

包红军,王莉莉,沈学顺,等. 2016. 气象水文耦合的洪水预报研究进展. 气象, 42(9):1045-1057.

气象水文耦合的洪水预报研究进展^{*1}

包红军¹ 王莉莉¹ 沈学顺¹ 李致家² 黄小祥²

¹ 国家气象中心, 北京 100081

² 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

提 要: 从洪水预报中定量降水预报应用进展、面向洪水预报的流域水文模型研究进展、气象水文耦合预报不确定性研究进展三个方面系统介绍气象水文耦合的洪水预报研究进展。研究指出, 融合预报员预报的格点化定量降水预报技术是提高面向洪水预报的流域降水预报精度的重要方法, 中尺度集合预报技术是提升流域局地性强降水预报能力的主要途径; 概念性与物理性相结合的分布式水文模型是面向洪水预报的流域水文模型发展方向; 水文集合预报是考虑气象水文单向耦合预报不确定性有效解决技术, 贝叶斯系列模型可为分析气象水文预报不确定性提供重要的借鉴意义。

关键词: 洪水预报, 气象水文耦合预报, 流域定量降水预报, 水文模型, 不确定性分析, 进展

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.002

A Review: Advances of Flood Forecasting of Hydro-Meteorological Forecast Technology

BAO Hongjun¹ WANG Lili¹ SHEN Xueshun¹ LI Zhijia² HUANG Xiaoxiang²

¹ National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

² College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098

Abstract: A review of flood forecasting hydro-meteorological forecast technology is presented with application of watershed quantitative precipitation forecasts in flood forecasting, hydrological model, and uncertainty analysis of hydro-meteorological forecasting. The results show that grid-based watershed quantitative precipitation forecasting with forecasters' forecasts is an important means of improving the accuracy of watershed quantitative precipitation forecasting in flood forecasting operations, and regional ensemble weather prediction modeling is the main method to improve local heavy precipitation forecasting. The distributed hydrological model, based on control volume method with coupling conceptual runoff generation module and physical routing module, is the developing direction of hydrological model for flood forecasting. Hydrological ensemble prediction is the most popular methods for the uncertainty analysis of hydro-meteorological forecasts and the models based on Bayesian theory are one of the most effective solutions to the forecast uncertainty.

Key words: flood forecasting, hydro-meteorological forecast, watershed quantitative precipitation forecasting, hydrological model, uncertainty analysis, review

* 国家自然科学基金项目(51509043,41105068,91537211 和 41130639)、中国气象局首批青年英才计划(2014—2017)、国家气象中心水文气象预报创新团队项目、中国气象局气象灾害风险管理业务专家团队项目、中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014M72)以及国家气象中心山洪地质灾害防治气象保障工程 2015 年建设项目“灾害性天气服务效益评估及地质灾害示范基地建设”共同资助

2015 年 11 月 6 日收稿; 2016 年 2 月 3 日收修定稿

第一作者:包红军,主要从事水文气象预报、流域洪水与地质灾害气象预警研究工作. Email:baohongjun@cma.gov.cn

引 言

洪水是给人民群众带来生命财产损失最常见和危害最大的自然灾害之一,威胁国民经济与社会发展。洪水预报是为了预先获得洪水发生发展过程,根据洪水形成机理与运动规律,利用气象、水文等信息,预报预测洪水发生与变化过程的技术方法,并作为一项重要的防洪非工程措施,是减少洪水损失的最重要手段和方法之一。一般来说,根据洪水预报预见期的长短,洪水预报方法可分为河道洪水(演进)预报法、降雨径流预报法和气象水文耦合定量预报法三类(包红军,2009)。气象水文耦合包括单向耦合与双向耦合两种。目前,气象水文双向耦合方法主要用于数值天气预报模式本身陆面过程模式的改进与完善(王莉莉等,2013;Wang et al,2016),本文洪水预报中气象水文耦合方法是指单向耦合。洪水预报最终目的是提高预报精度与延长洪水预报的预见期,为防洪减灾赢得更多的应急响应时间。随着现代遥感遥测技术、通讯技术、地理信息系统技术以及计算机技术的快速发展,河道洪水预报与降雨径流预报水平已经得到了很大提升,使得洪水预报的精度与有效预见期得到了一定的提高。但在流域汇流较短的流域,特别是大多数山区型中小流域,由于汇流速度快、集流时间短,洪水陡涨陡落,往往降水停止就出现洪峰,此时仅依赖河道洪水预报与降雨径流预报方法,预报预见期通常很短,难以满足流域防洪减灾的实际要求。此时,在洪水预报中引入预见期内的定量预报降水,采用气象水文耦合的方法定量预报洪水,是延长洪水预报有效预见期的最好措施。

降水是洪水预报中最重要的输入强迫因子。降水预报的方法大致可分为基于天气图、气象卫星和雷达等技术的天气学方法,基于流体力学、热力学和动力气象学的数值天气预报(numerical weather prediction,简称NWP)方法和基于概率论和数理统计的统计预报方法。目前,数值天气预报技术已经成为定量降水预报(15 d内)的主要依据(陶诗言等,2003)。随着近30年来的数值天气预报技术快速发展,在常规的洪水预报预警中引入定量降水预报,采用气象水文耦合预报方法来延长洪水预报的有效预见期已经逐步成为可能,并成为国内外洪水预报预警研究的热点之一。Warner等(1991)、

Bae等(1995)较早地利用气象水文耦合预报模型进行洪水预报。随后国内外许多水文气象学家从事这一研究:Lin等(2002)采用气象水文耦合(MC2&CLASS* &GUH)方法成功模拟了加拿大的魁北克地区暴雨致洪过程,证明了利用预见期内降水可以提供较长的预见期。Anderson等(2002)采用Eta模式降水作为流域水文模型HEC-HMS的降水强迫,将预报的预见期延长了48 h,为水库管理提供了决策支持。Collischonna等(2005)将区域模式预报降水引入实时洪水预报作业中,将洪水预报预见期延长了48 h。Li等(2005)将雨量站降水与中尺度数值模式预报降水应用于山区流域洪水预报。Amengual等(2007)将气象水文耦合预报模型(MM5&HEC-HMS)应用于山洪预报,实现延长预报的预见期。在国内,宋星原等(2007)应用AR-EM(Advanced Regional Eta Model)模式预报降水驱动新安江蓄满产流模型,并结合流域非线性汇流模型,延长了白莲河流域洪水预报预见期。Lu等(2008)将MC2与新安江模型单向耦合,建立淮河流域上游实时洪水预报。上述研究在洪水预报中引入降水预报,采用气象水文耦合预报的方式预报洪水,可以取得较好的应用效果,已经成为延长洪水预报有效预见期的主要手段(Lu et al,2010;崔春光等,2010;王莉莉等,2012;2015;赵琳娜等,2012)。气象水文耦合定量预报方法能否成功预报洪水的关键主要在于三个核心技术:一是定量降水预报的不确定性以及与流域水文模型尺度匹配技术,二是应用于洪水预报的流域水文模型合理性和适用性,三是气象水文耦合的洪水预报不确定性。

1 定量降水预报在洪水预报中的应用进展

洪水预报中一般需要定量降水预报作为输入强迫。目前,定量降水预报主要依赖于数值天气预报模式。“单一”确定性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较大的不确定性(Tot et al,1997)。Jasper等(2002)在复杂的山区流域进行陆气耦合模型试验,将五个大气模型和一个陆面水文模型(WaSiM-ETH)分别作了单向耦合,研究指出耦合模型的预报结果存在很大的不确定性。Warner等(1991)将MM4和HEC-1进行了耦合,对十场发生在美国宾

夕法尼亚州萨斯奎汉纳(Susquehanna)流域的洪水进行了模拟。结果显示,数值天气预报模式 MM4 预报的降水偏大与实况,致使洪水过程预报也相应偏大,耦合模型过多预报了流域的降水和洪水。Miller 等(1996)耦合数值天气预报模式和 TOP-MODEL 预报发生在 1995 年美国加利福尼亚州北部俄罗斯(Russian)河流域的大洪水,预报降水明显偏大,洪水预报流量高于实况近 50%。当然也有预报偏小的例子,Yu 等(1999)采用气象水文耦合模型系统(MM5/HMS)模拟了三场洪水,结果显示雨型预报效果较好,但由于时空分布的偏差导致洪水的预报偏小。Koussis 等(2003)在希腊基菲索斯(Kifissos)流域,通过两场中等大小的洪水过程检验表明,耦合模型预报的降雨总量偏小,但强度和持续时间偏大。Collischonna 等(2005)在巴西乌拉圭(Uruguay)河乌拉迪尼奥(Machadinho)坝以上流域的预报结果显示,对于发生在 2001 年的一场大洪水,耦合模型预报偏低。精准的定量降水预报是洪水成功预报的一个先决条件,尤其是对于汇流时间相对较短的山区性中小河流(Lan et al, 2011)。国内外研究表明,在洪水预报中,如果直接使用“单一”确定性模式的降水预报,可能会导致预报结果存在较大的偏差(Pappenberger et al, 2008a; Cloke et al, 2009; Bogner et al, 2011)。

近 30 年以来,在国内外天气研究与业务中,均倾向于用集合预报来考虑“单一”确定性数值天气预报的不确定性(Mullen et al, 1994; Hoffman et al, 1983; Tot et al, 1993; 1997; 李泽椿等, 2002)。世界气象组织(WMO)的“观测系统研究和预报实验”项目在全球建立 TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)集合预报,在全世界范围组织各气象业务中心的集合预报开发与合作,并计划发展成为未来的“全球交互式预报系统”。中国是 TIGGE 的全球三大存储中心之一。集合预报的发展,为降水预报、洪水预报及早期预警提供了新的思路(Pappenberger et al, 2008a; Cloke et al, 2009; Thielen et al, 2007; Addor et al, 2011)。国外学者已经尝试将集合预报与水文模型、水力学模型结合应用于洪水预报及早期预警、洪灾风险评估中。Pappenberger 等(2005)实现将欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的集合预报与 LISTFLOOD 耦合进行河流预报,取得了优于只使用 ECWFM 确定性预报的洪水预报效果,并在 2008 年应用全球集合预报

成果预报罗马尼亚多瑙河(Danube)流域的 2007 年洪水(Pappenberger et al, 2008b)。He 等(2009)在英国塞文河上游(upper Severn)流域在洪水预报中应用多集合预报模式取得洪水预报成功。Alfieri 等(2013)发展了基于集合预报的全球洪水感知系统(Global Flood Awareness System, GFAS),并成功应用于 2010 年夏季巴基斯坦洪水的预报,实现评估欧洲范围内流域预报性能(Alfieri et al, 2014)。最为典型为 ECMWF 的 EFAS(European Flood forecasting System, 2003)(de Roo et al, 2003)与美国的 AHPS(Advanced Hydrologic Prediction Services)(Mcenery et al, 2005)。EFFS 的核心技术以 ECMWF 全球模式(包括确定性预报,分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 和集合预报,分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)和 LIST-FLOOD 耦合实现洪水预报;AHPS 中,针对“单一”确定性数值天气模式降水预报的不确定性,采用二元联合分布将“单一”确定性数值预报降水转化成有意义的降水概率预报,并在此基础上生成了集合预报,应用于洪水预报,这与集合预报模式预报的降水是不同的,需要长序列的模式历史预报与实况资料做基础(Rodríguez et al, 2007)。Wu 等(2011)对二元联合分布进行了一定的改进,对改进效果的检验则再一次证明该方法能得到一个更有技巧的降水集合预报。我国在这方面的研究进步相对较晚,近些年,包红军在对 TIGGE 集合预报降水分析评估与降尺度的基础上,建立淮河流域耦合 TIGGE-水文-水力学的洪水集合预报模型,探讨了集合预报应用于洪水预报的可能性(包红军, 2009; Bao et al, 2011; 2012; 包红军等, 2010; 2012)。Zhang 等(2009)尝试将超级集合预报应用于在山东临沂流域洪水早期预警中。集合预报应用于洪水预报已经成为国际洪水预报主流研究趋势(Cloke et al, 2009; Roulin et al, 2005; Kunstmann et al, 2005; Giuseppe et al, 2010; 包红军等, 2012; Demeritt et al, 2013; Wetterhall et al, 2013; Dale et al, 2014)。

从世界范围来看,集合预报系统一般都是在数值天气预报全球模式基础上构建的,为了减少其计算量,空间尺度大都在 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ} \sim 1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 不等。在此空间分辨率下,一方面,全球模式很难对中小尺度天气有很强的跟踪捕捉能力(Ramos et al, 2013)。比如,2012 年 7 月的山东南部中尺度强对流天气系统,导致沂河发生 1993 年来的最大洪水。包红军等(2012)基于 ECMWF、日本、德国和 T639 模式四个

全球模式及其多模式集成降水预报与新安江模型耦合,进行沂河洪水预报,结果表明,所有模式均没有预报出此次强降水过程,以致洪水也没有预报成功。同样的问题也出现在 2005 年意大利 River Po 流域 (Bartholmes et al, 2005); 另一方面,与流域水文模型,特别是分布式水文模型的空间尺度也难以匹配;而区域中尺度数值天气预报模式在捕捉中小尺度天气系统上有较好的能力,其空间分辨率也要比全球模式要高很多。1997 年由美国国家大气研究中心 (NCAR) 中小尺度气象处、国家环境预报中心 (NCEP) 环境模拟中心、预报系统实验室 (FSL) 预报研究处和奥克拉荷马大学风暴分析预报中心四单位发起的开发计划——新一代中尺度预报模式与同化系统 (Weather Research and Forecasting Model, WRF model), 其作为一公共模式得到了社会上相关研究部门、大学、美国宇航局 (NASA)、空军与海军、环境保护局等单位广泛响应,并共同参与开发研究 (章国材, 2004; Skamarock et al, 2008), 现在已有多个版本,可实现单位千米级的空间分辨率预报产品。我国气象部门目前自主研发 GRAPES (global-regional assimilation and prediction system) 中尺度数值天气预报模式 (GRAPES_MESO 模式), 2004 年投入业务试运行, 2006 年正式业务化, 其间模式不断被改进, 预报精度逐年提高。GRAPES_MESO 3.0 版本在 2013 年与国外先进的日本 (JMA) 等模式对比, 在中国区域的预报效果基本相当, 空间分辨率更高, 为 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$, 目前业务运行的 GRAPES_MESO4.0 版本分辨率已经达到 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, 与用于洪水预报的流域水文模型空间尺度更为接近 (王雨等, 2010)。中尺度数值天气预报模式目前仍多为“单一”确定性预报模式, 仍存在一定的不确定性。目前国内外只有少量业务化的中尺度集合数值预报模式 (张涵斌等, 2014), 并且为了保证稳定运算等技术原因, 相比确定性的中尺度模式, 其分辨率都有一定程度上的放大, 其空间分辨率与分布式水文模型空间分辨率 (比如, $30'' \times 30''$) 仍存在一定的差距。为了更好地匹配分布式水文模型, 可以采用降尺度方法将大气模式尺度降至分布式水文模型尺度 (Lin et al, 2006)。目前常用的降尺度方法共有三种: 动力降尺度法、统计降尺度法以及动力与统计相结合的降尺度方法 (Busuioc et al, 2008; Wetterhall et al, 2006; Wilby et al, 2000)。统计降尺度法需要大尺度气候信息, 对于构建或者改进的

模式需要进行多年长序列的回算 (Re_forecast), 计算量大、费机时; 动力降尺度法的优点是物理意义明确, 缺点是区域依赖性很强, 为得到不同地区、不同模式分辨率下合理的模拟方案, 必须进行模式参数化、反复调试动力条件 (Fowler et al, 2007)。Maraun 等 (2010) 指出, 动力与统计相结合的降水降尺度方法充分考虑到动力降尺度与统计降尺度各自的优缺点, 既包含动力学意义又利用了大量气候信息, 是降水降尺度技术的重要发展方向。

2 应用于洪水预报的流域水文模型研究发展

2.1 流域水文模型分类

自 Crawford 等 (1966) 于 1966 年研制的 Stanford 模型问世以来, 水文学者就一直热衷于对流域水文模型的研究与应用, 有了很多为不同目的设计的水文模型, 有些模型因其基本假设相同而具有相似的结构, 而其他一些模型则有着明显的区别 (李致家, 2008)。

流域水文模型主要包括五个部分, 即流域几何特性、模型输入、控制方程、初始及边界条件和模型的输出。根据模型的类型, 这五个部分可以选择性地结合 (Singh, 1995; 李致家, 2008)。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; 根据是否考虑水文过程的随机性又可将模型划分为确定性模型、随机性模型与混合性模型。

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。模型的一些水文过程可由简化的水力学公式微分方程描述, 另一些过程则由经验公式表示, 如 HEC-1、Sacramento 模型等。而分布式水文模型, 其特征是充分考虑了水文过程、输入变量、边界条件及流域几何特征的空间变异性, 如 SHE、SWMM、IHDM 模型等。但在大多数情况下, 由于实测或者试验资料的缺乏, 妨碍了分布式模型的使用。在一些情况下, 模型输入、边界条件和流域特征采用的是集总式, 而某些水文过程与直接联系到输出的环节采用的是分布式, 如降雨-径流过程, 该类模型可称为半分布式水文模型。半分布式水文模型是介于集总式模型和分布式模型之间的一种模型, 其典型代表是以地形为水文过程空间

变异性基础的 TOPMODEL(Beven et al,1979)。

根据对水循环要素过程的描述方法,确定性水文模型可分为经验性、概念性与物理性模型三类。经验性模型又称“黑箱模型”,大都采用经验性的分析方法,如用 Horton 下渗理论以及 Sherman 单位线等理论描述产汇流机制,只要将已知的降雨过程输入到模型中去即可得到流域的出流过程。概念性模型又称“灰箱模型”,它将实际经验与以往的研究成果加以理论解释,使其系统化、逻辑化,通过集总式方式描述流域上发生的水文过程,并按时段递推格式在计算机上实现(赵人俊,1982)。概念性模型的参数虽具有一定的物理意义,但很难被直接测定或估算,必须利用流域出口断面的实测水文过程进行模型参数率定和检验。Stanford、Tank、SAC-SMA、新安江模型与陕北模型等许多流域水文模型均属于概念性模型。物理性模型又称“白箱模型”,它利用质量、动量与能量守恒定律,将水流运动的偏微分物理方程直接离散化,加上初始条件及边界条件,应用数值分析解法对方程进行求解,因此能够考虑水循环的动力学机制和相邻单元间的空间关系。理论上,物理性模型的参数均可通过直接测量或估算得到,但由于水文现象的高度非线性与复杂性特征,概念与物理性只是相对而言,而且物理性模型中也包含了许多经验性的东西,如达西定律和曼宁公式等,模型的计算过程也进行了简化,完全的物理性模型目前是很难实现的(贾仰文等,2005)。

2.2 用于洪水预报的流域水文模型研究进展

目前,在国内外实时洪水预报业务作业中,仍然主要采用经验降雨-径流预报方案和流域水文模型(如新安江水文模型、Sacramento 水文模型)来进行降水-径流过程预报。用于洪水预报的流域水文模型研究方面,可分为三个阶段:经验方案、集总式水文模型、分布式水文模型。国际上进行了多次的比较研究(李致家,2008)。20世纪70年代中期与90年代中期,WMO对世界上十个具有代表性的流域水文模型进行验证对比,包括 Sacramento 模型、TANK 模型、CLS 模型等。主要验证其在洪水预报中径流模拟与实时预报的应用效果,并提出单纯采用水文资料率定流域水文模型的参数数目上限在5~6个(Refsgarrd et al,1996)。由于水文过程的非线性特点及其之间相互作用,水文现象总是具有高度的时空变异性。与集总式水文模型相比,分布式

水文模型可以更好地考虑降雨和下垫面条件的空间变异性,能够更好地利用 GIS 技术、遥感与遥测等空间信息描述水文过程的机理与模拟流域的降雨-径流响应,已经成为国内外流域水文模型的发展趋势与研究前沿(Abbott et al,1996)。进入21世纪,随着计算机与遥感科学的飞速发展,分布式水文模型成为水文学研究的热点,国内外提出了很多分布式水文模型。为了更好地满足洪水预报要求美国天气局水文办公室(Office of Hydrologic development, National Weather Service, NOAA)在2002—2004年组织了 Distributed Model Intercomparison Project (DMIP)项目(Reed et al,2004; Smith et al,2004)。参与 DMIP 项目且用于洪水预报的模型共13个,包括:SAC-SMA(Burnash,1995)、HL-RMS(Koren et al,2004)、TOPNET(Bandaragoda et al,2004)、MIKE 11(Havno et al,1995)、HRCDHM(Carpenter et al,2004)、tRIBS(Ivanov et al,2004)、WATERFLOOD(Kouwen et al,1993)与 LL-II(李兰等,2003)。通过对研究结果分析比较可以得出以下几个主要结论:(1)按照现行标准,经过率定的分布式水文模型洪水预报效果优于或者至少相当于率定过的集总式水文模型;(2)充分的模型嵌套率定可以更好发挥分布式水文模型的优点;(3)分布式水文模型不但可以预报流域出口的流量过程,也可以预报流域内任意一个预报单元的水文过程,可以更好地用于流域精细化定量洪水预报;(4)使用精度较高的雨量资料,分布式水文模型能够得到很好的预报成果;(5)在湿润流域能取得不错的应用效果,在半湿润半干旱流域效果不太理想。

自20世纪90年代以来,针对1969年水文学家 Freeze等(1969)提出的分布式水文模型构造框架问题,Beven、Reggiani等国际知名水文学家提出了采用代表性基本流域(Representative Elementary Watershed, REW)和热力学定律来考虑流域各向异向性土壤一维和二维产流、三维的地下水和一维侧向壤中流和河道明渠非恒定流模型。MIKE SHE模型就是按照这个框架构造的,并在构建模型时,将模型与参数尺度问题联系在一起(柯克比等,1989)。Beven等(1979)提出微分形式的达西定律难以考虑土壤的各向异向性和大孔隙壤中流。1996年,MIKE SHE模型分别应用于丹麦与法国的流域,发现模拟结果具有很大的不确定性(Abbott et

al, 1996)。Beven 等(1979)因此设计了 TOMODEL 并指出,应该采用新的框架代替 Freeze 和 Harlan 提出的分布式框架,使用积分形式控制体积的质量与能量守恒方程,这样就自然地把模型参数与流域尺度联系在一起, TOPMODEL 反映的就是这个理论。1998 年, Reggiani 等(1999)提出:根据热力学第二定律和熵理论,采用控制体积法建立了分布式水文模型的理论框架,并提出建立流域产汇流本构方程的设想。进入 21 世纪后,基于代表性单元(REW)的分布式水文模型相继出现(Zhang, 2007)。

随着水文科学的进一步发展,分布式水文模型虽然存在不少争论与分歧,但也在一些科学问题上达成一定的共识,可归纳如下(李致家, 2008): (1) 由于土壤的各向异性,应该考虑采用积分形式控制体积的质量和能量守恒方程(如赵人俊、Beven 以及 Reggiani 等提出的模型框架)作为新的分布式水文模型发展框架。(2) 分布式水文模型的参数与单元流域尺度有关,目前还没有找到不同尺度之间的转换规律。(3) 分布式水文模型的变量是单元流域的平均量,如土壤含水量、壤中流流速等。目前,难以测量每个单元流域的土壤含水量和壤中流流速等数值,能够实现的往往只有单点的地下水位、河道断面流量和河道水位等。因此分布式水文模型率定主要还是依赖于流域出口实测的水文过程。(4) 用于洪水预报的分布式水文模型既要具有反映流域空间多样性与水文过程的物理机制能力,又要兼顾简单性与高效性的预报计算特点,应采用概念性的降雨径流模型与基于物理机制的分布式汇流模型相结合的方法(Yu, 2000; Todini et al, 2001; Liu et al, 2005; Yang et al, 2002; Bao et al, 2010)。美国天气局水文办公室 Koren 等(2004)构建的 HL-RMS 模型;国内包红军(2006),王莉莉等(2007),李致家(2008),Bao 等(2011),Yao 等(2009; 2012)在新安江模型基础之上建立的分布式新安江水文模型,以及 Wang 等(2010; 2011),包红军等(2016a; 2016b)建立的适用于我国北方干旱、半干旱半湿润流域的分布式水文模型都是此类模型,其应用验证证明,模型在提高洪水预报精度以及在描述水文响应的时空变异性方面表现出很大潜力。(5) 与湿润流域相比,半湿润半干旱流域分布式水文模型的预报精度仍然需要进一步提高。(6) 用于洪水预报的分布式水文模型可以采用栅格型的单元流域,可以是正交的,也可以是任意三角形网格,如分布式新安江水文模型、

GRID-GA 模型(Wang et al, 2010; 2011)的流域计算单元为正交网格,而 tRIBS 模型的流域计算单元为三角网格。

3 气象水文耦合预报不确定性研究进展

洪水的发生与发展取决于气象因素(如降水预报的定时、定点、定量等)和地理因素(如流域形态、地势、尺度以及植被覆盖率等),是一个相当复杂的动态过程,由此导致了洪水预报不确定性的来源十分复杂(包红军, 2009)。近 20 年来,洪水预报在防洪中的作用得到世界上包括政府部门的广泛重视:洪水预报需要提供给政府相关部门一个足够的时间来减少洪灾带来的损失,在灾害性水文气象事件的早期预报预警中起着至关重要的角色。水文现象中的不确定性和确定性是互补的,这表明在使用气象水文耦合预报方法进行洪水预报,无论采用何种降水预报、哪种水文模型都会不可避免地产生预报的不确定性问题,这种不确定性主要来自三部分:(1) 水文气象现象的随机性与模糊性,(2) 水文模型输入误差,(3) 水文模型的结构误差。

对于洪水预报而言,输入的不确定性主要来源于预见期内的降水量。因此输入不确定性处理又可称为降水不确定性处理。在洪水预报中,未来降水的预测精度直接影响洪水预报的精度与预见期,预见期越长,影响越大。

现行流域水文模型,由于其是对水文物理过程的概化,容易做到模拟过去已经发生的水文现象。实际应用中,借助计算机的优势,不断调整模型参数组合可能有多个最优参数组所获得的输出具有相同的拟合精度。但是,预报者在作业预报时往往只从中选择认为是最优的一组参数来进行预报,这就是所谓的“异参同效(Equifinality)”(包红军, 2009)。

Krzysztofowicz(1999; 2002)将洪水预报的不确定性分为降雨预报的不确定性和水文模型的不确定性,于 1999 年提出的贝叶斯概率洪水预报理论(Bayesian Forecasting System, BFS), Kavetski 等(2006)提出贝叶斯总误差分析方法(Bayesian Total Error Analysis, BATEA)和 Ajami 等(2007)提出的综合降水预报、流域水文模型参数与结构不确定性的贝叶斯不确定性估计量(Integrated Bayesian Uncertainty Estimator, IBUNE)是最常用的分析洪水

预报不确定性的方法之一(梁忠民等,2010)。

以下就基本贝叶斯理论的洪水概率预报系统、贝叶斯总误差分析方法、模型的参数输入以及结构不确定性的综合法三种方法作简要介绍。

(1)基于贝叶斯理论的洪水概率预报系统:洪水预报的不确定性由预见期内流域降水预报的不确定性与除此以外的所有洪水预报的不确定性组成。BFS在算法上包含3个处理器(降水预报处理器、模型结构与参数处理器、洪水预报综合不确定性处理器),如式(1),根据后验概率密度函数实现气象-水文概率预报。

$$\phi(h | h_0, \mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(h | \mathbf{s}, h_0, \mathbf{y}) \pi(\mathbf{s} | \mathbf{u}, \mathbf{v}) d\mathbf{s} \quad (1)$$

式中, $\pi(\mathbf{s} | \mathbf{u}, \mathbf{v})$ 代表模型预见期内降水强迫的不确定性, $\phi(h | \mathbf{s}, h_0, \mathbf{y})$ 代表除预见期内降水强迫意外的不确定性, $\phi(h | h_0, \mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{v})$ 代表以初始条件(h_0)、降水预报(\mathbf{u}, \mathbf{v})、水文模型预报(\mathbf{y})为条件的洪水预报变量概率密度函数。

对模型预报变量结果与实测过程进行正态化转换并假定其之间为线性关系,即可得到模型预报变量的后验密度函数解析式。BFS避免直接处理模型具体的结构与参数的不确定性,直接处理模型的综合误差,方便与各种洪水预报模型进行结合应用。

(2)贝叶斯总误差分析方法:本方法的总误差是指模型输入、模型参数和流域响应(水文要素实况,多指流量)过程的不确定性。通过引入一个服从某分布的随机乘子 ϕ (参数向量记为 β_x),并定义其为实测降水值 \bar{X}_i 与真实降水值 X_i 的折算系数,来考虑模型(降水)输入的不确定性。同理,将模型的参数 θ 也作为随机的(参数向量记为 β_y),分析模型参数的不确定性,并通过流域预报断面的实测过程(\bar{Y})考虑流域响应的不确定性。选取适当准则来推求随模型参数和机乘子分布参数的先验分布,通过贝叶斯公式将这些参数的先验分布与观测流量的似然函数合成得到上述参数的联合后验分布(Kavetski et al,2006,梁忠民等,2010):

$$p(\theta, \phi, \beta_x, \beta_y / \bar{X}, \bar{Y}) = \frac{P(\bar{Y} | \theta, \phi, \beta_x, \beta_y, \bar{X}) p(\theta, \phi, \beta_x, \beta_y)}{p(\bar{Y} / \bar{X})} \quad (2)$$

式中, $p(\theta, \phi, \beta_x, \beta_y / \bar{X}, \bar{Y})$ 为参数的联合后验分布, $p(\theta, \phi, \beta_x, \beta_y)$ 为参数集 $(\theta, \phi, \beta_x, \beta_y)$ 的先验分布, $P(\bar{Y} | \theta, \phi, \beta_x, \beta_y, \bar{X})$ 为似然函数, $p(\bar{Y} / \bar{X})$ 为已知输

入条件下预报变量的边际分布。

通过对上式积分计算,即可得到各个参数后验分布。与BFS相比,BATEA直接考虑洪水预报的各类不确定性,形成洪水预报系统参数集,基于贝叶斯理论推求其后验分布,从而得到最终的“集束”概率预报。

(3)模型的参数、输入以及结构不确定性的综合法(IBUNE):IBUNE在考虑模型参数不确定性的同时,又考虑了:①模型输入的不确定性:与BATEA法一样,引入一个服从某分布的随机乘子,并定义为真实降水值 X_i 与实测降水值 \bar{X}_i 的折算系数。②IBUNE法认为,不同模型是从不同角度对水文物理过程客观规律的认识,不同的模型结构导致模型对真实水文物理过程的反映均存在一定的不确定性。这种不确定性可以通过多模型的综合来减少。在IBUNE方法中,针对模型结构的不确定性,采用贝叶斯平均(Bayesian Model Averaging, BMA)模型对各个模型的后验概率分布进行加权,应用期望最大(Expectation Maximization, EM)运算法则来估算各个水文模型后验概率分布(Ajami et al,2007)。公式如下:

$$p(\mathbf{y} | M_1, \dots, M_k, \mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^k p(M_i | \mathbf{x}, \mathbf{y}) p_i(\mathbf{y} | M_i, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (3)$$

式中, \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 分别为流域实测的降水输入和预报变量输出, $p(M_i | \mathbf{x}, \mathbf{y})$ 反映洪水预报模型结构的不确定性, $p_i(\mathbf{y} | M_i, \mathbf{x}, \mathbf{y})$ 综合反映洪水预报模型输入和参数的不确定性。

Duan等(2007)应用IBUNE法对Leaf River流域的流量过程进行模拟,结果表明,综合考虑模型的参数、模型输入和模型结构不确定性的预报效果要好于只考虑单一模型的输入和参数的不确定性。

我国于20世纪90年代开始在洪水预报中引入贝叶斯理论分析不确定性。梁莉等(2013)使用贝叶斯模型平均(Bayesian Model Averaging, BMA)方法对集合预报15个成员的降水预报进行了概率集成与偏差订正,并应用于淮河洪水预报;张洪刚(2005)发现气象水文耦合概率预报在提高洪水预报精度的同时还可提供基于风险分析的信息。其他研究洪水预报不确定性的方法还有GLUE(包红军,2009)、Kalman滤波、随机模拟、结构可靠度分析、模型参数全局优化等。总之,概率气象水文预报是研究洪水预报不确定性问题的核心,其可以提供预

报量各种统计特征(均值、方差和显著性水平区间等),均值反映了各模型综合预报的效果,方差或显著性水平区间反映了在模型结构不确定性影响下预报量可能的变动范围,这也是国内外研究洪水预报中气象水文耦合不确定性的热点(Siccardi et al, 2005)。

相对于传统的水文(洪水)预报,水文集合预报包含了水文(洪水)预报各个环节的不确定性信息,是一种既可以给出确定性预报值,又能提供预报值的不确定性信息的概率预报方法(Schaake et al, 2007)。随着现代计算机技术的进步,水文集合预报以其概率预报优于传统确定性预报的优势成为面向洪水预报的气象水文耦合预报发展的新方向(陆桂华等,2012)。水文集合预报思想来源于气象数值预报模式的集合预报研究发展,在理论和方法均结合了气象集合预报部分思路,并针对水文(洪水)预报特点进行改进与完善(叶爱中,2014;徐静等,2014)。水文集合预报发展相对较短,其预报技术比较著名的是以流域土壤湿度为初始场、使用历史水文气象因子的随机采用序列替代气象预报,驱动水文模型的长期径流预报模型(Ensemble Streamflow Prediction, ESP)(Twedt et al, 1977)。为了更好地推进水文集合预报与概率水文预报技术发展,NOAA 与 ECMWF 等机构联合发起水文集合预报试验计划(Hydrologic Ensemble Predictions Experiment, HEPEX)(Schaake et al, 2006)。根据水文集合预报的不确定性来源,其核心技术可以分为五部分(徐静等,2014):水文集合预报前处理技术、集合数据同化技术、集合参数化方案、流域水文模型、水文集合预报后处理技术。水文集合预报前处理实质上就是气象数值模式的集合预报(主要为降水与温度)后处理。常用方法包括用于订正数值预报偏差的完美后预报方法(Perfect Prognosis),基于回归方法的模型输出量统计法(Model Output Statistics, MOS)(Glahn et al, 2009),以及基于贝叶斯理论的多模型平均法(Raftery et al, 2005)和“Schaale Shuffle 洗牌法”(Schaake et al, 2007; Clark et al, 2004)。水文集合预报后处理技术以基于贝叶斯理论的水文要素集合预报后处理器最为典型(Krzysztofowicz, 2002; Krzysztofowicz et al, 2008; 王善序, 2001)。此外,还有面向水文月尺度径流集合预报的统计后处理技术(Wood et al, 2008),旨在消除系统偏差的指示器协克里金法(Brown et al, 2010)、水文径流不确定性

分析的分位数回归法(Weerts et al, 2011)、广义线性模型后处理器(The General Linear Model Post-Processor, GLMPP)(Ye et al, 2014)等。目前,水文集合预报在实际业务中应用的主要为美国的 AHPS 和欧洲中期天气预报中心 EFAS。水文集合预报未来研究与发展焦点主要集中在水文集合预报的不确定性识别、气象水文降尺度技术与数据同化、业务应用。

4 气象水文耦合预报技术发展展望

(1)在洪水预报中引入降水预报信息,采用气象水文耦合方法延长预报预见期,可为防洪减灾赢得更多的应急响应时间。降水预报的精度成为洪水预报中影响有效预见期长短的关键因素。目前,全球/区域数值天气预报模式已经可以给出相对比较准确(TS 评分方法)的定量降水预报,但对于洪水预报定时、定点、定量降水预报的要求,降水预报的时段、雨带位置与量级的微量偏差都可能引起截然不同的洪水响应效应。一方面,对于定量降水预报技术发达国家而言,融入天气学分析、数值预报产品、雷达卫星等实时遥感信息等的预报员降水预报精度整体是高于数值模式产品的,特别是对于短期预报(0~3 d),相比数值预报模式,预报员的预报有比较明显的“正”贡献。因此,如何融合预报员降水主观预报、气候背景、精细化地形以及数值模式产品等信息,进一步提升短期定量降水预报的精度是提升降水预报在洪水预报中的有效应用程度的重要途径之一。NCEP 与中国气象局国家气象中心的工作具有很强的指引性;另一方面,随着数值预报技术特别是集合预报技术的不断发展,利用集合预报来考虑降水预报的不确定性也是提高降水预报精度的重要手段。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,也是世界水文气象家现阶段的研究热点。另外,目前的集合预报主要是以全球模式作为基础的,往往在局地中小尺度系统预报能力上有所欠缺。如何结合精细化中尺度模式捕捉中小尺度天气系统的能力与集合预报技术,形成高分辨率的区域中尺度集合预报模式,既考虑预报的不确定性、提升局地强降水预报精度,又提高模式

分辨率。这是提升降水预报在洪水预报中有效应用程度的另一重要途径。

(2)就防洪减灾而言,流域水文模型是洪水预报调度的核心部分,是提高洪水预报精度和延长预见期的关键技术。流域水文模型的发展与水文学产汇流机制的发展以及计算机、GIS、遥感和航测等新技术的发展是分不开的。新知识与新技术的发展促使了流域水文模型从最初的“黑箱”模型向“灰箱”模型以及目前的“白箱”模型转变。传统意义上的集总式水文模型由于结构简单,对输入资料要求不高而一直被用于洪水预报中,但在考虑水文变量与模型参数的空间变异性及其对降雨-径流过程的影响以及在缺乏实测资料流域的应用前景等方面却不如分布式水文模型。目前流域水文模型已经进入分布式水文模型的发展阶段。目前,对面向洪水预报的分布式水文模型研究表明,应用效果上分布式水文模型优于或者至少相当于集总式模型;分布式水文模型不但可以预报流域出口的洪水过程,还可以预报出流域任意预报水文单元的水文过程;使用雨量资料分辨率更高、精度度更好时,分布式水文模型的预报性能更佳;大部分流域的洪水预报,采用融合概念性降雨-径流模型和具有物理基础的汇流技术的分布式水文模型,能够取得更好的应用效果。虽然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,但随着水文观测、数据同化等技术的快速发展,概念性与物理性相结合的分布式水文模型必然是用于洪水预报的流域水文模型发展的主要方向。

(3)气象水文耦合预报包括单向耦合与双向耦合两种。双向耦合模式目前主要用于数值天气预报模式本身陆面过程模式的改进与完善,洪水预报中以气象水文单向耦合预报为主。单向耦合预报中,“单一”的确定性定量降水预报,由于其依据的数值天气预报模式的初值误差、模式偏差以及大气自身的混沌特性,使得降水预报存在很大的不确定性,在洪水预报中如直接使用模式预报降水,可能导致洪水预报较大的偏差(包红军,2012)。水文集合预报是一种既可以给出确定性预报值,又能提供预报值的不确定性信息的概率预报方法。随着现代计算机技术的进步,水文集合预报得到了快速的发展,以其概率预报优于传统确定性预报的优势成为气象水文耦合预报发展的新方向。洪水的发生与发展主要取

决于气象因素和地理因素,是一个相当复杂的动态过程,其预报的不确定性一直是气象水文耦合预报中的研究重点。国内外已经出现了大量的研究成果,其中以水文集合预报理论基于贝叶斯理论解决洪水预报不确定性问题最具有代表性,其能够综合考虑降水预报、流域水文模型参数与结构的不确定性的优势可以作为洪水预报,特别是我国气象灾害风险预警业务定量化预报的不确定性分析研究的重要借鉴。

参考文献

- 包红军. 2006. 沂沭泗流域洪水预报调度模型应用研究. 南京: 河海大学, 50-66.
- 包红军. 2009. 基于 EPS 的水文与水力学相结合的洪水预报研究. 南京: 河海大学, 1-49, 131-147.
- 包红军. 2012. 多模式集成定量预报降水在一次暴雨洪水预报中的检验与应用//中国气象学会第 29 届年会论文集. 沈阳: 中国气象学会, 470.
- 包红军, 王莉莉, 李致家, 等. 2016a. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型. 河海大学学报(自然科学版), 44(4): 340-346.
- 包红军, 王莉莉, 李致家, 等. 2016b. 基于混合产流与二维运动波汇流的栅格型分布式水文模型. 水电能源科学, 待刊.
- 包红军, 赵琳娜. 2012. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究. 水利学报, 43(2): 216-224.
- 包红军, 赵琳娜, 何倚, 等. 2010. TIGGE 降水与水文模型的耦合在洪水预报中的应用//中国水利学会 2010 年学术年会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 408-416.
- 崔春光, 彭涛, 沈铁元, 等. 2010. 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, 36(12): 56-61.
- 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 2005. 分布式流域水文模型原理与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 1-28.
- 李兰, 钟名军. 2003. 基于 GIS 的 LL-II 分布式降雨径流模型的结构. 水电能源科学, 21(4): 35-38.
- 李泽榕, 陈德辉. 2002. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. 应用气象学报, 13(1): 1-15.
- 李致家. 2008. 水文模型的应用与研究. 南京: 河海大学出版社, 1-9.
- 梁莉, 赵琳娜, 齐丹, 等. 2013. 基于贝叶斯原理降水订正的水文概率预报试验. 应用气象学报, 16(4): 416-424.
- 梁忠民, 戴荣, 李彬权. 2010. 基于贝叶斯理论的水文不确定性分析研究进展. 水科学进展, 21(2): 274-281.
- 陆桂华, 吴娟, 吴志勇. 2012. 水文集合预报试验及其研究进展. 水科学进展, 5(5): 728-734.
- M·J·柯克比, 王炳程, 译. 1989. 刘新仁. 山坡水文学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1-26.
- 宋星原, 李允军, 余海燕, 等. 2007. AREM 模式预报技术在洪水预报中的应用. 武汉大学学报(工学版), 40(3): 1-4.
- 陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 等. 2003. 天气学和天气预报的研究进展. 大气科学, 27(4): 451-467.
- 王莉莉, 包红军. 2015. 基于 GRAPES 的气象-水文模式在淮河流域

- 的一次试验. 气象与环境科学, 38(3):47-51.
- 王莉莉, 陈德辉. 2013. GRAPES Noah-LSM 陆面模式水文过程的改进及试验研究. 大气科学, 37(6):1179-1186.
- 王莉莉, 陈德辉, 赵琳娜. 2012. GRAPES 气象-水文模式在一次洪水预报中的应用. 应用气象学报, 23(3):274-284.
- 王莉莉, 李致家, 包红军. 2007. 基于 DEM 栅格的水文模型在沂河流域的应用. 水利学报, 38(S1):417-422.
- 王善序. 2001. 贝叶斯概率水文预报简介. 水文, 21(5):33-34.
- 王雨, 李莉. 2010. GRAPES_MESO V3.0 模式预报效果检验. 应用气象学报, 21(5):524-534.
- 徐静, 叶爱中, 毛玉娜, 等. 2014. 水文集合预报研究与应用综述. 南水北调与水利科技, 12(1):82-87.
- 叶爱中. 2014. 水文集合预报概述及模型案例. 北京: 中国水利水电出版社, 1-32.
- 章国材. 2004. 美国 WRF 模式的进展和应用前景. 气象, 30(12):27-31.
- 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 2014. GRAPES 区域集合预报系统应用研究. 气象, 40(9):1076-1087.
- 张洪刚. 2005. 贝叶斯概率水文预报系统及其应用研究. 武汉: 武汉大学, 1-32.
- 赵琳娜, 包红军, 田付友, 等. 2012. 水文气象研究进展. 气象, 38(2):147-154.
- 赵人俊. 1982. 降雨径流流域模型发展现状. 水利水电科技进展, 3:23-38.
- Abbott M B, Refsgaard J C. 1996. Distributed hydrological modeling. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Addor N, Jaun S, Fundel F, et al. 2011. An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): Skill, case studies and scenarios. Hydrol Earth Syst Sci, 15(7):2327-2347. DOI:10.5194/hess-15-2327-2011.
- Ajami N, Duan Q, Sorooshian S. 2007. An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. Water Res Res, 43(1):208-214.
- Alfieri L, Burek P, Dutra E, et al. 2013. GloFAS-global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. Hydrol Earth Syst Sci, 17(3):1161-1175.
- Alfieri L, Pappenberger F, Wetterhall F, et al. 2014. Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe. J Hydrol, 517(2):913-922.
- Amengual A, Romero R, Gómez M, et al. 2007. A hydrometeorological modeling study of a flash-flood event over Catalonia, Spain. J Hydrometeorol, 8(3):282-303.
- Anderson M L, Chen Z Q, Kavvas M L, et al. 2002. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. J Hydrol Eng, 7(4):312-318.
- Bae D H, Georgakakos K P, Nanda S K. 1995. Operational forecasting with real-time databases. ASCE J Hydraulics Division, 121(1):49-60.
- Bandaragoda C, Tarboton D, Woods R. 2004. Application of topmodel in the distributed model intercomparison project. J Hydrol, 298(1/2/3/4):178-201.
- Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al. 2010. Hydrological daily rainfall-runoff simulation with BTOPMC model and comparison with Xin'anjiang model. Water Sci Engineering, 3(2):121-131.
- Bao H J, Zhao L N. 2012. Development and application of an atmospheric-hydrologic-hydraulic flood forecasting model driven by TIGGE ensemble forecasts. Acta Meteor Sin, 26(1):93-102.
- Bao H J, Zhao L N, He Y, et al. 2011. Coupling Ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjing model for flood forecast. Adv Geosci, 29:61-67.
- Bartholmes J, Todini E. 2005. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. Hydrol Earth Syst Sci, 9(4):333-346.
- Beven K J, Kirkby M J. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol Sci Bull, 24(1):43-69.
- Bogner K, Pappenberger F. 2011. Multiscale error analysis, correction, and predictive uncertainty estimation in a flood forecasting system. Water Resour Res, 47(7):1772-1780, W07524. DOI:10.1029/2010WR009137.
- Brown J D, Seo D J. 2010. A nonparametric postprocessor for bias correction of hydrometeorological and hydrologic ensemble forecasts. J Hydrometeorol, 11(3):642-665.
- Burnash R J C. 1995. The NWS river forecast system-catchment modeling//Computer Models of Watershed Hydrology. Littleton CO: Water Resources Publications, 311-366.
- Busuioc A, Tomozeiu R, Cacciamani C. 2008. Statistical downscaling model based on canonical correlation analysis for winter extreme precipitation events in the Emilia-Romagna region. Inter J Climatol, 28(4):449-464.
- Carpenter T M, Georgakakos K P. 2004. Impacts of parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulations of a distributed hydrologic model. J Hydrol, 298(1/2/3/4):202-221.
- Clark M, Gangopadhyay S, Rajagopalan B, et al. 2004. The schaafe shuffle: A method for reconstructing space time variability in forecasted precipitation and temperature fields. J Hydrometeorol, 5(1):243-262.
- Cloke H L, Pappenberger F. 2009. Ensemble flood forecasting: A review. J Hydrol, 375(3/4):613-626.
- Crawford N H, Linsley R S. 1966. Digital simulation in hydrology: The Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39. Department of Civil Engineering, Stanford University, Palo Alto, California, 1966.
- Collischonna W, Haasb R, Andreollia V, et al. 2005. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. J Hydrol, 305(1/2/3/4):87-98.
- Dale M, Wicks J, Mylne K, et al. 2014. Probabilistic flood forecasting and decision-making: An innovative risk-based approach. Natural Hazards, 70(1):159-172.
- Demeritt D, Nobert S, Cloke Hannah L, et al. 2013. The European

- Flood Alert System and the communication, perception, and use of ensemble predictions for operational flood risk management. *Hydrol Process*, 27(1):147-157.
- Duan Q, Mami N K, GAO X, et al. 2007. Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Adv Water Res*, 30(5):1371-1386.
- Fowler H J, Blenkinsop S, Tebaldi C. 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *Inter J Climatol*, 27(12):1547-1578.
- Freeze R A, Harlan R L. 1969. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *J Hydrol*, 9(3):237-258.
- Giuseppe M, Enrique R V, Roberto D. 2010. Implications of ensemble quantitative precipitation forecast errors on distributed streamflow forecasting. *J Hydrometeorol*, 11(1):69-86.
- Glahn B, Peroutka M, Wiedenfeld J, et al. 2009. MOS uncertainty estimates in an ensemble framework. *Mon Wea Rev*, 137(1):246-268.
- Havno K, Madsen M N, Dorge J. 1995. Mike 11-A Generalized River Modelling Package // Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Colorado, USA, 733-782.
- He Y, Wetterhall F, Cloke H L, et al. 2009. Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand ensemble weather predictions. *Meteorological Applications, Special Issue: Flood Forecasting and Warning*, 16(1):91-101.
- Hoffman R N, Kalnay E. 1983. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus*, 35A(2):100-118.
- Ivanov V Y, Vivoni E R, Bras R L, et al. 2004. Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin hydrology: A fully-distributed physicallybased approach. *J Hydrol*, 298(1-4):80-111.
- Jasper K, Gurtz J, Lang H. 2002. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *J Hydrol*, 267(1-2):40-52.
- Kavetski D, Kuczera G, Stewart W F. 2006. Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory. *Water Resour Res*, 42(3):446-455.
- Koren V, Reed S, Smith M, et al. 2004. Hydrology laboratory research modeling system (HL-RMS) of the national weather service. *J Hydrol*, 291(3):297-318.
- Koussis A D, Lagouvardos K, Mazi K, et al. 2003. Flood forecasts for urban basin with Integrated Hydro-Meteorological Model. *J Hydrologic Engrg*, 8(1):1-11.
- Kouwen N, Soulis E D, Pietroniro A, et al. 1993. Grouped Response units for distributed hydrologic modelling. *J Water Res Plan Manage*, 119(3):289-305.
- Krzysztofowicz R. 1999. Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resour Res*, 35(9):2739-2750.
- Krzysztofowicz R. 2002. Bayesian system for probabilistic river stage forecasting. *J Hydrol*, 268(1):16-40.
- Krzysztofowicz R, Evans W B. 2008. Probabilistic forecasts from the National Digital Forecast Database. *Wea Forecasting*, 23(2):270-289.
- Kunstmann H, Stadler C. 2005. High resolution distributed atmospheric-hydrological modelling for Alpine catchments. *J Hydrol*, 314(1/2/3/4):105-124.
- Lan C, Thomas C P, Wang Q J. 2011. A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting. *J Hydrometeorol*, 12(5):713-728.
- Lee H, Sivapalan M, Erwin Z. 2005. Representative Elementary Watershed (REW): A new blueprint for distributed hydrological modelling at the catchment scale // Predictions in ungauged basins: international perspectives on the state of the art and pathways forward. Wallingford. IAHS Publication, 301.
- Li M, Yang M, Soong R. 2005. Simulating typhoon floods with gauge data and mesoscale-modeled rainfall in a mountainous watershed. *J Hydrometeorol*, 6(3):306-323.
- Lin C A, Wen L, Béland M, et al. 2002. A coupled atmospheric-hydrological modeling study of the 1996 Ha! Ha! River basin flash flood in Quebec, Canada. *Geophys Res Lett*, 29(2):13/1-13/4.
- Lin C A, Wen L, Lu G H. 2006. Atmospheric-hydrological modeling of severe precipitation and floods in the Huaihe River Basin, China. *J Hydrol*, 330(1/2):249-259.
- Liu Z, Todini E. 2005. Assessing the topkapi non-linear reservoir cascade approximation by means of a characteristic lines solution. *Hydrolog Process*, 19(10):1983-2006.
- Lu Guihua, Wu Zhiyong, Wen Lei, et al. 2008. Real-time flood forecast and flood alert map over the Huaihe River Basin in China using a coupled hydro-meteorological modeling system. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 51(7):1049-1063.
- Lu G H, Wu Z Y, Wen L, et al. 2010. Real-time forecast of the 2005 and 2007 summer severe floods in the Huaihe River Basin of China. *J Hydrol*, 381(1/2):33-41.
- Maraun D, Wetterhall F, Ireson A M, et al. 2010. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev Geophys*, 48(3):633-650, RG3003. DOI:10.1029/2009RG000314.
- Mcenery J, Ingram J, Duan Q, et al. 2005. NOAA's advanced hydrologic prediction service: building pathways for better science in water forecasting. *Bull Amer Meteor Soc*, 86(3):375-385.
- Miller N L, Kim J. 1996. Numerical prediction of precipitation and river flow over the Russian River watershed during the January 1995 storms. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(1):101-105.
- Mullen S L, Baumhefner D P. 1994. Monte Carlo Simulations of Explosive cyclogenesis. *Mon Wea Rev*, 122(122):85-98.
- Pappenberger F, Bartholmes J, Thielen J, et al. 2008a. New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions. *Geophys Res Lett*, 35(10):1956-1964,

- L10404.
- Pappenberger F, Beven K J, Hunter N, et al. 2005. Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). *Hydrol Earth Sys Sci*, 9(4):381-393.
- Pappenberger F, Scipal K, Buizza R. 2008b. Hydrological aspects of meteorological verification. *Atmos Sci Lett*, 9(2):43-52.
- Raftery A E, Gneiting T, Balabdaoui F, et al. 2005. Using bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Mon Wea Rev*, 133(5):1155-1174.
- Ramos M H, Andel S J, Pappenberger F. 2013. Do probabilistic forecasts lead to better decisions? *Hydrol Earth Syst Sci*, 17(2):2219-2232.
- Reed S, Koren V, Smith M. 2004. Overall distributed model intercomparison project results. *J Hydrol*, 298(1/2/3/4):27-60.
- Refsgarrd J C, Knudsen J. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological model. *Water Resour Res*, 32(7):2189-2202.
- Reggiani P, Hassanizadeh S M, Sivapalan M. 1999. A unifying framework for watershed thermodynamics: Constitutive relationships. *Adv Water Res*, 23(1):15-39.
- de Roo Ad P J, Gouweleeuw B, Thielen J, et al. 2003. Development of a European flood forecasting system. *Inter J River Basin Manage*, 1(1):49-59.
- Rodriguez A B M, Sáenz M J, Gutierrez J M H. 2007. Precipitation and temperature ensemble forecasts from single-value forecasts. *Hydrol Earth Sys Sci Discuss*, 4(2):655-717.
- Roulin E, Vannitsem S. 2005. Skill of medium-range hydrological ensemble predictions. *J Hydrometeorol*, 6(5):729-744.
- Schaake J, Franz K, Bradley A, et al. 2006. The hydrological ensemble prediction experiment (HEPEX). *Hydrol Earth Sys Sci Discuss*, 3(5):3321-3332.
- Schaake J C, Hamill T M, Buizza R, et al. 2007. HEPEX: The Hydrological Ensemble Prediction Experiment. *Bull Amer Meteor Doc*, 88(10):1541-1547.
- Siccardi F, Boni G, Ferraris L, et al. 2005. A hydrometeorological approach for probabilistic flood forecast. *J Geophys Res Atmos*, 110(D5):737-753.
- Singh V P. 1995. Computer models of watershed hydrology, Littleton; Water Resources Publications.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF Version 3. Near Technical Notes' NCAR/TN-475+STR.
- Smith M, Seo D J, Koren Victor. 2004. The distributed model intercomparison project(DMIP): Motivation and experiment design. *J Hydrol*, 298, 4-26.
- Thielen J, Schaake J, Hartman R, et al. 2007. Aims, challenges and progress of the Hydrological Ensemble Prediction Experiment (HEPEX) following the third HEPEX workshop held in Stresa 27 to 29 June 2007. *Atmospheric Science Letters Special Issue: HEPEX Workshop; Stresa, Italy, June 2007*, 9:29-35.
- Todini E, Ciarapica L. 2001. The TOPKAPI model // *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Littleton: Water Resources Publications, LLC. 2001.
- Toth Z, Kalney E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull Amer Meteor Soc*, 74(12):2317-2330.
- Tot H Z, Kalney E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon Wea Rev*, 125(6):3297-3319.
- Twedt T M, Schaake J C, Peck E L. 1977. National Weather Service extended streamflow prediction // *Proceedings Western Snow Conference*.
- Wang L L, Chen D H, Bao H J. 2016. The improved noah land surface model based on storage capacity curve and muskingum method and application in grapes model. *Atmos Sci Lett*, 17(2):190-198. DOI:10.1002/asl.642.
- Wang L L, Chen D H, Li Z J, et al. 2011. Coupling Green-Ampt infiltration method and two-dimensional kinematic wave theory for flood forecast in semi-arid catchment. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 8:8036-8061.
- Wang L L, Li Z J, Bao H J. 2010. Application of developed grid-GA distributed hydrologic model in semi-humid and semi-arid basin. *Transact Tianjin University*, 16(3):209-215.
- Warner T T, Kibler D F, Steinhart R L. 1991. Separate and coupled testing of meteorological and hydrological forecast models for the Susquehanna River basin in Pennsylvania. *J Appl Meteor*, 30(1991):1521-1533.
- Weerts A H, Winsemius H C, Verkade J S. 2011. Estimation of predictive hydrological uncertainty using quantile regression: Examples from the National Flood Forecasting System (England and Wales). *Hydrol Earth Sys Sci Discuss*, 15(1):255-265.
- Wetterhall F, Bárdossy A, Chen D, et al. 2006. Daily precipitation-downscaling techniques in three Chinese regions. *Water Resour Res*, 42(11):2526-2528.
- Wetterhall F, Pappenberger F, Alfieri L, et al. 2013. HESS Opinions "Forecaster priorities for improving probabilistic flood forecasts". *Hydrol Earth Syst Sci*, 17(3):4389-4399.
- Wilby R L, Hay L E, Gutowski W J, et al. 2000. Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output. *Geophys Res Lett*, 27(8):1199-1202.
- Wood A W, Schaake J C. 2008. Correcting errors in streamflow forecast ensemble mean and spread. *J Hydrometeorol*, 9(1):132-148.
- Wu L, Seo D J, Demargne J, et al. 2011. Generation of ensemble precipitation forecast from single-valued quantitative precipitation forecast via meta-Gaussian distribution models. *J Hydrol*, 399(3/4):281-298.
- Yang D, Herath S, Musiak K. 2002. A hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions. *Hydrol Sci J*, 47(1):49-65.

- Yao C, Li Z J, Bao H J, et al. 2009. Application of a developed Grid-Xinjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose. *J Hydrol Eng*, 14(9):923-934.
- Yao C, Li Z, Yu Z, et al. 2012. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based xinjiang model using geographically based information. *J Hydrol*, 468-469(6):47-62.
- Ye A, Duan Q, Yuan X, et al. 2014. Hydrologic post-processing of MOPEX streamflow simulations. *J Hydrol*, 508(2):147-156.
- Yu Z. 2000. Assessing the response of subgrid hydrologic processes to atmospheric forcing with a hydrologic model system. *Global Planet Change*, 25(1/2), 1-17.
- Yu Z, Lakhtakia M N, Yarnala B, et al. 1999. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. *J Hydrol*, 218(1/2):72-91.
- Zhang G. 2007. Modelling hydrological response at the catchment scale: Application and extension of representative elementary watershed (REW) approach. Eburon Academic Publishers.
- Zhang W C, Xu J W, Liu Y H, et al. 2009. A catchment level early flood warning approach by using grand-ensemble weather predictions: Verification and application for a case study in the Linyi Catchment, Shandong, China. TIGGE-B poster session, Third THORPEX International Science Symposium (TTISS), Monterey, California, 14-18 September 2009.