

长江流域气象-水文暴雨洪涝预警技术系统研究

崔春光, 赵玉春, 彭涛, 王斌, 李俊, 万蓉

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

[摘要] 对长江流域暴雨洪涝预警研究和业务的4个方面,即暴雨中尺度野外观测科学试验、暴雨中尺度系统形成机理研究、暴雨数值模式预报技术研发以及水文气象耦合模式发展等进行了回顾,分析了制约长江流域暴雨预报和洪涝灾害预警能力和水平提高的主要因素,提出了亟待解决的主要科学技术问题及其应对策略。

[关键词] 长江流域;暴雨;洪涝;预警

[中图分类号] TP31 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)10-0027-06

1 前言

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流域经济社会发展和人民生命财产安全带来了严重的损失和威胁。据国家民政部门不完全统计,近10年来我国大陆平均每年因洪涝灾害造成的粮食损失约200亿kg,经济损失近2000亿元,由气象灾害造成的国民经济损失约占国民经济生产总值的3%~6%。长江流域经济较为发达的地区损失尤为严重,如1991年夏季,江淮地区持续性洪涝给国家造成的经济损失高达上千亿元;1998年长江流域特大洪涝灾害造成的直接经济损失超过1600亿元,死亡人数超过3000人;2003年江淮流域发生的严重洪涝灾害,苏皖两省受灾人口达4803.5万;2006年深入内陆的“碧利斯”强台风在湖南、江西形成特大暴雨,造成成百上千人的死亡,经济损失惨重;2010年7月,长江汉江上游普降暴雨,长江、汉江两大洪峰几乎同步到达湖北境内,境内5大湖泊、1125座水库水位全线突破汛限水位,4000多条山丘河溪暴发山洪,7条主要中小河流全线超设防。另外,由于该流域地形地貌复杂,局地短历时强降水过程频发,如2010年

8月7日,嘉陵江上游舟曲强降水过程引发的特大泥石流灾害,造成了上千人死亡。因此,预防和减轻长江流域暴雨洪涝灾害损失是我国防灾减灾中的重要内容,提高长江流域致洪暴雨及其引发的洪涝灾害的监测与预报水平,对增强我国防灾减灾的总体能力,确保我国在21世纪国民经济得到可持续发展具有极为重要的意义,是国家的重大战略需求。

2 现状和问题

随着大气探测手段、能力和方法的改进以及大规模计算技术的快速发展,国际上先后开展了一系列野外观测科学试验,如世界气象组织的“观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)”、美国以改进暖季定量降水预报为目的的“天气研究计划(USWRP)”^[1]、“加州登陆急流计划(CALJET)”^[2]和“微物理参数化改进的野外观测验证试验(IMPROVE)”^[3]以及欧美各国联合实施的“对流和地形引发的降水研究(COPS)”^[4]等。这些野外加密观测试验对揭示新的暴雨中尺度观测事实和深入认识暴雨形成机理起到了极大的作用,不仅认识到中尺度对流系统(MCS)在暴雨形成中的重要性,而且对MCS的形成机制进行了深入研究,提出了中尺度对流系统的形成机制,如地面冷丘机制、对流

[收稿日期] 2012-06-25

[基金项目] 科技部公益性行业科研专项(GYHY201106003);国家自然科学基金项目(40930951;40975025;41075038)

[作者简介] 崔春光(1964—),男,湖北洪湖市人,研究员,主要从事暴雨数值预报技术研究;E-mail:cuicg@whih.r.com.cn

加热耦合的重力波机制等。同时,发现 MCS 的移动快慢是影响局地降水累积的一个关键因子,并提出了解释 MCS 传播的几种物理机制,如经典的“引导层”概念, MCS 的“冷丘机制”传播^[5]以及重力波引起的 MCS 不连续传播^[6]等。另外,这些野外加密观测试验还促进了数值预报模式物理过程的改进,如降水的云微物理过程^[7]、大气边界层过程^[8]以及陆面过程^[9]等,也促进了降水数值预报的研发,如美国发展了先进的区域预报系统 (ARPS)^[10]、第五代中尺度数值模式 (MM5)^[11]、区域大气模式 (RAMS)^[12]、海洋大气耦合中尺度模式 (COAMPS)^[13]、天气研究和预报模式 (WRF)^[14]等多个先进的中尺度数值预报模式;英国建立了中尺度业务模式 (UKMO)^[15];法国开发了非静力模式 (MESO-NH)^[16];日本研制了区域谱模式 (JRSN)^[17]等。

20 世纪七八十年代以来,为了深入认识长江流域暴雨系统的形成机理,提高暴雨数值预报的业务水平,国内也开展了多次暴雨野外观测试验,如青藏高原大气科学试验^[18]、“连续两个‘973’长江中下游暴雨外场观测试验”^[19]等,获取了大量的野外观测数据,极大地推动了长江流域暴雨中尺度研究和预报,在天气气候观测分析和数值模拟^[20]、暴雨形成机理^[21]和暴雨数值预报^[22]等方面开展了大量研究,取得了丰富的研究成果,并逐渐认识到青藏高原大地形和东亚季风影响下长江流域梅雨锋暴雨系统的特殊性和复杂性。同时,通过野外试验、观测和理论研究以及数值试验,建立了我国具有自主知识产权的区域中尺度数值预报模式系统,如暴雨数值预报模式系统 (AREMS)^[23]、全球区域同化预报系统 (GRAPES)^[24]等,在该流域暴雨业务预报中起到了极为重要的作用。

为了预报长江流域暴雨洪涝,我国水文预报人员早先通过降雨径流经验相关图、单位线法来预报流域产汇流,并利用上下游相应关系及马斯京根河道流量演算法等来开展洪水预报。20 世纪 90 年代后,随着地理信息系统 (GIS) 软件的迅速发展,基于数字高程模型 (DEM) 先后建立了分布式流域水文物理模型^[25]和数字水文模型来模拟小流域的降雨径流时空变化过程^[26],并把分布式模型推广应用到大流域^[27]。近年来,国内学者开始了定量降水估算和洪水预报耦合技术的探讨^[28],利用雷达估测降雨,与分布式水文模型相匹配,较好地发挥了二者在表现降雨空间分布变化方面的优势^[29],并

进一步通过耦合气象预报模式和分布式水文模型构建了长江支流水文气象耦合模型,提高了洪水预报精度^[30]。

但是,长江流域地域辽阔,地形地貌极为复杂,不仅受到青藏高原大地形的影响,还受到云贵高原、武陵山脉、大巴山等其他高大地形以及复杂中小尺度地形的影响,加之长江流域复杂地形影响和不同尺度相互作用,暴雨的形成机理极为复杂。长江上游与中下游的天气气候特点存在着显著差异,不仅暴雨天气系统的结构不同,而且引发暴雨的中尺度对流系统还存在着多种组织类型,尤其是未受“973”项目关注的长江上游流域,往往是影响长江中下游的暴雨天气系统如高原涡、西南涡的生成源地,缺乏有组织、系统的全方位野外观测试验和研究,尚未建立该区域暴雨中尺度对流系统的启动、组织和发展及其引发暴雨的物理图像。已有的外场加密观测试验未能获得清晰反映暴雨 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。同时,观测试验没有针对暴雨数值模式预报最佳敏感区域进行观测设计,更没有针对区域暴雨数值预报模式物理过程方案的研发进行有针对性的观测设计和野外科学试验,这在很大程度上制约了我国科学家在长江流域暴雨中尺度对流系统发生发展机理的认识上走向深入,同时也限制了区域暴雨数值模式预报水平的提高。

目前,长江流域暴雨预报和洪涝灾害预警的能力和水平仍不能满足精细化预报业务发展的需求,主要由以下几方面的原因造成。

1) 突发性是长江流域强降水的特点之一,过去由于测站稀疏和资料分析时空精度不够,对复杂地形和地理环境下(特别是长江上游地区)局地突发性强降水的研究是一个薄弱环节。

2) 持续性是长江流域强暴雨的另一个重要特点^[31],涉及能量频散和惯性重力波的上下游传播、尺度相互作用和暴雨系统的自组织,这一特征在长江梅雨锋暴雨带表现十分明显,但目前认识还非常有限,长江上、中、下游暴雨的相互联系和中尺度系统的结构差异也有待进一步探讨。

3) 足以反映暴雨 β 甚至 γ 中尺度对流系统三维动力热力结构、云微物理结构的高时空分辨率资料获取的长江中上游暴雨野外观测试验有待科学地设计、规划和布局。

4) 现有的资料同化技术还不能很好地融合不同探测手段获取的高时空分辨率资料, 如卫星遥感、雷达探测、GPS 水汽、风廓线仪、微波辐射计以及地面加密自动站观测资料等, 尤其是卫星、雷达等高分辨率的遥感资料尚未得到有效的融合和同化, 目前尚未建立一套有效的高时空分辨率观测资料的融合同化系统和尺度分析平台, 形成合理的、包含云信息的区域中尺度分析场。

5) 目前高分辨的非静力暴雨预报模式不能很好地模拟长江流域对流降水的启动和日变化特征, 对长江流域独特的层状云大值区的预报模拟能力也很弱(见图 1), 因此针对东亚季风天气气候特点和青藏高原大地形影响下的模式物理过程如云微物理过程和边界层过程有待进一步发展和完善。暴雨预报的不确定性研究也有待充分展开。

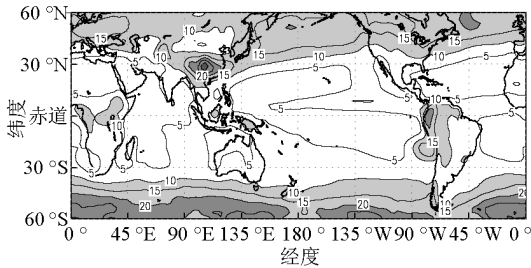


图 1 全球层状云的分布特征^[32]

Fig. 1 The distribution of global stratus^[32]

6) 气象水文耦合中基于雷达卫星估测降雨、模式定量降水预报的流域洪水预报关键技术还有待深入研究。

3 对策

3.1 科学设计和开展暴雨野外观测试验

为了深入认识长江流域暴雨形成机理, 提高暴雨数值预报准确率, 有必要充分利用我国气象业务观测网和重点区域中尺度观测网, 开展暴雨野外加密观测科学试验和研究, 尤其是青藏高原东侧及其下游关键区大气边界层科学试验、沿梅雨锋切变线、低空急流带、水汽输送带剖面观测和深入内陆的台风暴雨系统野外科学观测, 一方面为高原低值系统、梅雨锋暴雨中尺度系统和深入内陆的台风暴雨系统的三维结构及发生发展机理等研究提供高时空的野外加密观测资料, 另一方面为中尺度数值模式边界层和云微物理过程方案的改进和发展、暴雨数值预报关键敏感区研究提供可靠的试验资料, 重点

设计和开展的观测试验如下(见图 2)。

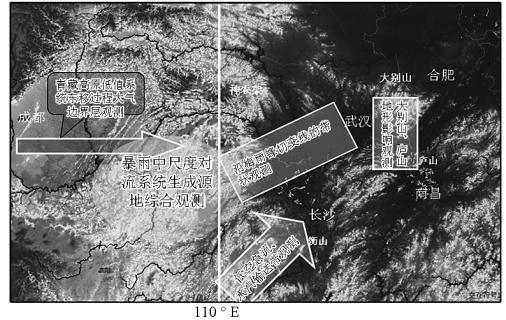


图 2 长江中上游暴雨系统综合观测布局图

Fig. 2 The synoptically observational map for heavy rain systems in the upper-middle valleys of Yangtze River

1) 针对常规观测网和长江中下游暴雨研究基地的加密观测资料, 开展观测系统敏感性试验, 并利用奇异矢量方法或者敏感梯度方法, 开展目标观测, 以改进梅雨锋暴雨的预报。

2) 针对青藏高原低值系统东移路径上的大气边界层开展观测以及对沿梅雨锋切变线、低空急流带、水汽输送带剖面进行观测, 用于暴雨机理分析和模式边界层参数化方案的改进研究。

3) 选择野外科学观测的试验区, 合理布局现有业务观测网和移动观测设备, 对深入内陆的台风暴雨系统风场、水汽场、降水场、云和降水粒子相态分布进行观测。观测方式采用立体同步跟踪式(见图 3), 以现有各种固定观测站的时间加密观测为基础, 再灵活布设移动双偏振多普勒雷达、飞机下投式探空、可移动式风廓线雷达、移动 GPS 探空等设备, 进行空间加密观测, 追踪暴雨系统从发生、发展到成熟和消散的完整过程, 获取反应降水云微物理结构和对流暴雨系统水汽、动力和热力结构特征的高时空分辨率资料。

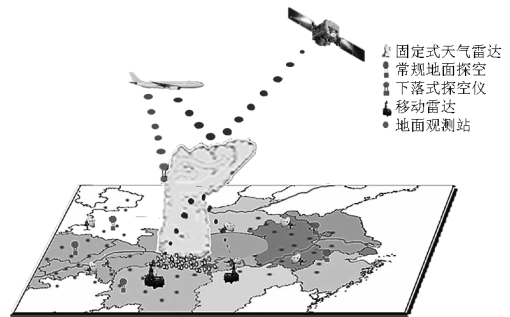


图 3 长江中上游暴雨系统多途径立体同步观测试验示意图

Fig. 3 The schematic diagram of multiple-equipment, synchronous and spatial observation experiment for heavy rain systems in the upper-middle valleys of Yangtze River

3.2 深入认识长江流域暴雨形成机理

利用外场加密观测资料,重点揭示长江流域暴雨中尺度对流系统的组织结构类型以及梅雨锋上引发暴雨的 β 甚至 γ 中尺度对流系统的三维结构特征,深入认识复杂地形、大气日变化、水汽输送、对流扰动和惯性重力波等在暴雨中尺度对流系统启动、组织和发育中的作用。揭示长江流域上游与中下游暴雨天气系统结构和形成机理的异同。建立长江流域暴雨中尺度对流系统的三维结构模型和发生发展的物理模型,为该流域暴雨预报提供科学依据,重点在以下几个方面开展研究。

1)暴雨中尺度对流系统的组织类型及三维结构模型。

2)暴雨中尺度对流系统的尺度相互作用与尺度选择机制。

3)大气日变化、对流扰动以及复杂地形对暴雨中尺度对流系统发生发展影响的物理机制。

4)长江流域梅雨锋上暴雨对流云团“上下游效应”的物理机制。

5)长江上游与中下游暴雨天气系统结构异同,以及暴雨中尺度对流系统发生发展的环境场特征和形成机理上的异同。

3.3 大力开展暴雨数值预报核心技术的研发

对制约区域暴雨数值模式降水预报能力提高的瓶颈问题开展研究,重点提高多源观测资料的融合和同化能力,开展云分析技术研究,建立3~5 km分辨率的快速更新的中尺度再分析系统,发展分辨率小于5 km的非静力暴雨数值预报模式,研发适合我国区域特色的暴雨数值预报模式的边界层和云微物理过程方案。在此基础上,发展快速分析循环预报技术和集合预报技术,进一步提高降水预报能力,重点突破如下关键技术。

1)多源观测资料融合与同化技术研究,建立具有云分析功能的中尺度再分析系统。

2)发展我国自主研发的AREMS的非静力动力框架。

3)研发能充分刻画我国复杂地形和云降水特征的物理过程方案,如云辐射方案、降水微物理方案、行星边界层方案及陆面方案等。

4)发展快速分析循环预报技术,实现暴雨数值模式的逐时更新预报。

5)开展物理参数扰动和初值扰动相结合的短期降水集合预报技术及集合预报系统研究。

3.4 研发长江流域水文气象耦合模式

目前定量降水估算(QPE)与定量降水预报(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,也是目前研究的热点难点。对于预见期降雨与洪水预报耦合试验,结果表明在洪水预报中充分考虑预见期可显著提高洪水预报精度(见图4)^[30]。实践中,采用气象与水文学交叉的方式,联合水利部门和相关院校,开展了QPE、QPF与洪水预报耦合的关键技术研究(见图5),发展一套气象要素降尺度方法,逐步缩小两者在时空尺度上的差异,构建以确定性水文试验预报误差分析为基础的概率水文预报方法,提高水文预报结果的可靠性,开发面向长江中上游地区重点流域的实时水文气象预警预报系统,重点解决如下关键科学技术问题。

1)研发长江流域实时水文预报的分布式、概念性水文模型。

2)大力发展水文气象耦合关键技术,突破制约水文气象耦合模式预警能力提高的瓶颈障碍。

3)基于贝叶斯理论概率预报理论,构建水文概率方法,利用历史资料对概率洪水预报模型参数进行优选,并以数值模式集合降雨预报产品为基础,建立水文集合预报方法。

4)利用长江流域基础地理、气象、水文监测信息,提取和转化长江流域QPE、QPF、实况监测等气象要素实时产品信息,构建长江流域水文预报模型。

4 结语

利用现有的气象业务观测网、加密气象观测网以及移动探测设备,在长江流域尤其是长江中上游进行加密观测设计,获取暴雨 β 甚至 γ 中尺度对流系统高时空分辨率的三维加密观测资料;深入认识青藏高原大地形和东亚季风影响下的暴雨中尺度对流系统的三维组织结构特征及其发生发展机理,在此基础上搭建高时空分辨率观测资料的融合同化系统和尺度分析平台;开展云分析技术研究,发展高分辨率非静力的数值模式系统,研发适合我国区域特色的数值预报模式的边界层和云微物理过程方案;开展水文气象耦合的关键技术研究,研制一套气象要素降尺度方法,开辟一条在流域水文预报中充分利用气象信息的途径;建立适合气象业务发展的流域实时水文气象预警预报系统,最终建成一套

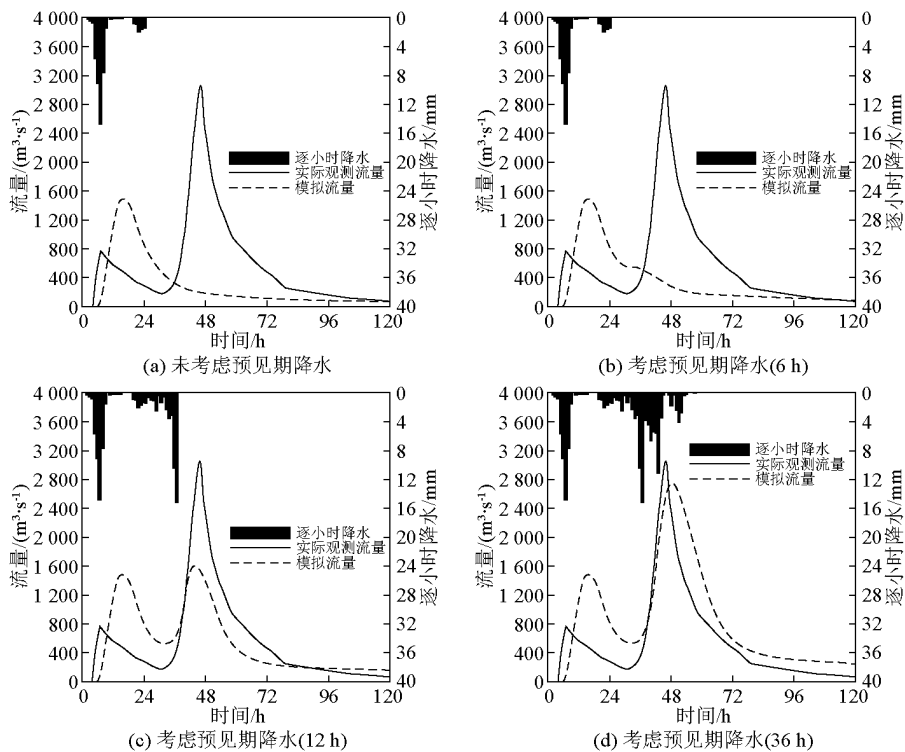


图4 定量降水预报与水文模型耦合的洪水预报

Fig. 4 Flood forecasts based on the coupling of QPF and hydrological model

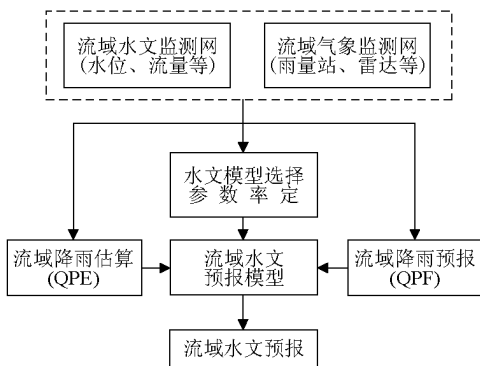


图5 水文气象耦合流程图

Fig. 5 Flow chart for the coupling of hydrology and meteorology

完整的长江流域暴雨洪涝灾害监测预警预报系统。这些工作对提高长江流域暴雨预报准确率和洪涝灾害预警水平，为国家防灾减灾决策提供科学依据有着极为重要的科学和实用价值。

参考文献

[1] Fritsch J, Carbone R. Improving quantitative precipitation forecasts in the warm season: An USWRP research and development strategy [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85: 955-965.

[2] Morss Rebecca E, Martin Ralph F. Use of information by national weather service forecasters and emergency managers during CALJET and PACJET - 2001 [J]. Weather and Forecasting, 2007, 22: 539-555.

[3] Mark T Stoelinga, Peter V Hobbs, Clifford F Mass, et al. Improvement of microphysical parameterization through observational verification experiment [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003, 84: 1807-1926.

[4] Wulfmeyer Volker. Research campaign: The convective and orographically induced precipitation study [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89: 1477-1486.

[5] Trier S B, Davis C A. Mechanisms supporting long-lived episodes of propagating nocturnal convection within a 7-Day WRF model simulation [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2006, 63 (10): 2437-2461.

[6] Liu C H, Moncrieff M W, Edward J Zipser. Dynamical influence of microphysics in tropical squall lines: A numerical study [J]. Monthly Weather Review, 1997, 125(9): 2193-2210.

[7] Robichaud A J, Austin G L. On the modeling of warm orographic rain by the seedfeeder mechanism [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, 114: 967-988.

[8] Dyer A J, Bradley E F. An alternative analysis of flux-gradient relationships at the 1976 ITCE [J]. Bound-Layer Meteorology, 1982, 22: 3-19.

[9] Wang Sheng, Zhang Qiang. The simulation and validation of land surface characters under precipitation in typical arid region [J].

Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 328-336.

- [10] Wang Z, Droegemeier K K, White L, et al. Application of a new adjoint Newton algorithm to the 3D ARPS storm-scale model using simulated data [J]. Monthly Weather Review, 1997, 125: 2460-2478.
- [11] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front [J]. Monthly Weather Review, 1993, 121: 1493-1513.
- [12] Pielke R A, Cotton W R, Walko R L, et al. A comprehensive meteorological modeling system-RAMS [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1992, 49: 69-91.
- [13] Hodur R M. The naval research laboratory's coupled ocean/atmosphere mesoscale prediction system (COAMPS) [J]. Monthly Weather Review, 1993, 125: 1414-1430.
- [14] Klemp J B, Skamarock W C, Dudhia J. Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations [J]. Monthly Weather Review, 2007, 135: 2897-2913.
- [15] Pielke R A. Mesoscale Meteorological Modeling [M]. New York: Academic Press, 1984: 612.
- [16] Belair S, Lacarrere P, Noihan J, et al. High-resolution of surface and turbulent fluxes during HAPEX-MOBILHY [J]. Monthly Weather Review, 1998, 126: 2234-2253.
- [17] Hajime Nakamura, Ko Koizumi, Nobutaka Mannoji. Data assimilation of GPS precipitable water vapor into the JMA mesoscale numerical weather prediction model and its impact on rainfall forecasts [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2004, 82 (1B): 441-452.
- [18] 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 第二次青藏高原大气科学实验研究[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [19] 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[M]. 北京: 气象出版社, 2004.

- [20] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [21] 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛, 等. 一次热带系统北上引发华南大暴雨的诊断分析和数值研究[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 561-577.
- [22] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 281.
- [23] 字如聪, 薛纪善, 徐幼平, 等. AREMS中尺度暴雨数值预报模式系统[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 233.
- [24] 薛纪善, 陈德辉. 数值预报系统GRAPES的科学设计与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 383.
- [25] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于DEM的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 1-5.
- [26] 任立良, 刘新仁. 流域数字水文模型研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(4): 1-7.
- [27] 郑红星, 刘昌明, 王中根, 等. 黄河典型流域分布式水文过程模拟[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 447-454.
- [28] 李致家, 刘金涛, 葛文忠, 等. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 601-606.
- [29] 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[J]. 气象, 2010, 36(12): 50-55.
- [30] 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[J]. 气象, 2010, 36(12): 56-61.
- [31] 徐双柱, 吴涛, 王艳. 2010年7月7-15日湖北省持续性暴雨分析[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(1): 35-43.
- [32] Yu Rucong, Wang Bin, Zhou Tianjun. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau [J]. Journal of Climate, 2004, 17(13): 2702-2713.

The study on meteorology-hydrological rainstorm flood warning technology and system in the Yangtze River basin

Cui Chunguang, Zhao Yuchun, Peng Tao, Wang Bin, Li Jun, Wan Rong
(Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain,
China Meteorological Administration, Wuhan 430074, China)

[Abstract] In this paper, a systematic review was made on the rainstorm flood early warning research and operation in the Yangtze River basin in four aspects, namely, the meso-scale rainstorm field observation experiment, the heavy rainfall meso-scale system formation mechanism research, the heavy rainfall numerical model forecast technology and the hydro-meteorological coupling model. Then, the main factors on restricting heavy rainfall forecast and flood early warning ability and level over the Yangtze River basin were analyzed. Lastly, the main problems of science and technology and its countermeasures were put forward.

[Key words] the Yangtze River basin; rainstorm; flood; early warning