,2006,17(6):690-704.
- 崔春光,倪允琪,李红莉,等.中国南方暴雨野外试验(SCHeREX)中尺度气象分析场的建立及其质量评估.气象学报,2011,69(1):26-40.
- 龙智勇,石汉青,黄思训.利用卫星云图反演云导风的新思路.物理学报,2011,60(5):834-839.
- 周振波,闵锦忠,彭霞云,等.单多普勒雷达风场反演的扩展方法(1):方法与对比试验.高原气象,2006,25(3):516-524.
- 李华宏,薛纪善,王曼,等.多普勒雷达风廓线的反演及变分同化试验.应用气象学报,2007,18(1):50-57.
- 方德贤,刘国庆,董新宁,等.单多普勒雷达二维风场反演——Extended VPP方法.气象学报,2007,65(2):231-240.
- 牟蓉,刘黎平,许小永,等.四维变分方法反演低层风场能力研究.气象,2007,33(1):11-20.
- 刘黎平,莫月琴,沙雪松,等.C波段双多基地多普勒雷达资料处理和三维变分风场反演方法研究.大气科学,2005,29(6):986-996.
- 刘黎平.用双多普勒雷达反演降水系统三维风场试验研究.应用气象学报,2003,14(4):502-504.
- 罗昌荣,池艳珍,周海光.双雷达反演台风外围强带状回波风场结构特征研究.大气科学,2012,36(2):247-258.
- 彭亮,陈洪滨,李柏.3mm多普勒雷达测量反演云内空气垂直速度的研究.大气科学,2012,36(1):1-10.
- 刘贵华,余兴,戴进.不同积云微物理特征的卫星反演分析.南京气象学院学报,2009,32(1):17-23.
- 徐小红,余兴,朱延年,等.一次强飑线云结构特征的卫星反演分析.高原气象,2012,31(1):258-268.
- 戴进,余兴,刘贵华,等.一次暴雨过程中云微物理特征的卫星反演分析.气象学报,2010,68(3):387-397.
- 刘贵华,余兴,师春香,等.FY-3A/VIRR反演云微物理特征及与TERRA/MODIS反演结果的比较.高原气象,2011,30(2):461-470.
- 陈英英.利用FY-3A卫星云图对一次暴雨过程的特征云参数分析.暴雨灾害,32(1):24-31.
- Lensky I M, Rosenfeld D. Clouds-aerosols-precipitation satellite analysis tool(CAPSAT). Atmos Chem Phys Discuss, 2008, 8: 4765-4890.
- 刘红亚,徐海明,胡志晋,等.雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用 I:云微物理量和垂直速度的反演.气象学报,2007,65(6):896-905.
- 刘黎平,宗蓉,齐彦斌,等.云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比.中国工程科学,2012,14(9):64-71.
- 王颖,黄勇,黄思源.大气温湿廓线反演问题的研究.国土资源遥感,2008(1):23-26.
- 潘宁,郁凡.用一维变分法校正卫星资料反演地球大气湿度场的试验研究.地球物理学报,2009,52(12):2973-2986.
- 王静,赵朝方.最小方差算法反演NOAA/AMSU海面大气温度垂直廓线.海洋湖沼通报,2008(2):16-23.
- 曲思逸,李国春.利用MODIS红外资料反演大气温湿度廓线的研究.气象与环境学报,2012,28(3):21-24.
- 王曦,李万彪.应用FY-3A/MWHS资料反演太平洋海域晴空大气湿度廓线.热带气象学报,2013,29(1):47-54.
- 王祥,赵冬至,苏岫,等.基于岸基实测数据的近红外通道海洋大气水汽反演.红外与毫米波学报,2012,31(6):550-555.
- 龚建东.同化技术:数值天气预报突破的关键——以欧洲中期天气预报中心同化技术演进为例.气象科技进展,2013,3(3):6-13.
- 李红莉,崔春光,王志斌.LAPS的设计原理、模块功能与产品应用.暴雨灾害,2009,28(1):64-70.
- Snook J S. Local domain forecasting support to the 1996 Atlanta Olympic Games. 12th Int Conf on Interactive and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. Atlanta: Amer Meteor Soc, 1996.
- Birkenheuer D. Progress in applying GOES-derived data in local data assimilation. 10th Conf on Satellite Meteorology and Oceanography. Long Beach: Amer Meteor Soc, 2000.
- 李红莉,万蓉,谢有才.利用LAPS系统同化地基GPS水汽资料的应用研究.热带气象学报,2010,26(6):702-709.
- 李红莉,崔春光,王志斌,等.中尺度分析系统LAPS应用雷达资料的个例研究.高原气象,2009,28(6):1443-1452.
- Xie Y, Koch S, McGinley J, et al. A space-time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach. Mon Wea Rev, 2011, 139: 1224-1240.
- Li W, Xie Y F, Deng S M, et al. Application of the multigrid method to the two-dimensional doppler radar radial velocity data assimilation. J Atmos Oceanic Technol, 2010, 27: 319-332.
- Li W, Xie Y F, He Z J, et al. Application of the multigrid data assimilation scheme to the China seas' temperature forecast. J Atmos Oceanic Technol, 2008, 25: 2106-2116.
- 王晓芳,崔春光.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I:组织类型特征.气象学报,2012,70(5):909-923.
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China. Weather and Forecasting, 2013, 28(5): 1081-1098.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. General features of squall lines in East China. Monthly Weather Review, 2013, 141(5): 1629-1647.
- 王晓芳.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 II:环境特征.气象学报,2012,70(5):924-935.
- 郑淋琳,孙建华.干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析.大气科学,2013,37(4):891-904.
- 崔春光,王晓芳,付志康.多源探测资料在一次非线状MCS分析中的综合应用.气象,2013,9(5):556-566.
- 王晓芳,胡伯威,李灿.湖北一次飑线过程的观测分析及数值模拟.高原气象,2010,29(2):471-485.
- 王晓芳,胡伯威,李红莉,等.梅雨期一个伴有前导层状降水对流线的结构特征.高原气象,2011,30(4):1052-1066.

- [46] 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. 科学通报, 2008, 53(4): 471-481.
- [47] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析. 气象学报, 2013, 71(3): 367-382.
- [48] 祁秀香, 郑永光. 2007年夏季我国深对流活动时空分布特征. 应用气象学报, 2009, 20(3): 286-294.
- [49] 胡伯威. 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. 大气科学, 2005, 2(6): 845-853.
- [50] 王晓芳, 崔春光, 胡伯威. 与水平风切变强度不均匀相联系的CISK惯性重力波. 应用气象学报, 2007, 18(6): 760-768.
- [51] 许小峰, 高丽, Jin F F. 梅雨湿度锋上中尺度对流云团生成和发展的波捕获机制. 自然科学进展, 2009, 19(11): 1203-1208.
- [52] 陈忠明. 非绝热加热、湿斜压热动力耦合强迫激发辐合增长的一种机制. 热带气象学报, 2010, 26(6): 710-715.
- [53] Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. A theory for strong, long-lived squall lines. J Atmos Sci, 1988, 45: 463-485.
- [54] Parker M D, Johnson R H. Simulated convective lines with leading precipitation. Part II: Evolution and Maintenance. J Atmos Sci, 2004, 61: 1656-1672.
- [55] Parker M D. Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part I: An archetype for convection in along-line shear. J Atmos Sci, 2007, 64: 267-288.
- [56] Bao X W, Tan Z M. A new mechanism of convective cell regeneration and development within a two-dimensional multicell storm. Acta Meteorological Sinica, 2009, 23(4): 414-427.
- [57] Smith R B. The influence of mountains on the atmosphere. Advances in Geophysics, 1979, 21: 87-230.
- [58] Smith R B. A linear upslope-time-delay model for orographic precipitation. J Hydro, 2003, 282: 2-9.
- [59] Smith R B, Barstad I. A linear theory of orographic precipitation. J Atmos Sci, 2004, 61 (12): 1377-1391.
- [60] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 川西高原东坡地形对流暴雨的研究. 气候与环境研究, 2012, 17(5): 607-616.
- [61] Hughes M M, Hall A, Fovell R G. Blocking in areas of complex topography, and its influence on rainfall distribution. J Atmos Sci, 2008, 66(2): 508-518.
- [62] Zhao Y C. Numerical investigation of a localized extremely heavy rainfall event in complex topographic area during midsummer. Atmospheric Research, 2012, 113: 22-39.
- [63] 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 大对流有效位能和条件不稳定下地形对流降水的三维理想数值研究. 气象学报, 2011, 69(5): 782-798.
- [64] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 中尺度地形对梅雨锋暴雨影响的个例研究. 高原气象, 2012, 31(5): 1268-1282.
- [65] 廖移山, 冯新, 石燕, 等. 2008年“7·22”襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响. 气象学报, 2011, 69(6): 945-955.
- [66] 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平. AREMS中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社, 2004.
- [67] Mesinger F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. Rev Meteor Aeronaut, 1984, 44: 195-202.
- [68] Yu R C. Application of shape-preserving advection scheme to the moisture equation in an E-grid regional forecast model. Advances of Atmospheric Sciences, 1995, 12(1): 13-19.
- [69] 宇如聪. E网格变量分布下差分格式的性质. 大气科学, 1994, 18(2): 152-162.
- [70] 王叶红, 赖安伟, 赵玉春, 等. 降水资料同化在GRAPES-MESO模式中应用试验研究. 大气科学, 2013, 37(3): 645-667.
- [71] 赵海贝, 王斌, 戴永久. 基于历史样本投影的四维变分陆面数据同化方法及其初步应用. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 383-389.
- [72] 赵明, 王斌, 成巍, 等. 一种基于历史样本投影的三维变分同化方法. 气候与环境研究, 2010, 15(2): 199-209.
- [73] 蒋兴文, 何光碧, 李跃清. AREM模式中引入MYJ边界层方案介绍及其试验. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 1-7.
- [74] 杨磊, 徐幼平, 程锐, 等. AREM模式中陆面过程的改进与试验. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 1-8.
- [75] 李昉英, 叶成志, 钟中. 陆面参数化方案对两例不同类型暴雨可预报性的影响. 大气科学, 2010, 34(2): 407-417.
- [76] 王叶红, 彭菊香, 公颖, 等. AREM-RUC 3h快速更新同化预报系统的建立与实时预报对比检验. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 296-304.
- [77] 王叶红, 赵玉春, 李红莉, 等. AREM模式的热启动数值模拟——以2007年7月13日暴雨过程为例. 高原气象, 2011, 30(6): 1488-1504.
- [78] 王叶红, 彭菊香, 赵玉春. 两种初值方案对2008年中国汛期降水影响的数值试验. 热带气象学报, 2012, 28(6): 838-852.
- [79] 李俊, 杜钧, 王明欢, 等. 中尺度暴雨集合预报系统研发中的初值扰动试验. 高原气象, 2009, 28(6): 1365-1375.
- [80] 李俊, 杜钧, 王明欢, 等. AREM模式两种初值扰动方案的集合降水预报试验及检验. 热带气象学报, 2010, 26(6): 217-228.
- [81] Li J, Du J, Zhang D L, et al. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China. Q J R, 2013, doi: 10.1002/qj.2200.
- [82] 李俊, 王明欢, 公颖, 等. AREM短期集合预报系统及其降水预报检验. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 30-37.
- [83] 陈金荣, 罗伯昆. 对水文气象预报的认识和实践. 人民长江, 1982(6): 52-59.
- [84] 李建通, 杨维生. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨. 大气科学, 2000, 24(2): 263-270.
- [85] 尹忠海, 张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量. 应用气象学报, 2005, 16(2): 213-219.
- [86] 万玉发, 吴翠红, 金鸿祥. 基于准同雨团样本概念雷达和雨量计的实时同步结合方法. 气象学报, 2008, 66(1): 262-273.
- [87] 殷志远, 赖安伟, 公颖, 等. 气象水文耦合中的降尺度方法研究进展. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 89-95.
- [88] 许继军, 杨大文, 蔡治国. 分布式水文模型结合雷达测雨用于三峡区间的洪水预报. 长江科学院院报, 2007, 24(6): 42-48.
- [89] 彭涛, 宋星原, 殷志远, 等. 雷达定量估算降水在水文模式汛期洪水预报中的应用试验. 气象, 2010, 36(12): 50-55.
- [90] 杨文发, 等. 降水预报与洪水预报耦合应用初探. 水资源调查, 2003, 24(1): 38-40.
- [91] 李超群, 郭生练, 张洪刚. 基于短期定量降水预报的隔河岩洪水预报研究. 水电能源科学, 2006, 24(4): 31-35.
- [92] 郭靖, 郭生练, 张俊, 等. 汉江流域未来降水径流预测分析研究. 水文, 2009(5): 18-22.
- [93] 崔春光, 彭涛, 沈铁元, 等. 定量降水预报与水文模型耦合的中小流域汛期洪水预报试验. 气象, 2010, 36(12): 56-61.
- [94] 彭涛, 李俊, 殷志远, 等. 基于集合降水预报产品的汛期洪水预报试验. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 274-278.
- [95] 刘志雨. 我国洪水预报技术研究进展与展望. 中国防汛抗旱, 2009(5): 13-16.
- [96] Peng T, Wei C Z, Ye J T, et al. Basin hydrometeorology real-time forecast system. Information Computing and Applications, 2012, CCIS307: 665-671.