

赵琳娜,包红军,田付友,等. 水文气象研究进展[J]. 气象,2012,38(2):147-154.

水文气象研究进展^{* 1}

赵琳娜^{1,2} 包红军^{1,2} 田付友² 梁 莉^{1,2} 刘 莹³

1 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

2 国家气象中心,北京 100081

3 成都信息工程学院,成都 610225

提 要: 从面向流域的定量降水估测与预报、流域水文模型、水文气象耦合预报三个方面系统介绍水文气象研究进展。研究指出,融合天气雷达、卫星遥感及实况降水等多源信息是精细化定量降水估测产品的主要发展方向;采用多模式降水预报集成技术是提高定量降水预报精度的重要途径;分布式水文模型是流域水文模型的发展方向;引入定量降水预报的水文气象耦合预报模式可以延长洪水预报预见期,水文集合预报是水文预报方法的有效解决途径,而数值预报模式与水文模型的双向耦合模式是另一重要发展方向。

关键词: 水文气象学, 定量降水估测与预报, 水文模型, 水文气象耦合预报技术, 进展

Advances in Hydrometeorological Research

ZHAO Linna^{1,2} BAO Hongjun^{1,2} TIAN Fuyou² LIANG Li^{1,2} LIU Ying³

1 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Abstract: A review of hydrometeorological research is presented from aspects of quantitative precipitation estimation (QPE) and forecasting (QPF), hydrological model, hydrometeorological forecasting and flood forecasting. The investigation shows that the raingauge-radar-satellite quantitative precipitation analysis method is the main way for the high resolution precipitation distribution of quantitative precipitation estimation, and the ensemble prediction precipitation system based on NWP multi-model is a chief way for the high accuracy of quantitative precipitation forecast. Meanwhile, the distributed hydrological model is the development direction of hydrological model. The incorporation of quantitative precipitation forecasts into a hydrometeorological and flood forecasting system can increase flood forecast lead times. Hydrological ensemble forecasting system is the most popular prediction technique in the world and the bidirectional feedback model combining NWP model and hydrological model is another future development direction.

Key words: hydrometeorology, quantitative precipitation estimation (QPE) and forecasting (QPF), hydrological model, hydrometeorological forecasting technique, advance

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)2007-6-1)、基于多模式的集合预报的交互式应用技术(GYHY200906007)和基于地理信息系统的水文气象预报技术(GYHY201006037)共同资助

2011 年 6 月 23 日收稿; 2011 年 9 月 30 日收修定稿

第一作者: 赵琳娜,主要从事水文气象及专业气象研究. Email: zhaoln@cma.gov.cn

引言

水文气象学是指研究地表和低层大气间水分和能量交换的气象学和水文学分支,是使用气象学与水文学的原理和方法,针对水文循环与水分平衡中与降水、蒸发、土壤水含量、径流等相关问题进行研究,属于气象学和水文学之间的交叉学科^[1],其主要研究内容包括地球系统中降水的监测与预报,以及暴雨致洪、渍涝、洪涝和干旱等水文气象事件的形成机理与预测技术,并应用于水库调度与管理、气候变化影响评估,水资源开发与合理配置,对工农业生产、水土保持、水利水电工程的规划设计、国民经济的可持续健康发展都有着极其重要的影响^[2]。

水文学自 20 世纪 30 年代以来快速发展,水文学与气象学逐步有机结合,水文气象学形成了具有独立体系的一门学科。水文气象学的发展依赖于气象科学与水文科学的发展。降水是水文气象学主要研究对象之一,其定量预报技术一直是气象学研究的热点之一。数值天气预报的出现与发展使降水预报技术逐步从天气图法向数值天气预报转变。数值天气预报理论的表述最早来自于挪威科学家 Bjerknes^[3]。随着 20 世纪 50 年代计算机技术的快速发展,Charney 等^[4]吸取了 Richardson 的失败经验^[5],基于 Kalney^[6]和 Rossby^[7]等的工作基础,利用正压一层的过滤模式计算出了第一张数值天气预报图。随着计算机与遥感技术的快速发展,降水预报已经完成从天气图法转换至基于数值预报模式的天气预报新模式^[8-9]。水文学自 20 世纪 30 年代以来开始由实用性的方法向一门独立的科学转变,由此产生了一大批具有奠基性的产汇流理论:Green-Ampt 提出的饱和入渗公式、Richards 提出的非饱和土壤水输送基本方程、Horton 的下渗理论、Sherman 的流域汇流单位线法、Muskingum 的洪水演算预报计算方法以及 Nash 的瞬时单位线法等理论均为一直沿用的洪水预报基本技术与方法^[10-11]。为了解决其逻辑推理上不严密,方案不规范、不客观,在时空上不能外延等缺陷,水文学者尝试利用数学方法去描述和模拟水文循环的过程,由此萌生了流域水文模型的概念。随着计算机与遥感技术的快速发展,而流域水文模型研究进入了分布式水文模型的研发应用阶段^[12]。近 30 年来,气象学与水文学的快速发展,也使得水文气象学迅猛发展。随着社会

经济发展对水文气象产品的要求越来越高,现代水文气象研究主要集中在面向流域的定量降水估测与预报技术、流域水文模型以及水文气象耦合预报技术三方面。

1 面向流域的定量降水估测及预报方法的进展

流域面雨量是单位面积上的降水量,是水文气象中最重要的物理量之一。面雨量分析估测与预报是一项涉及多学科且技术难度较大的水文气象监测与预报技术,而流域面雨量是水文预报主要的输入因子,又是各级政府和有关部门组织防汛抗洪、水库调度以及山洪地质灾害防治等决策的重要依据。水文预报的不确定性主要来源于降水的不确定性而非流域水文模型的不确定性,对洪峰预测最敏感的因素就是流域降水量的空间变化^[10,13-14]。获取精细化的流域降水空间分布特征的直接方法就是建立高密度的雨量站网。虽然我国已经建立相当多的雨量站,但仍相对稀疏,其站网密度远远不能满足流域水文模型特别是分布式水文模型的要求。因此,获取精细化的流域面雨量对天气预报、洪涝及其次生灾害的预报等都有很大的意义。定量降水估测与定量降水预报是精细化流域面雨量服务工作的基础。

1.1 定量降水估测方法研究进展

定量降水估测(QPE)是定量降水预报以及精细化流域面雨量服务工作的基础,一直是国内外气象学与水文学研究的热点和难点之一,其方法可以分为实况插值方法、回归分析法以及遥感方法。

实况插值方法^[15]可以分为空间几何插值法、函数插值法以及地理统计法。空间几何插值法^[16-18]包括算术平均法、泰森多边形法、反距离权重法等。泰森多边形法采用最近的单点降水进行区域插值,是最简单的降水空间插值方法之一,目前仍广泛用于各部门的水文气象业务中,国家气象中心也是采用泰森多边形法进行全国七大江河流域面雨量计算。美国国家气象服务机构提出的反距离权重法^[18],是采用临近的多个降水站点观测值的加权平均来估测点降水量,权重取决于估计点与临近站点的距离平方,未考虑地形等其他影响因素。函数插值法^[19]是通过构造数学函数来对降水观测进行平滑,得到空间连续的降水场,从而在任意点上插值。薄板平滑

样条插值和最优插值都是属于此类方法。地理统计方法^[20]是以 Matheron 和 Krige 提出的 Kriging 法最具代表性。Kriging 法的关键在于权重系数的确定。Kriging 法包括普通 Kriging 法、泛 Kriging 法及协 Kriging 法等。常用的为普通 Kriging 法^[21]。石朋等^[14]选用协 Kriging 法,并将高程作为第二影响因素引入降水空间插值。

上述方法多是对插值方法的探寻,受观测站密度、位置和空间代表的影响。随着遥感探测手段的发展,雷达、卫星估测降水成为定量降水估算研究的主要手段。

雷达能实时探测云和降水结构及系统发生、发展演变情况,根据雷达回波,能迅速了解一定区域的实时降水情况。随着雷达组网不断壮大与气象卫星的发展,以非常规资料为主,结合常规雨量站,通过对多资料融合来估算流域面雨量已成为发展趋势。使用雷达估测降水可以分为直接使用雷达估测和雷达联合雨量计的校准估算两种。Brandes^[22]将 Barnes 的客观分析方法引入了雷达雨量计联合校准,较为复杂的校准方法有 Kriging 法、Kalman 滤波法和变分法等;直接使用雷达估测降水的方法有 Z-I 关系方法、概率配对法和窗概率配对法等。近年来,利用差分反射率因子,双极化多普勒雷达的差分相移技术乃至机载或星载雷达来测量降水也称为雷达测雨研究热点之一。随着我国雷达网络建设的快速发展,我国的水文气象学者对雷达测雨技术进行了研究分析^[23-26]。

卫星估测降水则是通过微型传感器对云顶亮温等云团和大气辐射特征做出的降水估测,由于卫星估测降水是像素化的图像,因此理论上可以直接用于雨量的估测。英国联合 GOES 系列卫星提高卫星定量降水估测精度,精细化定量降水估测产品,并已经业务化运行,实现时空分辨率为 15 min、2 km \times 2 km 的降水估测产品。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)联合卫星估测降水的定量降水估测(QPE)产品,实现覆盖欧洲范围的 5 km \times 5 km 定量降水产品,驱动欧洲洪水预警系统(EFAS)。美国攻克多平台、多遥感资料降水估测算法的难题,其耦合多源降水信息的 QPE(MPE)产品已经进入第二代,其 QPE 产品精度、时空分辨率均有明显提高。世界气象组织的水文委员会就将提高流域 QPE 技术(包括多源资料反演降水及其融合技术,开放式计算系统等),得到资料密集和稀疏区的站

点、格点或小流域区的 QPE 作为发展目标之一。水文气象学者在对卫星估测降水反演的过程中发现,因为卫星对雨区的识别不够准确,而导致对降水的估测精度不足,为了获得更精确的 QPE 产品,对多源降水信息融合是提高降水估测精度的重要途径之一,但仍存在着二次订正误差,有待于进一步研究。在国内,2010 年,国家气象中心专业气象台已经将 0.1 $^{\circ}$ \times 0.1 $^{\circ}$ 的卫星估测降水与 27688 个区域实况站降水进行降水融合。另外,王登炎等^[27]用变分方法结合卫星估测降水和数值预报产品进行了面雨量预报研究,师春香等^[28]和徐晶等^[29]也分别使用神经网络方法和最优化方法进行了卫星降水反演研究。

1.2 定量降水预报方法研究进展

降水的产生过程和物理机制非常复杂,它是由一系列同时出现的,从微尺度到天气尺度的不同尺度的复杂物理过程共同作用的结果。目前定量降水预报主要是基于数值天气预报技术^[9]。

在以芝加哥学派为主导的气象科研工作者的推动下,数值预报技术得到了突飞猛进的发展,多个国家数值预报模式的定量降水技术得到开发和业务化应用^[30];澳大利亚采用 SLYH 动力模式进行定量降水预报;加拿大大气环境局基于统计-动力相结合的模式进行定量降水预报;日本气象厅的定量降水预报模式是 PoP(降水概率)、PoHp(大雨概率)和 PA(降水量),这些模式都是属于统计-动力模式;美国国家天气局采用了三种动力模式的定量降水预报方法——套网模式、有限区细网格模式以及可移动的细网格模式。最为突出的是 1979 年投入业务运行的 ECMWF 的定量降水模式,标志着数值天气预报走向成熟。

我国的数值预报研究开始于 20 世纪 50 年代。从过滤模式到北半球和亚洲区域模式系统(B 模式),我国一直依靠自己的科技发展。随着社会经济的发展,我国也相继引进国外先进技术实现 T42L9、T63L16、T106L19、T213L31 及 T639 模式构建并业务化应用。我国自行研制的 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)模式历经 10 年左右的发展,已经逐步形成中尺度预报模式(GRAPES_Meso)、全球预报模式(GRAPES_Global)等。

在最近的几十年里,人们发现,靠传统单一的确

定性预报来提高数值预报的水平变得越来越困难。沈铁元等^[31]根据熵理论证明了日本数值预报模式与 T213 模式日降水预报均存在一定不确定性。数值预报初始场与模式本身的不确定性限制了用传统决定论制作单一确定性预报的预报技巧。

1965 年 Lorenz 提出了解决数值天气预报不确定性的新办法——集合预报。至 20 世纪 70 和 80 年代,这一期间集合预报工作主要集中于集合预报的理论研究和数值实验上。进入 90 年代后,随着大规模并行计算机的发展,1992 年集合预报系统在美国国家环境预测中心(NCEP)和 ECMWF 投入业务运行,集合预报系统成为这两个中心数值天气预报的重要组成部分。20 世纪 90 年代末以来,集合预报广泛应用于日常预报中,研究也更加深入,人们开始研究模式的扰动问题、多模式多分析初值的超级集合预报问题和热带地区集合预报问题。近年来,TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)集合预报系统作为 THORPEX 的核心组成部分,旨在联合全球各国和地区的业务气象中心,集中各主要业务中心集合预报产品,示范并评价多模式、多分析和多国集合预报系统,以改进多模式/多分析同化预测系统,提高集合预报水平。

我国集合预报起步较晚,在 20 世纪 90 年代中期以后逐步建立多套集合预报系统。1996 年,采用时间滞后平均法(LAF)生成扰动初值建立了基于 T63L16 模式的全球中期集合预报系统;1999 年,采用奇异向量法(SVs)生成扰动初值建立了 32 个成员的基于 T106L19 模式的全球中期集合预报系统,并于 2000 年投入业务应用;2006 年,采用增长模繁殖法(BGM)生成扰动初值建立了新一代全球中期 T213L31 集合数值天气预报系统,并实现了准业务化运行;近年来建立的基于 WRF 的区域短期集合数值天气预报系统,为 2008 年的北京奥运会提供气象服务,取得比较满意的预报效果。我国也于 2006 年加入 TIGGE 计划中,负责中国 TIGGE 计划的实施推进工作。

集合预报的出现为定量降水预报提供新的思路,多模式降水预报集成技术是提高定量降水预报精度的重要途径。严明良等^[32]尝试多模式超级集合动态变权集成方法,但处理结果不能反映降水预报的不确定性。陈朝平等^[33]采用基于贝叶斯概率理论的四川暴雨集合预报产品释用方法,较好地提高了四川暴雨预报准确率。多模式多成员降水集成

技术是基于集合预报的定量降水预报技术的核心。如何赋予各个模式/成员合理的权重系数是提高基于集合预报的定量降水预报精度研究的难点与热点^[10,34]。

2 流域水文模型的发展

流域信息提取是进行流域水文气象预报及水文模型特别是分布式水文模型研究的基础工作。由于流域信息量大,所以利用现代测量技术及相关方法实现流域信息自动提取具有十分重要的意义^[35]。近年来,随着地理信息系统(GIS)与数字化高程模型(DEM)技术的快速发展,基于 DEM 的流域信息提取技术以其简单、实用、软件化(如 River Tools, TOPAZ, ARC/INFO)等优点成为主要的流域特征信息获取手段。水文学者在研究水文模型特别是分布式水文模型时,常以此建立流域特征信息与流域产汇流参数之间的定量或者定性关系^[36-38]。

流域水文模型的建立基于数学物理与水文学的知识,对于自然界中复杂水文现象的近似模拟,是研究水科学的重要手段与方法。水文模型是水文学发展的产物,并伴着水文学的发展而发展。作为流域水文模型最重要基础的产汇流理论的发展总是推动着水文模型的发展。

流域水文模型的研究始于 20 世纪 50 年代,第一个真正意义上的流域水文模型是 1966 年美国斯坦福(Stanford)大学水文学家 Crawford 和 Linsley 研制的斯坦福(Stanford)模型。根据对水文过程的描述,结合流域的特征,模型可分为集总式和分布式模型。集总式流域水文模型可由普通的微分方程表达,但它通常不考虑水文过程、输入变量、边界条件及流域几何特征的空间变异性。对于大多数的集总式模型中一些水文过程可由简化的水力学公式的微分方程描述,另一些过程则由经验的代数公式表示,典型的集总式水文模型^[39]包括 HEC-1、Sacramento、TANK 模型和我国的新安江水文模型^[40]等。

在概念性的集总式模型快速发展的同时,Freeze 等^[40]于 1969 年提出了分布式水文物理模型的概念和框架。随着计算机技术、GIS、DEM 和遥感技术(RS)的迅速发展,一系列分布式水文模型得到了发展和应用^[40]。最具有代表性的分布式水文物理模型是由英国、法国和丹麦的科学家联合研发的 SHE 模型。此外,比较著名的分布式水文模型

还有 DHSVM、ARC/EGMO、SWAT、BATS、VIC、TOPKAPI 和 BTOPMC 模型等^[39,41,43]。需要特别指出的是 TOPMODEL 水文模型^[35],该模型是以地形指数分布为基础的半分布式模型,在集总式和分布式模型中起着承上启下的作用,并由于其结构简单、优选参数少、物理概念明确而在国内外水文领域得到广泛应用,另一个著名的半分布式模型是 AR-NO 模型^[39]。

在国外集总式水文模型蓬勃发展的同时,我国也在对流域水文研究的基础上自行开发了多种模型,最著名的是新安江水文模型^[39,42],由河海大学赵人俊提出,该模型被联合国教科文组织推举为世界十大水文模型之一,这一模型及其改进版本一直为我国水文部门进行水文预报的主要工具。另外还有陕北模型、SCLS 模型、姜湾径流模型、双超产流模型、河北雨洪模型等^[42,47]。我国的分布式水文模型主要开始于 20 世纪 90 年代,主要包括^[7]:熊立华等^[48]提出了三层耦合流域水文模型;夏军等^[49]建立基于栅格单元的分布式时变增益线水文模型;Liu 等^[50]介绍了改进的 TOPKAPI 模型;李兰等^[51]在 LL-I 模型基础上提出了 LL-II 模型;Yang 等^[52]提出的 GBHM 分布式水文模型;张珂等^[53-54]对 TOPMODEL 基于 GIS 与 DEM 技术进行改进,建立分布式 GTOPOMODEL 模型,包红军等^[54-56]对我们广泛使用的新安江水文模型进行基于 DEM 改进,并实现在淮河、沂沭河、钱塘江等水系的验证。尽管如此,我国水文模型方面的工作仍然处于探索阶段,更多的是结合水文模型对流域的某些方面进行研究,目前尚未有得到广泛认可的新模型出现,许多相关的工作仍有待加强。

3 水文气象耦合预报技术进展

水文预报的不确定性很大程度上依赖于降水输入的精度^[10,13],由于降水是陆地水文过程的主要来源,因而高分辨率的定量降水估测与预报产品是水文气象学研究中关注的难点与热点。当前流域水文模拟和预报的降水输入来自雨量计观测站网、天气雷达、卫星和数值预报结果等。天气雷达、卫星结合水文模型进行洪水预报是提高预报精准率的重要手段。当前世界上很多水文气象科学家都开展了相关方面的研究。其中,英国和美国的研究较为广泛,应用也相对成熟。

3.1 雷达测雨、卫星估测降水在水文预报中的应用研究进展

英国的天气雷达网兴建于 20 世纪 70 年代。至 1993 年,由英国气象局管理的 13 部天气雷达组成的天气雷达网已经常年连续运行。正是基于这一监测网络的建成和运行,英国生态和水文研究中心的水文雷达试验(Hydrological Radar Experiment, HYREX)、河流预报系统(River Flow Forecasting System, RFFS)和水文雷达系统(Hydrological Radar, HYRAD)等多个研究成果都已经在洪水预报和警报业务部门得到了应用。美国从 20 世纪 80 年代后期开始建设新一代天气雷达网,至 1997 年底已经布成了覆盖全国的天气雷达监测网络。美国 NOAA 的水文降水分析项目 HRAP 就是基于天气雷达测雨、卫星遥感信息及雨量站实况降水结合产生用于水文预报的最优降水场。NOAA 从 2002 年,在 WHFS 的基础上发展了一个增强的水文预报服务系统——AHPS(Advanced Hydrologic Prediction Service),在水文预报中,不仅考虑已经降落到地面的降水,也考虑了预报降水场,同时增加了分布式水文模型,并加强了山区的洪水预报等。

我国的新一代天气雷达网始建于 20 世纪 90 年代末,随着天气雷达网的建设,一系列相关的水文学研究得到开展^[47];杨扬等^[57]在 2000 年就对雷达在我国水文气象学研究中的优势进行了分析;刘晓阳^[58]将雷达测雨资料驱动 TOPMODEL 模型进行径流模拟研究;Li 等^[25]采用 Kalman 滤波校正 Z-R 关系得到更精确的降水场,并耦合新安江模型进行实时洪水预报,证明了雷达测雨可以应用于洪水预报作业中,提高雷达反演降水的精度是提高模拟效率的重要途径。

3.2 数值预报模式在水文预报中的应用研究进展

在水文预报中引入定量预报降水是延长洪水预报预见期的重要手段与方法^[59],而当前的定量降水预报主要基于数值预报模式。近年来,数值天气预报模式和流域水文模型的快速发展,为两者的耦合提供了技术支撑。水文气象耦合时,由于数值预报模式与流域水文模型在时空分辨率存在一定差异,往往需要采用降尺度方法实现数值模式与水文模型的尺度匹配。降尺度方法国内外研究主要包括统计降尺度(SDSM)、EOF 迭代法、主分量分析法与逐步

回归相结合方法、动力与统计相结合方法等 4 种方法。其中,动力与统计相结合方法以其充分考虑到动力降尺度和统计降尺度的各自优点,成为降尺度技术的一个重要发展方向。数值预报模式与流域水文模型的耦合分为单向耦合与双向耦合两种。单向耦合是将数值预报模式产品直接作为流域水文模型的输入,进行单向水文气象及洪水预报。而双向耦合则是要考虑流域水文系统变化对数值预报模式的反馈作用。

单一的数值预报模式降水由于初值误差、模式误差以及大气自身的混沌特性,其数值预报结果存在很大的不确定性。在水文预报中,直接使用“单一”模式的预报结果,仅追求提高模式分辨率,期望以此改善对暴雨等强对流天气的预报能力,可能会将数值天气预报在洪水预报领域的应用引入一个误区,导致洪水预报结果存在较大的偏差^[10,56]。近年来,集合数值天气预报技术的发展,为降水预报、洪水预报及早期预警提供了新的思路^[34,59]。由于集合预报系统(Ensemble Prediction System, EPS)能够很好地考虑到模型的不确定性、边界条件的变化以及数据同化,国外学者已经尝试将集合预报与水文模型、水力学模型相结合应用于洪水预报及早期预警、洪灾风险评估中,这是集合预报应用于水文气象及洪水预报的主流研究趋势^[56-59]。最为典型的为欧洲的 EFAS(European Flood Alert System)与美国的 ESPS(Ensemble Stream Prediction System)。我国在这方面的研究相对较晚,赵琳娜等^[10,56,60-61]在对 TIGGE 集合预报降水分析评估的基础上,建立淮河流域 TIGGE-水文-水力学耦合的水文集合预报模型,证明了集合预报可以应用于流域水文气象及洪水预报的可能性。

数值天气预报模式与流域水文模型的双向耦合,既可提高水文预报预警预见期,又为数值预报模式提供了较为科学的陆面过程方案,改善数值天气预报模式的预报性能,这种双向耦合研究成为了数值预报模式与水文气象预报的重要研究方向^[62]。

4 讨论和展望

(1) 实况降水的空间分布精度直接影响流域面雨量以及水文预报效果。目前,遥感信息在水文气象领域的广泛应用为提高水文气象预报准确率提供了很好的契机,基于天气雷达、卫星遥感的定量降水

估测技术已经成为获取流域高分辨率的降水实况分布场的重要手段。如何更好地融合天气雷达、卫星遥感及地面雨量计实况降水等多源信息,以获取更精确的降水信息的理论和技术方法,是水文气象领域有待进一步研究的难点之一。

(2) 在洪水预报中引入定量预报降水是延长洪水预报预见期的重要手段与方法。因此定量降水预报产品的准确率对于预见期内的洪水预报特别是洪峰预报效果尤为重要。随着数值预报技术特别是集合预报技术的不断发展,多模式集合预报降水集成已经成为定量降水预报的主要手段与依据。由于世界上的数值预报模式在各个区域的预报效果不尽相同,如何在多模式融合时赋予各个模式预报降水产品合适的权重系数,以提高区域定量降水预报精度,也是世界水文气象学家现阶段的研究热点。

(3) 流域水文模型在防汛减灾、政府决策服务中起着至关重要的作用。分布式水文模型已经成为流域水文模型发展的重要方向。流域水文站网分布密度及其观测数据不足,一些基础性的数据由于各种自然因素或人为因素的限制而无法获得,是限制分布式水文模型进一步发展的重要因素。如何突破时空尺度限制,减少模型在预报中的不确定性,提高预报/模拟效果是分布式水文模型发展方向之一。

(4) 大气模式与水文模式的耦合研究大多数停留在气象-水文的单向耦合研究上,基于集合预报的水文集合预报技术已经成为世界上气象、水文部门的水文气象预报业务与科研中采用的主要方式。我国在这方面的研究相对较晚,但经过前期的研究,也取得了非常有应用价值的水文集合预报研究成果。

(5) 气象-水文双向耦合模式不仅提高数值模式的定量降水预报精度,还可以实现洪水预报,受到了水文气象学者的关注。选择合适的流域水文模型进行耦合是构建双向耦合模式的关键因素之一。大气模式与水文模式耦合的难点在于时空尺度的匹配问题上。发展更为合理的动力与统计相结合的降尺度技术是实现水文-气象耦合,提升水文气象预报精度,延长洪水预报的预见期,增强防汛减灾决策服务能力的重要手段。

参考文献

- [1] Bruce J P, Clark R H. Introduction to Hydrometeorology [M]. Oxford: Pergamon Press, 1966:1-30.
- [2] Sene K. Hydrometeorology: Forecasting and Applications

- [M]. London: Springer, 2009: 1-20.
- [3] Bjerknes V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Ohysik[J]. Meteor Zeits, 1904, 21: 1-7.
- [4] Charney J G, Fjortoft R, Neuman von J. Numerical integration of the Barotropic Vorticity Equation[J]. Tellus, 1950, 2: 237-254.
- [5] Richardson L F. Weather Prediction by Numerical Process [M]. Cambridge: Cambridge University Press, reprinted in USA, 1980: 236.
- [6] Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability [M]. Maryland: Cambridge University Press, 2003: 4-12.
- [7] Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action[J]. J Mar Res, 1939, 2: 38-55.
- [8] 矫梅燕. 现代气象业务丛书——现代天气业务[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 1-7.
- [9] 陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 等. 天气学和天气预报的研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 451-467.
- [10] 包红军. 基于 EPS 的水文与水力学相结合的洪水预报研究[D]. 南京: 河海大学, 2009: 23-49, 131-148.
- [11] McCarthy G T. The unit hydrograph and flood routing[R]. Paper presented at Conf of the North Atlantic Div of US Corps of Engineers, New London, 1938: 20-58.
- [12] 芮孝芳, 蒋成煜, 张金存. 流域水文模型的发展[J]. 水文, 2006, 26(3): 22-26.
- [13] Krzysztofcwicz R. Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model[J]. Water Resour Res, 1999, 35(9): 2739-2750.
- [14] 石朋, 芮孝芳. 降雨空间插值方法的比较与改进[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 23(4): 361-365.
- [15] 徐晶, 姚学祥. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象, 2007, 33(7): 15-21.
- [16] 庄一鸽, 林三益. 水文预报[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1986: 10-22.
- [17] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2004: 44-56.
- [18] Lam N. Spatial interpolation methods: A review[J]. The American Cartographer, 1983, 10(2): 129-149.
- [19] Daley R. Atmospheric Data Analysis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 90-102.
- [20] 侯景儒, 黄竞先. 地质统计学的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 69-78.
- [21] Dirks K N, Vizzaccaro A. On the interpolation of hydrological variables: Formal equivalence of multiquadratic surface fitting and Kriging[J]. J Hydrol, 1997, 195(1-4): 160-171.
- [22] Brandes E. Optimizing rainfall estimates with the aid of radar [J]. Journal of Applied Meteorology, 1975, 14: 1339-1345.
- [23] 姚燕飞, 程明虎, 杨洪平, 等. 优化 $Z-I$ 关系及其在淮河流域面雨量测量中的应用[J]. 气象, 2007, 33(6): 37-43.
- [24] 李建通, 郭林, 杨洪平. 雷达-联合雨量计估测降水场初值场形成方法探讨[J]. 大气科学, 2005, 29(6): 1010-1020.
- [25] Li Z J, Ge W Z, Liu J T, et al. Coupling between weather radar rainfall data and a distributed hydrological model for real-time flood forecasting [J]. Hydrological Sciences Journal, 2005, 49(6): 945-958.
- [26] Cheng M H, He H Z, Mao D Y, et al. Study of 1998 heavy rainfall over the Yangtze River basin using TRMM data [J]. Advances in Atmosphere Sciences, 2001, 18: 387-396.
- [27] 王登炎, 李德俊, 金琪. 变分法和卫星云图模式识别在强降水面雨量预报中的应用[J]. 气象, 2003, 29(3): 20-22.
- [28] 师春香, 卢乃锰, 张文健. 卫星面降水估计人工神经网络方法[J]. 气候与环境研究, 2001, 6: 467-471.
- [29] 徐晶, 毕宝贵. 卫星估计降水产品的优化处理及分区检验[J]. 气象, 2005, 31(2): 27-31.
- [30] 胡圣昌. 国外定量降水预报的业务模式概况[J]. 气象科技, 1980, (6): 16-18.
- [31] 沈铁元, 廖移山, 彭涛, 等. 定量分析数值模式日降水预报结果的不确定性[J]. 气象, 2011, 37(5): 540-546.
- [32] 严明良, 缪启龙, 沈树勤. 基于超级集合思想的数值预报产品变权集成方法探讨[J]. 气象, 2009, 35(6): 19-25.
- [33] 陈朝平, 冯汉中, 陈静. 基于贝叶斯方法的四川暴雨集合概率预报产品释用[J]. 气象, 2010, 36(5): 32-39.
- [34] Pappenberger F, Bartholmes J, Thielen J, et al. New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: L10404.
- [35] 张珂, 郭毅, 李致家, 等. 基于 DEM 的流域信息提取方法及应用实例[J]. 水力发电, 2005, 31(2): 18-21.
- [36] Beven K J, Kirkby M. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrol Sci Bull, 1979, 24: 43-69.
- [37] 王莉莉. 基于栅格的超渗产流水文模型研究及比较应用[D]. 南京: 河海大学, 2010: 13-56.
- [38] 包红军, 李致家. 具有行蓄洪区的复杂水系实时洪水预报研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 5-12.
- [39] Singh V P. Computer Models of Watershed Hydrology[M]. Littleton: Water Resources Publications, 2002: 1-216.
- [40] 赵人俊. 流域水文模拟-新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 1-128.
- [41] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology, 1969, 9: 237-258.
- [42] Abbott M B, Refsgaard J C. Distributed Hydrological Modeling[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996: 1-128.
- [43] Arnold J G, Fohrer N. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling [J]. Hydrological Processes, 1999, 19: 563-572.
- [44] Stamm J F, Wood E F, Lettenmaier D P. Sensitivity of a

GCM simulation of global climate to the respresentation of land-surface hydrology [J]. Journal of Climate,1994, 7(8): 1218-1239.

[45] Cherkauer K A, Bowling L C, Lettenmaier D P,Variable infiltration capacity cold land process model updates[J]. Global and Planet Change,2003,38:151-159.

[46] Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al. Hydrological daily rainfall-runoff simulation with BTOPMC model and comparison with Xin'anjiang model[J]. Water Science and Engineering, 2010,3(2):121-131.

[47] 水利部水文局. 水情预报手册[M]. 北京:水利电力出版社, 2010:1-8.

[48] 熊立华,郭生练. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利水电大学学报,2000,33(6):1-5.

[49] 夏军,王纲胜,吕爱锋,等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. 地理学报,2003,58(5): 789-796.

[50] Liu Z Y, Todini E. Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2002,6(5):859-881.

[51] 李兰,朱芮芮,韩名军. 基于 GIS 的 LL-II 分布式降雨径流模型的应用[J]. 水电能源科学,2004,22(1):8-11.

[52] Yang D, Herath S, Musiak K. Hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions[J]. Hydrol Sci J, 2002,47(1):49-65.

[53] 张珂,李致家,包红军. GTPOMODEL 模型与 TOPMODEL 模型比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(5):509-512.

[54] 包红军. 沂沭泗流域洪水预报模型应用研究[D]. 南京:河海大学, 2006:7-12.

[55] Yao Cheng, Li Zhijia, Bao Hongjun, et al. Application of a developed grid-Xinjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(9):923-934.

[56] Bao H, Zhao L N, He Y,et al. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast[J]. Advances in Geosciences,2011, 29:61-67.

[57] 杨扬,张建云,戚建国,等. 雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望[J]. 水科学进展,2000,11(1):92-98.

[58] 刘晓阳. 遥感估测降水在径流模拟中的应用[D]. 北京:北京大学,2001:1-12.

[59] Cloke H L, Pappenberger F. Ensemble flood forecasting: A review[J]. Journal of Hydrology, 2009,375:613-626.

[60] 赵琳娜,吴昊,田付发,等. 基于 TIGGE 资料的流域概率性降水预报评估[J]. 气象,2010,36(7):133-142.

[61] 包红军,赵琳娜. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究[J]. 水利学报,2012,43(1):146-154.

[62] 高艳红,程国栋,崔文瑞,等. 陆面水文过程与大气模式的耦合及其在黑河流域的应用[J]. 地球科学进展,2006,21(12): 1283-1292.



《气象》2010 年期刊评价指标显著提升

2011 年 12 月,科技部中国科学技术信息研究所在北京召开的中国科技论文统计结果发布会上,《2011 年版中国科技期刊引证报告》(核心版)正式发布。在 2010 年,《气象》杂志的各项期刊评价指标均有了显著的提升。与 2009 年相比,《气象》在科技期刊总引频次的排名由第 178 位上升为第 114 位,影响因子的排名由第 97 位升至第 11 位,综合评价总分的排名由第 210 位上升到第 98 位,这三项指标在大气科学类期刊中排名分别位于第二、第一和第四位。

《气象》所取得的进步是全体编委、审稿专家、作者和读者共同努力的结果。在此,向你们表示衷心的感谢。

在新的一年里,我们将继续努力,坚持《气象》的办刊方针,不断提升期刊水平,为广大读者提供高水平的文章及优质的服务。