

赵琳娜,刘莹,党皓飞,等. 集合数值预报在洪水预报中的应用进展. 应用气象学报,2014,25(6):641-653.

集合数值预报在洪水预报中的应用进展

赵琳娜¹⁾* 刘莹²⁾ 党皓飞³⁾ 姜迪⁴⁾
段青云⁵⁾ 王彬雁³⁾ 白雪梅³⁾ 梁莉⁶⁾⁷⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

²⁾(四川省气象台,成都 610072) ³⁾(成都信息工程学院,成都 610225)

⁴⁾(江苏省南京市气象台,南京 210009)

⁵⁾(北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,北京 100875)

⁶⁾(中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室,北京 100029)

⁷⁾(中国科学院大学,北京 100049)

摘 要

水文集合预报是近几年正在形成和发展的水文预报分支,其发展大致可分为两个阶段:第 1 阶段是 1970 年至 20 世纪末进行的长期径流预报,第 2 阶段从 21 世纪开始,主要学习气象数值预报中集合预报的概念在短期水文集合预报中的应用。目前,除了单一预报中心的集合预报系统在水文集合预报中应用外,多个预报中心的集合预报大集合也逐渐被应用于流域水文预报,甚至一些小流域的洪水预报。如利用 TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)集合预报驱动形成的大气-水文-水力的串联系统进行早期的洪水预警研究,将全球集合预报作为洪水模型输入的有限区域模式的初始条件和侧边界条件的研究。这些均表明,基于水文集合预报的洪水预报增加了预报附加值,并能够延长预警提前时间。以欧洲中期天气预报中心的欧洲洪水预警系统(EFAS)和美国 NOAA 的先进水文预报系统(AHPS)为代表,实现了集合预报在洪水中的实时业务预报,但仍存在数据处理和计算量大,以及如何基于集合水文预报做决策等问题。对于水文集合预报的前处理和后处理的各种技术已处于探索和验证阶段,如何更好地理解基于概率预报的洪水预警决策仍存在许多困难和挑战。

关键词: 集合预报; 不确定性; 水文集合预报; 洪水预警

引 言

随着全球气候变暖和人类活动的加剧,洪水灾害的发生越来越频繁^[1],提供洪水及其引发的次生灾害的早期预警成为越来越急迫的任务。仅 2013 年全球洪水造成 9736 人死亡,0.3 亿人受到洪水影响,共造成经济损失 0.53 亿美元^①。洪水的早期预警能够在保护人民的财产和生命安全中提供至关重要的准备时间,而且能够减少洪水对社会经济造成的损失。

洪水的发生与发展取决于气象因素和地理因素,洪水过程是一个复杂的动态过程,其预报运用了许多概念化的水文模型与参数,依赖于对输入、输出信息进行的解释和判断。由于水文、气象等多种参数输入到洪水预报模型,这些参数和模型在洪水预报的每个环节都会使洪水预报产生不确定性。因此,洪水预报的不确定性可以分为初始条件引起的(由陆面初始条件或大气天气参数引起)、模型近似引起的(大气模型和水文模型引起)和洪水预报产品生成引起的不确定性 3 类。这些复杂的因素导致水文预报不确定性的客观存在,并且一直是制约防洪决

2014-07-16 收到,2014-09-01 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(41475044),国家科技重大专项(2013ZX07304-001-1),中国气象局气候变化专项(CCSF201333)

* email: zhaoln@cma.gov.cn

①EM-DAT. The OFDA/CRED International Disaster Database. 2013.

策正确性的主要因素^[2-4]。尽管数值天气预报应用于洪水预警系统中能够显著延长预警提前时间^[5-13],但基于单一模式数值天气预报,由于初值误差、模式误差以及大气系统自身的混沌特性,导致降水、温度等气象要素预报仍存在较大不确定性^[14-18]。然而许多基于单个数值预报的水文气象服务中并未将这些不确定因素带来的不可预报程度引入到洪水预报过程中。因此,在洪水预报服务时会影响水文服务的决策过程^[19-20]。相比之下,集合预报系统(EPS)的预测能够改进单一确定性预报在同一时间对多个天气预报产品的不确定性量化。此外,水文模型应用对提高有价值的早期洪水预警能力有着巨大的潜力^[21]。

目前,水文集合预报是一个正在形成和发展的水文分支,其发展大致可以分为两个阶段:第1阶段是1970年开始至20世纪末进行的长期径流预报(extended streamflow prediction, ESP)^[22],第2阶段从21世纪开始,该阶段的主要特征是学习气象数值预报中集合预报(ensemble forecasting)的概念在短期水文集合预报中的应用。本文的水文集合预报是指第2阶段。

1 水文集合预报引入气象集合数值预报的优势

洪水预报需要降水输入,洪水预报的降水初始值若仅仅来自地面观测网和雷达反演降水,特别是在预报较大洪水的上游没有数据提供或观测仪器出现故障、数据传输失败的情况下,会大大影响洪水的预报时效,尤其对2~15 d以上的预报必须使用数值天气预报。研究表明:引入数值天气预报的洪水预警能够将预报时效从几小时延长到几天。但单值的数值预报不足以将其预报内在的不确定性定量表达出来,由一个集合预报系统集成的降水预报用于流域的洪水预报时,可以改进预报效果,而且可以将有些不确定性量化^[23]。

近年来,集合预报技术研究取得了重大进展,发展了多模式-多成员集合及概率预报技术,根据多模式、多预报成员的集合预报,不但可以得到丰富的降水预报,且降水预报的技巧有一定提高^[24-25]。基于全球交互式大集合 TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)中国中心归档的中国国家气象中心(NMC)、欧洲中期天气预报中心(ECM-

WF)和美国国家环境预报中心(NCEP)集合预报资料在淮河上游的大坡岭-王家坝流域上的预报评估^[26-27]以及利用淮河流域降水观测及对美国全球预报系统(GFS)1~14 d 24 h 降水量预报的评估表明^[28],集成平均在两类预报中对各子流域、各预报时效、各季节均能显著降低原单值数值预报的偏差和均方根误差。刘永和等^[29]在中国沂沭河流域对2007—2010年7—9月中国NMC、欧洲ECMWF、英国、日本和美国NCEP 5种集合预报模式的6 h集合预报降水的对比分析表明,其中任何一种模式的集合预报能力均优于其控制预报,且多模式平均预报又优于单一模式,都具有明显的预报能力提升。

水文预报不确定性的来源主要包括气象外力场(降雨、温度、风速、湿度、气压、太阳辐射等)、初始条件和边界条件(下垫面条件,如积雪量、土壤湿度、湖泊高度等)、模型结构和参数误差(方程、网格尺度、参数等)、模型输出(模拟径流量等)和模型资料(观测径流量等)等,因此,气象预报中的不确定性只代表水文预报不确定性的一个部分。洪水预报用户希望对洪水预报的不确定性估计不仅是一个最大概率的近似估计,而且是一个能够对洪水预报不确定性各种可能的定量估计。2010年美国国家科学发展的指导机构国家研究顾问委员会发表了一份关于天气、气候和水文预报不确定性的调研报告。报告强调了预报不确定性信息在终端用户利用气象预报进行决策时的重要性,同时指出一个预报如果没有定量估计它的不确定性,那么该预报不完全^[30]。有研究表明,降水预报的不确定性是产生其下游专业用户预测(如水文预报)不确定性的重要部分^[2,31-32]。在进行诸如像洪水预警的重大风险决策时,水文预报的用户希望气象做出的定量降水预报能够有助于对水文预报的不确定性进行定量估计。为了达到这一目标,世界各国预报机构开始采用集合预报技术来进行水文预报。集合预报系统能对未来的水文事件进行最大可能估计,并给出了一个广泛的结果区间,该区间综合了所有造成预报不确定性的因素。这些因素包括降水和其他气象强迫输入的不确定性、水文边界条件和初值条件估计的不确定性,还包括水文预报模型的不确定性以及模型参数的不确定性等。

在水文集合预报研究和业务领域,气象集合预报的应用价值越来越受到重视。集合预报系统可以给出气象预报和水文预报的不确定性,延长水文预

报预见期,定量分析气象水文预报要素的可预报性。集合预报系统还能够使水文学家和河流管理者受益,其优势已经得到了国内外众多水文气象学家的肯定,并促使国际上初步形成了一些新的大型国际水文气象集合预报计划——水文集合预报试验^[31,33](HEPEX[®])。借助 TIGGE 归档资料提供的一个集合预报在洪水的早期预报和预警中应用的有利时机,Pappenberger 等^[34]研究表明,以交互式全球大集合预报系统作为洪水模型的输入是未来洪水预警系统的一种有效方法和新思路。此外,其他国际机构也显示了对水文集合预报的兴趣,如莱茵水文国际委员会(CHR)、2006年3月世界气象组织

(WMO)关于集合预报和洪水预报不确定性的专家组会议以及保护多瑙河国际委员会(ICPDR)在其防洪行动计划中均采用欧洲洪水预警系统(EFAS)的集合预报。我国也有部分科研工作者开展了相关的集合预报在洪水及其概率预报研究^[35-36]。图1是应用2008年7月23日—8月3日TIGGE的NMC,NCEP和ECMWF的集合预报以及3个预报中心的大集合预报(Grand)降水量驱动洪水预报模型得到王家坝站的流量集合预报^[36]。由图1可以看出,由于集合预报是多个成员的预报,因此,集合预报成员可以捕捉导致洪水发生的可能性,集合预报可以降低空报、漏报的可能性。

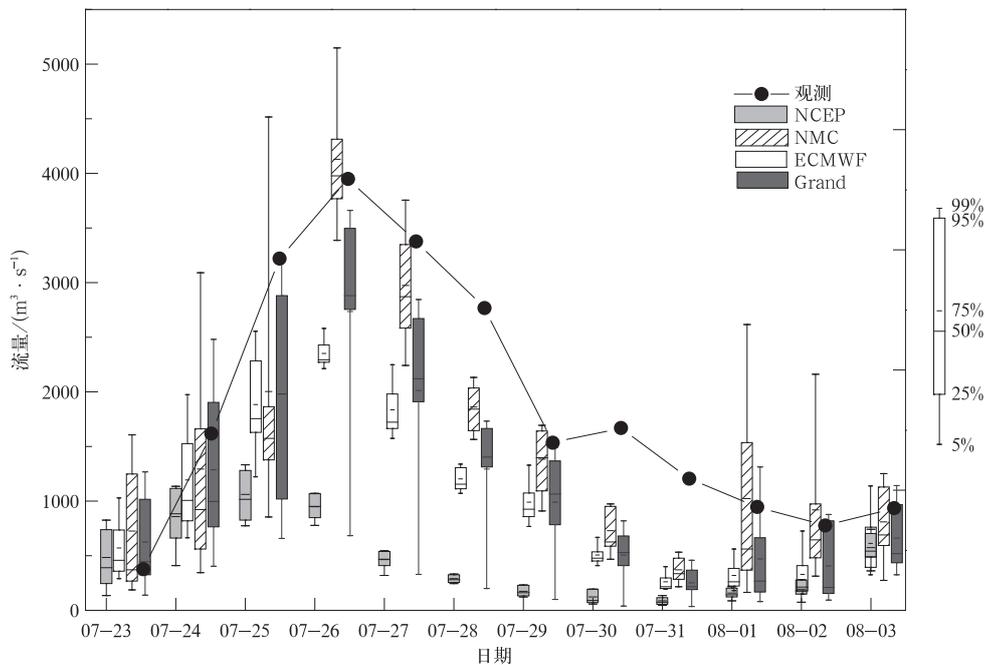


图1 2008年7月23日—8月3日王家坝站基于TIGGE的流量集合预报^[36]

Fig.1 Ensemble forecast discharge comparison of three EPSs and the Grand ensemble at Wangjiaba Station from 23 July to 3 August in 2008(from Reference [36])

正因为集合数值预报系统会提供预报时效比汇流时间长的预报,所以会产生预报附加值。因此,国际上比较著名的业务和研究机构的洪水预报系统,逐渐将目光集中到集合数值预报驱动洪水模型上,而不是采用单一的确定性预报的驱动。近年来,集合预报系统已集成到世界各地的洪水预报业务系统中,如欧盟委员会的联合研究中心(European Com-

mission Joint Research Centre, JRC/EC)洪水预报系统和欧洲洪水预警系统(European Flood Awareness System, EFAS)^[37]以及美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的先进水文预报系统(Advanced Hydrologic Prediction Service, AHPS)^[38]。法国电力公司已将ECMWF的气象集合预报融入到其水库调度系统中^[39]。表1列出了截至目前,

②HEPEX:水文集合预报试验(the Hydrologic Ensemble Prediction Experiment, HEPEX)为国际合作计划。2004年开始召集了全球的水文学家和气象学家,共同致力于改进水文预报技术的可行性。HEPEX的任务是论证如何作出可靠的、能为紧急事件管理部门和水资源部门决策过程提供依据的水文集合预报。

表 1 国际主要的数值集合预报驱动的洪水预报(准)业务系统^[40]

Table 1 Examples of operational and pre-operational flood forecasting systems routinely using ensemble weather predictions as inputs(from Reference [40])

预报服务机构及项目	集合数值预报输入场
欧盟联合研究中心的欧洲洪水预警系统(EFAS)	ECMWF, COSMO-LEPS(Consortium for Small-Scale Modelling-Limited-area Ensemble Prediction System)
佐治亚理工学院(孟加拉国项目)	ECMWF
芬兰水文局	ECMWF
瑞典水文气象局	ECMWF
美国国家海洋大气管理局先进水文预报系统(AHPS)	NOAA
概率水文和大气洪水事件模拟的中尺度高山计划示范(瑞士阿尔卑斯山地区)	COSMO-LEPS
匈牙利布达佩斯水资源研究所	ECMWF
荷兰水运局	ECMWF, COSMO-LEPS
比利时皇家气象研究所	ECMWF
比利时佛兰德环境署	ECMWF
法国气象局	ECMWF, Arpege EPS
奥地利蒂罗尔州萨尔茨堡市土地委员会	ECMWF 和 Aladin 集成模式
巴伐利亚洪水预报中心	COSMO-LEPS

国际上比较著名的气象水文预报中心业务或者准业务运行的由不同气象集合数值预报驱动的洪水模型(准)业务运行系统^[40]。由表 1 可以看出,国际主要的水文气象预报中心先后采用集合数值预报与洪水预报模式耦合的这一技术路线作为洪水预报的主要技术支撑(图 2)。此外,全球气象预报模式的开放也使得发展中国家受益,如 Webster 等^[41]使用全球集合预报系统为孟加拉国布拉马普特拉河提供预报

时效为 1~15 d 的径流预报。越来越多的实践表明,以气象集合数值预报为核心的洪水集合预报,可以为用户决策提供概率预报产品。由于预报的不确定性一直存在,如果能将不确定性量化地做出估计,那么不同的水文用户就能根据其需求和对洪水预报的依赖程度,在应用预报进行决策时做出不同的选择^[42-44],因此水文集合预报将越来越有价值,并有广阔的应用前景。

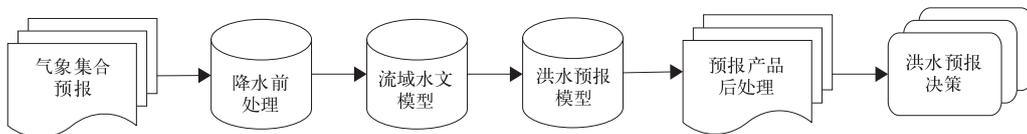


图 2 气象-水文集合预报示意图

Fig. 2 The flow chart of application of ensemble prediction system to warning of inundation

2 集合数值预报在洪水预报中的应用概况

洪水预报是预防洪灾的重要的非工程措施,较长的预报时效可以赢得防灾、救灾的重要时机。研究表明:集合预报可以大大延长洪水预报时效^[45]。即使数值模式延长到 5~6 d 的预报时效,其降水预报只有 2~3 d 的预报技巧,仍不能延长洪水的预报时效^[46]。Burger 等^[47]针对小流域地区,从 ECM-

WF 集合预报系统获得 10 年的 12 h 时段、预见期为 1~5 d 的降水和温度预报信息,运用水文模型获得概率预报的径流值,并将其与实测的洪水过程进行比较,证明了集合预报在洪水预警中的应用优势。自从 1~10 d 降水集合预报具备了一定的预报技巧,大大延长了水文预报的预报时效之后,虽然在 20 世纪 80 年代气象数值模式在洪水预报也得到了一定应用,但气象集合数值预报真正应用于洪水预报业务还是在 2003 年欧洲洪水预报系统(European

Flood Forecasting System, EFFS) 计划启动之后^[37]。该计划在跨国河流的洪水预报中,应用了包括集合预报在内的中期数值天气预报。在 2002 年欧洲易北河(Elbe)和多瑙河(Danube)跨国流域发生两次严重的洪水后,欧盟于 2003 年开始发展了欧洲洪水预警系统(European Flood Alert System, EFAS)。随后,2004 年 ECMWF 在英国里丁召开了 HEPEX 国际水文集合预报试验第 1 次研讨会。这次会议将从事气象和水文事业的科学家集合在一起,达到了 HEPEX 计划的第 1 个目的,为两个领域的科学家的相互交流提供了一个平台,制定了 HEPEX 的目标、重要性、组织结构、关键的科学问题以及国际合作手段等^[31,48]。之后,美国 NOAA 于 2005 年建成了以集合预报为核心技术的先进水文预报系统(AHPS)^[38]。Cloke 等^[40]总结了近 10 年来集合水文预报的研究和业务进展(表 1),并针对目前洪水预警的发展,提出了洪水集合预报的关键问题。李俊等^[49]将集合数值预报方法应用于湖南 4 个典型山洪个例的研究表明:与单一气象模式提供的确定性山洪预报结果相比,集合预报可以为山洪预报提供多种定量预报产品,利用集合平均预报、极值预报,可以引导对山洪采取分类应对措施;集合预报在给出降水分布的同时,还给出伴随预报结果的可信度;概率定量降水预报与水文预报模型结合,可用于概率水文预报。彭涛等^[50]利用中尺度暴雨数值模式 AREM 集合降水预报产品,通过新安江模型对湖北省漳河流域进行洪水预报发现,基于集合数值预报产品的水文预报可以在洪峰、洪量、峰现时间等水文要素上获得更多可靠的信息,提高了水文预报的可利用性。Bao 等^[51]构建了一个基于 TIGGE 驱动的水文与水力学相结合的洪水预报模型,应用集合预报系统每个成员的预报降水分别驱动洪水预报模型,得到与集合预报成员相同数目的洪水预报,以概率预报方式实现了复杂水系的洪水预报及早期预警,对淮河 2007—2008 年汛期洪水进行早期预警预报表明,使洪水预见期延长 3~5 d。吴娟等^[52]针对基于单模式陆面-大气耦合模型在洪水预报中存在不确定性问题,提出基于多模式集成降水预报减小不确定性和提高预报准确性的方案,该方案利用加拿大区域中尺度气象模式 MC2、加拿大全球谱模式 GEM 与中国国家气象中心 T213 集

合预报系统 3 种数值天气预报模式,开展了基于多模式降水集成的陆气耦合洪水预报,对淮河流域王家坝断面 3 场暴雨洪水进行预报和验证,证明了基于多模式降水集成的陆气耦合洪水预报,可以有效提高洪水预报准确性。这为减少洪水预报的不确定性、提高预报稳定性提供了一条新途径。Zhang 等^[53]和 Xu 等^[54]利用淮河下游临沂流域对 NMC, ECMWF 和 NCEP 的集合预报系统,利用 GRAPES 中尺度模式降尺度得到 6 h 降水驱动水文模型进行洪水的早期预警是可行且有效的。还有研究利用 TIGGE 集合预报作为驱动,改善了土壤水分模拟结果^[55]。此外,He 等^[56]对多中心-多模式的 TIGGE 集合预报在中国淮河流域洪水预报中的个例研究和不确定性的分析表明,集合预报的概率属性依然保留。也有研究表明,利用多中心的超级集合预报或者多集合成员的集成,可以使洪水预报的不确定性量化^[57]。

3 集合数值预报在洪水预报中的研究热点

3.1 多模式超级集合预报的水文集合预报应用

为了捕捉除不同单一数值预报模型集成的集合预报系统的初始条件和物理参数化过程不确定性之外的模型结构和资料同化带来的不确定性,气象集合数值预报由此发起了在 THORPEX 计划下的 TIGGE 全球各国和地区业务中心的联合行动^[58-59]。该计划提供了 12 个全球集合预报系统,共 232 个集合成员,这为水文集合预报提供了一个机会。

相比多个预报中心的集合预报大集合而言,单一预报中心的集合预报系统仅能解决一些数值天气预报内在的不确定性,即初始条件和随机物理过程的不确定性^[21]。Buizza^[24]认为由多个确定性模型组成的集合预报系统,用于概率预测超出非线性误差增长幅度密度函数的方法是可行的。大集合预报系统,即多个预报中心的 EPS 大集合,可以改善数值模拟和资料同化引起的不确定性计算结果^[57]。这对形成各种可能的不确定性解决方法有重大影响,尤其是捕获导致洪水的极端降水产生的尾分布。因此,多模式系统能够更好地代表真实的概率分布预测,这在其他研究领域也适用。Pappenberger 等^[34]将 7 个中心的集合预报系统(216 个预报成员)

应用于欧洲洪水预警系统(EFAS)的 LISFLOOD-RR 模式,对 2007 年 10 月罗马尼亚多瑙河流域的洪水后报试验发现,以交互式全球大集合预报系统作为洪水模型的输入,是未来洪水预警系统的一种有效方法和新途径。He 等^[3]首次建立了由 TIGGE 数据驱动的大气-水文-水力模型的串联概率洪水预报系统,探索了 TIGGE 数据在中尺度流域的洪水概率预报,结果表明:降水的不确定性可以通过该串联系统传播,不同中心集合预报的洪水预报差别较明显,但总体预报偏大并代表了不同的不确定性;同时也发现目前的集合数值预报系统的分辨率对于这样尺度的流域存在缺陷,这意味着必须改进集合数值预报的分辨率或者发展降尺度技术,以缩小气象和水文预报的空间分辨率的差距。

还有一个原因使多模式超级集合预报显示出其优势,即当前超级集合预报受计算机能力的限制,因为集合预报大集合提供了运行具有不同次网格尺度参数化过程和不同潜在物理过程的气象模式方案的一种可选途径。而超级集合预报大集合与流域水文模型耦合,可以提供改善后的早期洪水预警^[23]。

3.2 模式分辨率和集合成员数对水文集合预报系统的影响

气象数值天气预报的研究和实践已经证明极端天气数值模拟对模式分辨率非常敏感,因此,采取增加集合预报模式分辨率的方式能够提高极端天气预报的可能性。仅增加模式水平分辨率的研究发现对奇异向量的结构影响不大,但计算耗时成倍增加^[60]。若采用合适的模式分辨率来构造集合预报系统,预报准确率更高^[61]。还有研究表明:当集合成员数增加时,也仅有部分统计参数显示可提高预报技巧。由此可以看出,模式分辨率和集合成员的增加能对集合预报系统产生正面影响,但会增加计算机的计算成本。因此,平衡预报性能与计算成本仍然是一个难以解决的突出问题。有研究指出:高分辨率的单一模式确定性预报有助于预报员对各种不同的中小尺度天气现象建立概念模型;而低分辨率集合预报有助于量化预报的不确定性,它们各有优势^[62]。因此,人们渐渐认识到如何将模式分辨率与集合预报系统相联系,将它们结合起来才能最大程度发挥预报模式的潜能,从而发挥分辨率高的单一模式确定性预报和分辨率低的集合预报各自的优

势,并建立它们之间良好的平衡,达到将现有气象和水文集合预报系统改进后能够包含所有不确定性来源的目的,是集合预报技术业务应用中需要考虑的关键技术之一。后来有学者提出采用混合分辨率的模式分辨率方案,使不同分辨率的模式反映不同系统的预报不确定性,使得高分辨率模式更多反映了系统特征,而低分辨率集合预报补充了预报可靠性的信息^[63]。

3.3 多模式超级集合预报在中小尺度流域的应用

ECMWF 于 2009 年建立了以 TIGGE 集合预报与欧洲洪水预警系统 EFAS 结合、用水文模型 LISFLOOD,在覆盖欧洲的分辨率为 5 km 格点上进行长达 10 d 的洪水早期预警,并取得了初步成功^[40]。最近有研究表明,利用集合预报和流域分布模型可以进行洪水实时预报。De Roo 等^[64]开发了欧洲大尺度洪水预报系统(EFFS),该系统结合了欧洲中期天气预报的集合预报系统、LISFLOOD-RR (5 km 格点分辨率)和 LISFLOOD-FP(50 m 格点分辨率)。结果表明:大多数集合预报成员有低估河流流量的倾向,但总体结果较理想。此外,Bartholmes 等^[65]利用两个欧洲区域模型和 ECMWF 集合预报应用于针对 Po 河的 TOPKAP 模型 1 km 格点分辨率洪水预报,结果表明:定量降水预报不可靠,在预报时间和预报量级上均出现偏低的情况。Cluckie 等^[66]利用 ECMWF 集合预报开发的分布式降水-径流模型(GBDM),较早利用动力降尺度技术降到 2 km 格点分辨率,先进行空间偏差纠正,最后进行时间分辨率调整,该项研究明确了利用集合预报在洪水预报的潜在价值。但也揭示了一个共识:更高的精细尺度降水的低估导致流量预报的(低)偏差。上述研究表明,从天气领域到洪水领域的不确定性传播值得考虑,这种不确定性导致了河流量集合预报较大的发散度,从而导致洪水预报较大的发散度。He 等^[3]在假设集合预报驱动小尺度流域的洪水预报不确定性不能由单一集合预报的有限集合成员决定,只能在大集合成员差异的基础上,选择有大量观测数据和相对小的(与数值天气预报的分辨率相比)流域尺度(4062 km²)的 Senvem 河上游为研究目标,开创了由 TIGGE 集合预报驱动的耦合大气-水文-水力模型的串联系统进行早期的洪水预警研究的先例。研究表明:数值天气预报、水文和水力预报

一样存在许多不确定性。Beven 等^[67]和 Pappenberger 等^[8]研究也得出类似的结论。

3.4 水文集合预报前处理和后处理

3.4.1 水文集合预报前处理

近年来,虽然降水预报的准确率有了很大提高,但仍难以满足洪水预报的需求。因此,对集合数值预报的输出要针对洪水模型的需求进行后处理,相对于洪水预报模型来讲是前处理(图2)。集合数值预报后处理可以将天气、气候预报的输出结果处理为水文模型的输入,从而提高降水与气温的预报准确率。

目前的水文集合预报前处理方法除了类似气象上使用的传统完美预报法(PP)、模型输出统计法(MOS)和贝叶斯方法^[68-71]外,还有层次模型法^[72]和可靠性集合平均方法(REA)等。Sloughter 等^[73]将

贝叶斯方法推广应用于日降水的概率预报。Schaake 等^[74]也提出了基于典型事件的集合预报前处理方法。Clark 等^[75]在 MOS 的数理统计基础上采用了 Schaake Shuffle 方法改进了 MOS 方法。Liu 等^[28]采用 Schaake Shuffle 方法对 NCEP 改进的全球集合预报系统具有 15 个集合成员的日降水预报进行偏差订正,利用淮河流域 167 个气象站的日降水量进行检验表明,经过处理的集合预报明显优于气候概率(图3)。Yang 等^[76]采用贝叶斯平均法对 NCEP 集合预报系统在淮河流域的 3 个月的逐日降水进行概率化,证明经贝叶斯平均法订正后的降水能够捕捉到极端降水信息。此外,NMC 集合预报系统在淮河流域 3 个月的逐日降水经贝叶斯平均法订正后的结果表明:24 h,48 h,72 h 降水预报准确性比订正前有所提高^[77-78]。

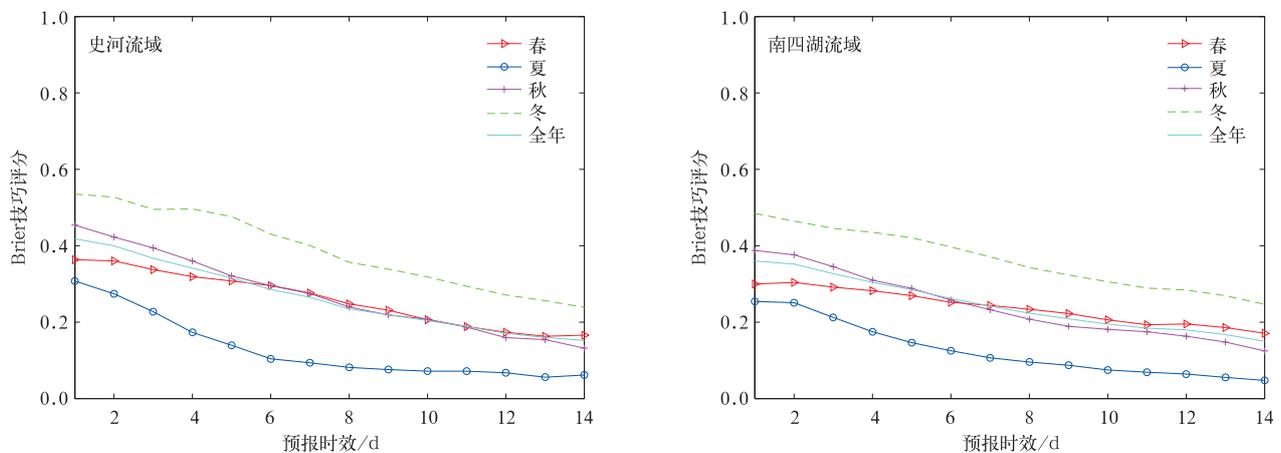


图3 淮河流域两个子流域不同季节、不同预见期(1~14 d)集合预报累积降水后处理 Brier 技巧评分^[28]

Fig. 3 Brier skill scores(BSS) of post-processing ensemble forecasts of cumulative precipitation for different lead times(1-14 days) and different seasons(including all seasons) in two sub-basins of the Huai River Basin(from Reference [28])

3.4.2 水文集合预报后处理

正如气象数值预报输出结果不能作为最终对外发布的天气预报预警一样直接发布,洪水模型的预报输出结果也不能作为最终结论来发布,它存在许多不确定性。与气象数值预报的后处理类似,水文集合后处理方法主要目的是根据已知的历史观测流量和模型模拟或预报的流量建立回归统计模型。从概率上讲,水文集合后处理是求取水文集合预报对应观测值的条件概率密度函数^[79]。

基于实际观测和模拟流量之间的差异来源,对 4 种不同的水文预报误差估计方法进行研究发现,其中使用最广泛的是将实际流量作为模型输出与一个误差项之和,通过更新输出变量衡量预报中误差的方法^[80-81]。Goswani 等^[82]根据这种思想,对 8 种更新的方法校正误差的性能进行了比较和评估。Seo 等^[83]提出了一个简单有效的后处理器,用于集合流量预报系统评估水文模拟的不确定性和误差校正,且已在美国气象部门投入业务使用。还有利用

模拟和观测流量校正集合轨迹消除误差的方法,在多瑙河流域的试验证明改善了洪水集合预报的有效性^[84]。Bogner 等^[85]则使用了一种对观测和模拟流量进行小波变换与状态空间模型相结合的方法,量化预报与实际观测的误差。利用贝叶斯理论为莱茵河流域的水文集合预报系统设计了后处理方案,结果表明后处理过程有效降低了水文集合预报模拟的误差^[86]。姜迪等^[87]利用国际模型参数估计试验

(Model Parameter Estimation Experiment, MOPEX)资料,采用通用线性模型(The general linear model, GLM)对水文集合预报的校正研究表明:GLM 后处理器可以产生可靠的水文集合预报,对于有预报偏差的水文集合预报的校正效果显著,该方法可以有效降低水文模拟误差,输出更接近实际观测的水文预报(图4)。

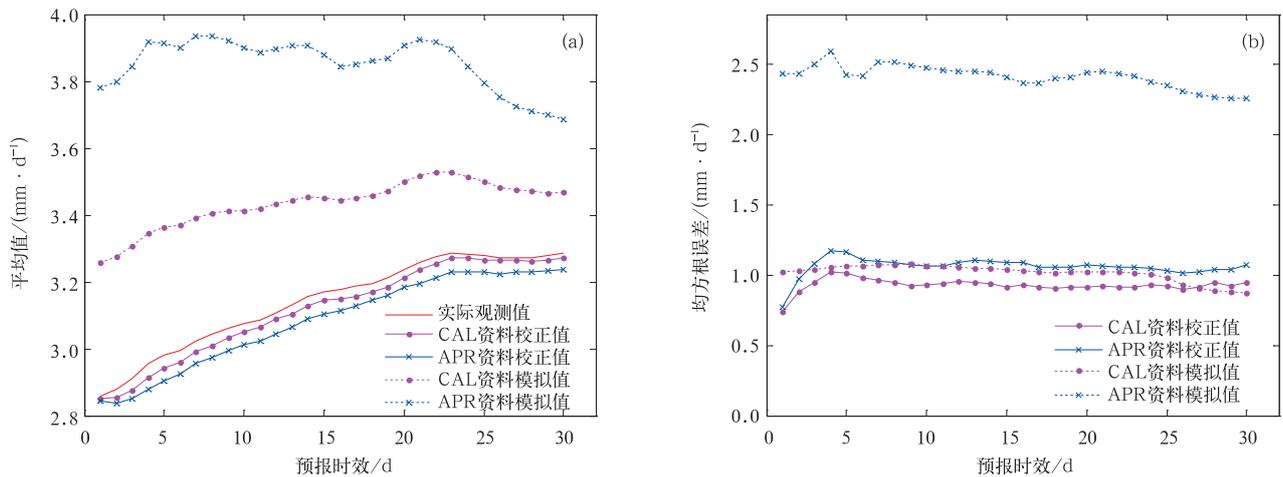


图4 水文集合预报后处理方法的模拟结果评估^[87]

(a)平均值,(b)均方根误差

Fig. 4 Evaluation of post-processing of different simulation(from Reference [87])

(a)mean value,(b)root mean square error

3.5 水文集合预报的检验方法

评估不同的预报方法需要一系列标准的预报验证工具。各个国家非常重视洪水预报的检验问题,HEPEX 计划将检验也作为一项重要的试验内容。对于确定性预报,检验方法通常有皮尔森相关系数,用于检验预报值和观测值的相关关系,变化范围为0~1。偏差用于检验一段长时间的预报平均值与观测平均值的偏差,偏差值越接近于0越好。均方根误差技巧评分和均方根误差用于检验一段很长时间的预报误差,均方根误差技巧评分可用于评估预报误差的发散。均方根误差技巧评分为1时,表示完全准确的确定性预报;均方根误差技巧评分为0时,表示系统的预报性能与参考系统相同;均方根误差技巧评分小于0时,表示系统预报较参考系统差^[88]。

对于概率预报,检验方法有布莱尔技巧评分

(Brier Skill Score, BSS)。该评分用于评估相对于一个参考系统集合预报系统的预报性能,其值为0~1,评分为1时,表示完全准确的确定性预报;评分为0时,表示系统的预报性能与参考系统相同;评分小于0时,表示系统预报较参考系统差。采用布莱尔技巧评分需要使用观测得到的气候概率预报为参考系,用布莱尔技巧评分检验集成预报的降水概率的预报性能^[88]。连续的分级概率评分(Continuous Ranked Probability Skill Score, CRPSS)用于检验预报累积分布函数与相应的观测累积分布函数之间误差平方的总和,完美预报的连续的分级概率评分为0。连续的分级概率评分用于检验预报相对于参考预报是否有所提高。可靠性曲线用于检验预报概率和观测概率的关系,将不同概率分类,及其对应的不同概率分类条件下检验事件的观测频率绘制在一起,描述集合预报系统是否可靠,或产生有偏差的

概率预报等。

4 讨论与展望

在过去的 10 年里,国际上各个洪水预报机构在预报中增加了水文集合预报系统,许多研究表明:基于水文集合预报的洪水预报增加了预报附加值并延长了预警提前时间。应用水文气象概率预报已经成为未来的发展趋势。对欧美等气象业务发达国家的水文气象业务经验分析表明:水文气象概率预报从期望值来说准确率不仅高于确定性预报,还可以提高预报准确性,特别是能改进涨水时段水位低估的情况。从服务上来说,水文气象概率预报可以考虑预报的不确定性,决策时能定量估计各种风险和后果,是预报与决策之间的桥梁,可使预报效益得到更好发挥。

尽管如此,目前只有少数国家的气象中心在业务上使用水文集合预报^[40],这可能涉及许多原因,有科学上的、技术上的,也有文化上的。不仅如此,对预报员而言,水文集合预报广泛使用的巨大挑战依然存在。如水文集合预报必须接收和处理大量的中期天气集合预报产生的数据^[33,89],且需要很多业务中心的协同工作。然而,与计算洪水预报本身的巨大计算量相比,能够在概率预报基础上做出洪水预警决策是有意义的。

对于洪水集合预报前处理和后处理的各种技术已经处于探索和验证阶段。目前针对水文集合预报,是否有“最好的实践”意义仍不明确^[90]。除此之外,如何更好理解基于概率预报的洪水预警决策仍存在许多困难和挑战^[91-93]。

此外,目前没有合适的途径表示水文预报的不确定性以及如何将这种不确定信息传递给洪水预报的使用者,水文集合预报发布仍需要做大量推广和培训工作。因此,利用直接的、易于理解的方式为用户传递水文预报不确定性,开发更多界面友好的产品促进水文集合预报的操作应用非常有意义。He 等^[56]研究发现:集合预报系统可以服务于洪水预报预警及相关从业人员。如伦敦国王学院在塞文河流域的试点项目是世界范围内第 1 次将 TIGGE 多模式集合气象预报与分布式水文水力模型耦合应用,通过 TIGGE 集合预报驱动大气-水文-水力耦合系

统,证实集合预报系统能够考虑模型的不确定性、边界条件和资料同化的不确定性,也可以应用于洪水预报。其推广前景还要在不同流域范围内、不同气候条件的区域,进行更多的洪水预报试验,以便确定其应用技术的普遍性。

2006 年中国建立了 T213 全球中期集合预报系统和 中尺度区域集合预报系统。借助世界气象组织的世界天气研究计划——观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)之 TIGGE 计划,TIGGE 中国中心已接收 ECMWF,NCEP,CMC(加拿大气象中心,Canadian Meteorological Centre)等世界各预报中心的集合预报资料,预报时效达 10~16 d。中国在面向 TIGGE 的集合预报关键应用技术方面已做了大量工作,为水文水力领域中应用该技术做好了准备,可以促使集合数值预报产品在实际洪水预报中尽早发挥作用。

参 考 文 献

- [1] Reynard N S, Prudhomme C, Crooks S M. The flood characteristics of large UK rivers; Potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*, 2004, 48(2-3): 343-359.
- [2] 张洪刚, 郭生练, 何新林, 等. 水文预报不确定性的研究进展与展望. 石河子大学学报: 自然科学版, 2006, 24(1): 15-21.
- [3] He Y, Wetterhall F, Cloke H L, et al. Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand ensemble weather predictions. *Meteorological Applications (Special Issue: Flood Forecasting and Warning)*, 2009, 16(1): 91-101.
- [4] Andrew W W, Dennis P L. An ensemble approach for attribution of hydrologic prediction uncertainty. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: 14, L14401.
- [5] Ahrens B, Jaun S. On evaluation of ensemble precipitation forecasts with observation-based ensembles. *Adv Geo Sci*, 2007, 10: 139-144.
- [6] Gourley J J, Vieux B E. A method for evaluating the accuracy of quantitative precipitation estimates from a hydrologic modeling perspective. *J Hydrometeorol*, 2005, 6(2): 115-133.
- [7] Krzysztofowicz R. Bayesian system for probabilistic river stage forecasting. *J Hydrol*, 2002, 268(1-4): 16-40.
- [8] Pappenberger F, Beven K, Hunter N, et al. 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 Syst Sci*, 2005, 9(4): 381-393.
- [9] Verbunt M, Zappa M, Guttz J, et al. Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. *J Hydrol*, 2006, 324(1-4): 224-238.
- [10] 陆桂华, 吴志勇, Lei W, 等. 陆气耦合模型在实时暴雨洪水预

- 报中的应用. 水科学进展, 2006, 17(6): 847-852.
- [11] Lin C A, Lei W, Lu G H, et al. Atmospheric-hydrological modeling of severe precipitation and floods in the Huaihe River Basin, China. *J Hydrol*, 2006, 330: 249-259.
- [12] 王莉莉, 陈德辉, 赵琳娜. GRAPES 气象-水文模式在一次洪水预报中的应用. 应用气象学报, 2012, 23(3): 274-284.
- [13] 彭涛, 位承志, 叶金桃, 等. 汉江丹江口流域水文气象预报系统. 应用气象学报, 2014, 25(1): 112-119.
- [14] 王元. 中国致灾暴雨研究的进展和若干热点问题——第四次全国暴雨学术研讨会. 科学技术与工程, 2002, 2(6): 88-91.
- [15] 何光碧, 屠妮妮, 张利红. 多模式对四川一次强降水过程不确定性预报分析. 高原山地气象研究, 2009, 29(4): 18-26.
- [16] 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. 气象, 2011, 37(5): 540-546.
- [17] 陈活泼, 孙建奇, 陈晓丽. 我国夏季降水及相关大气环流场未来变化的预估及不确定性分析. 气候与环境研究, 2012, 17(2): 171-183.
- [18] 梁莉, 赵琳娜, 巩远发, 等. 淮河流域汛期 20 日内最大日降水量概率分布. 应用气象学报, 2011, 22(4): 421-428.
- [19] Demeritt D, Cloke H, Pappenberger F, et al. Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. *Environ Hazards*, 2007, 7(2): 115-127.
- [20] Xuan Y, Cluckie D, Wang Y. Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilizing short-range rainfall prediction. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2009, 13: 293-303.
- [21] Roulin E. Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble prediction. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2007, 11: 725-737.
- [22] Day G N. Extended streamflow prediction using NWSRFS. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1985, 111: 157-170.
- [23] Cloke H L, Pappenberger F. Evaluating forecasts for extreme events for hydrological applications: An approach for screening unfamiliar performance measures. *Meteorological Applications*, 2008, 15(1): 181-197.
- [24] Buizza R. The value of probabilistic prediction. *Atmos Sci Lett*, 2008, 9: 36-42.
- [25] Friederichs P, Hense A. A probabilistic forecast approach for daily precipitation totals. *Wea Forecasting*, 2008, 23(4): 659-673.
- [26] 赵琳娜, 吴昊, 田付友, 等. 基于 TIGGE 的流域概率性降水预报评估. 气象, 2010, 36(7): 133-142.
- [27] Zhao Linna, Tian Fuyou, Wu Hao, et al. Verification and comparison of probabilistic precipitation forecasts using the TIGGE data in the upriver of huaihe basin. *Advances in Geosciences*, 2011, 29: 95-102.
- [28] Liu Y, Duan Q, Zhao L, et al. Evaluating the predictive skill of NCEP GFS ensemble precipitation forecasts in China's Huai River Basin. *Hydrological Process*, 2013, 27: 57-74.
- [29] 刘永和, 严中伟, 冯锦明, 等. 基于 TIGGE 资料的沂沭河流域 6 小时降水集合预报能力分析. 大气科学, 2013, 37(3): 539-551.
- [30] 王东海, 杜钧, 柳崇健. 正确认识和对待天气气候预报的不确定性. 气象, 2011, 37(4): 385-391.
- [31] Schaake J, Hamill T H, Buizza R, et al. HEPEX—The hydrological ensemble prediction experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88(10): 1541-1547, doi:10.1175/BAMS-88-10-1541.
- [32] 武震, 张世强, 丁永建. 水文系统模拟不确定性研究进展. 中国沙漠, 2007, 27(5): 890-896.
- [33] Thielen J, Schaake J, Hartman R, et al. Aims, challenges and progress of the Hydrological Ensemble Prediction Experiment (HEPEX) following the third HEPEX workshop held in Stresa 27 to 29 June 2007. *Atmos Sci Lett*, 2008, 9: 29-35.
- [34] Pappenberger F, Bartholmes J, Thielen J, et al. New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(10): L10404.
- [35] 包红军, 赵琳娜. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究. 水利学报, 2012, 43(2): 216-224.
- [36] Zhao Linna, Qi Dan, Tian Fuyou, et al. Probabilistic flood prediction in the Upper Huaihe catchment using TIGGE data. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 26(1): 62-71.
- [37] Thielen J, Bartholmes J, Ramos M H, et al. The European flood alert system-part 1: Concept and development. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2009, 13(2): 125-140.
- [38] Mcenery J, Ingram J, Duan Q, et al. NOAA's advanced hydrologic prediction service. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(3): 375-385.
- [39] Ramos M, Bartholmes J, Thielen-del P J. Development of decision support products based on ensemble forecasts in the European flood alert system. *Atmos Sci Lett*, 2007, 8(4): 113-119.
- [40] Cloke H L, Pappenberger F. Ensemble flood forecasting: A review. *J Hydrology*, 2009, 375: 613-626.
- [41] Webster P J, Jian J, Hopson T M, et al. Extended-range probabilistic forecasts of ganges and brahmaputra floods in bangladesh. *Bull Amer Meteor Soc*, 2010, 91(11): 1493-1514.
- [42] 陈静, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展. 应用气象学报, 2002, 13(4): 497-507.
- [43] 杜钧. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [44] 杜钧, 陈静. 天气预报的公众评价与发布形式的变革. 气象, 2010, 36(1): 3-6.
- [45] Tracton M S, Kalnay E. Operational ensemble prediction at the national meteorological center: Practical aspects. *Wea Forecasting*, 1993, 8: 379-398.
- [46] Buizza R, Hollingsworth A, Lalauette F, et al. Probabilistic predictions of precipitation using the ECMWF ensemble prediction system. *Wea Forecasting*, 1999, 14: 168-189.
- [47] Burger G, Reusser D, Kneis D. Early flood warnings from empirical (expanded) downscaling of the full ECMWF ensemble prediction system. *Water Resources Research*, 2009, 45(10):

- 1-15.
- [48] Schaake J, Franz K, Bradley A, et al. The Hydrologic Ensemble Prediction Experiment (HEPEX). *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2006, 3: 3321-3332.
- [49] 李俊, 廖移山, 张兵, 等. 集合数值预报方法在山洪预报中的初步应用. *高原气象*, 2007, 23(4): 854-861.
- [50] 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.
- [51] Bao Hongjun, Zhao Linna. Development and application of an atmospheric-hydrologichydraulic flood forecasting model driven by TIGGE ensemble forecasts. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 26(1): 93-102.
- [52] 吴娟, 陆桂华, 吴志勇, 等. 基于多模式降水集成的陆气耦合洪水预报. *水文*, 2012, 32(5): 1-6.
- [53] Zhang W C, Xu J W, Liu Y H, et al. A Catchment Level Early Flood Warning Approach by Using Grand-ensemble Weather Predictions: Verification and Application for a Case Study in the Linyi Catchment, Shangdong, China. TIGGE-B Poster Session, Third THORPEX International Science Symposium (TTISS), 2009: 14-18.
- [54] Xu Jingwen, Zhang Wanchang, Zheng Ziyang, et al. Early flood warning for Linyi watershed by the GRAPES/XXT model using TIGGE data. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 26(1): 103-111.
- [55] Liu J, Xie Z H. Improving simulation of soil moisture in China using multiple meteorological forcing ensemble approach. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2013, 17: 3355-3369.
- [56] He Y, Wetterhall F, Bao H, et al. Ensemble forecasting using TIGGE for the July-September 2008 floods in the Upper Huai catchment: A case study. *Atmos Sci Lett*, 2010, 11(2): 132-138.
- [57] Goswami M, O'Connor K, Bhattarai K. Development of regionalization procedures using a multi-model approach for flow simulation in an un-gauged catchment. *J Hydrol*, 2007, 333(2-4): 517-531.
- [58] Shapiro M A, Thorpe A J. THORPEX International Science Plan. WMO/TD, 2004: 1246.
- [59] Park Y Y, Buizza R, Leutbecher M. TIGGE: Preliminary Results on Comparing and Combining Ensembles. ECMWF TM 548, ECMWF: Reading, 2007.
- [60] Buizza R, Petroliaigis T, Palmer T N, et al. Impact of ensemble resolution and size on the performance of an ensemble prediction system. *Quart J Royal Meteor Soc*, 1998, 124: 1935-1960.
- [61] Mullen S L, Buizza R. The impact of horizontal resolution and ensemble size on probabilistic forecasts of precipitation by the ECMWF ensemble prediction system. *Wea Forecasting*, 2002, 17(2): 173-191.
- [62] Paul J R, David M S, Brian A C, et al. Toward improved prediction: High-resolution and ensemble modeling systems in operation. *Wea Forecasting*, 2004, 19(5): 936-949.
- [63] Du J, Traction M S. Implementation of a Real-time Short-range Ensemble Forecasting System at NCEP: An Update // Preprints, 9th Conference on Mesoscale Process. 2001: 355-356.
- [64] De Roo A, Gouweleeuw B, Thielen J, et al. Development of a European flood forecasting system. *International Journal of River Basin Management*, 2003, 1(1): 49-59.
- [65] Bartholmes J, Todini E. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2005, 9(4): 333-346.
- [66] Cluckie I D, Xuan Y, Wang Y. Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilizing short-range rainfall prediction. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2006, 3: 3211-3237.
- [67] Beven K, Romanowicz R, Pappenberger F, et al. The Uncertainty Cascade in Flood Forecasting // Balbanis P, Lambroso D, Samuels P. Advances and Implementation of Flood Forecasting Technology. ACTIF: Tromso, 2005.
- [68] Klein W H, Lewis B M, Enger I. Objective prediction of five-day mean temperatures during winter. *J Atmos Sci*, 1959, 16: 672-682.
- [69] Glahn B, Peroutka M, J Wiedenfled, et al. MOS uncertainty estimates in an ensemble framework. *Mon Wea Rev*, 2009, 137(1): 246-268.
- [70] Raftery A E, Gneiting T, Balabdaoui F, et al. Using Bayesian Model averaging to calibrate forecast ensembles. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 1155-1174.
- [71] 刘建国, 谢正辉, 赵琳娜, 等. 基于 TIGGE 多模式集合的 24 小时气温 BMA 概率预报. *大气科学*, 2013, 37(1): 43-53.
- [72] Krzysztofowicz R, Maranzano C J. Bayesian Processor of Output for Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts. Virginia: University of Virginia, 2006.
- [73] Sloughter J M, Raftery A E, Gneiting T, et al. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using bayesian model averaging. *Mon Wea Rev*, 2007, 135: 3209-3220.
- [74] Schaake J, Demargne J, Hartman R, et al. Precipitation and temperature ensemble forecasts from single-value forecasts. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2007, 4: 655-717.
- [75] Clark M, Gangopadhyay S, Hay L, et al. The Schaake shuffle: A method for reconstructing space-time variability in forecasted precipitation and temperature fields. *J Hydrometeorology*, 2004, 5(1): 243-262.
- [76] Yang Chi, Yan Zhongwei, Shao Yuehong. Probabilistic precipitation forecasting based on ensemble output using generalized additive models and bayesian model averaging. *J Meteor Res*, 2012, 26(1): 1-12.
- [77] 梁莉, 赵琳娜, 齐丹, 等. 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*, 2013, 24(4): 416-424.
- [78] Liu J, Xie Z H. BMA probabilistic quantitative precipitation forecasting over the Huaihe basin using TIGGE multi-model ensemble forecasts. *Mon Wea Rev*, 2014, 142: 1542-1555.
- [79] 段青云, 叶爱中. 改善水文气象预报的统计后处理. *水资源研*

- 究,2012,1:161-168.
- [80] O'Connell P E, Clarke R T. Adaptive hydrological forecasting: A review. *Hydrol Sci Bull*, 1981, 26(2): 179-205.
- [81] Refsgaard J C. Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrology*, 1997, 28(2): 65-84.
- [82] Goswami M, O'Connor K M, Bhattarai K P, et al. Assessing the performance of eight real-time updating models and procedures for the Brosna River. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2005, 9(4): 394-411.
- [83] Seo D J, Herr H D, Chaake J S. A statistical post-processor for accounting of hydrologic uncertainty in short-range ensemble streamflow prediction. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2006, 3(4): 1987-2035.
- [84] Bogner K, Thielen J, Bartholmes J, et al. Bias Correction Methods and Evaluation of an Ensemble Based Hydrological Forecasting System for the Upper Danube Catchment // 3rd HEPEX Workshop Book of Abstracts. EUR22861 EN, 2007: 21-22.
- [85] Bogner K, Kalas M. Error-correction methods and evaluation of an ensemble based hydrologic forecasting system for the Upper Danube catchment. *Atmos Sci Lett*, 2008, 9(2): 95-102.
- [86] Reggiani P, Renner M, Weerts A H, et al. Uncertainty assessment via bayesian revision of ensemble streamflow predictions in the operational river Rhine forecasting system. *Water Resources Research*, 2009, 45(2), doi:10.1029/2007WR006758.
- [87] 姜迪, 智海, 赵琳娜, 等. 通用线性模型在气象水文集合预报后处理中的应用. *大气科学学报*, 2014, 37(2): 229-236.
- [88] 刘莹, 赵琳娜, 段青云, 等. 一种由单值预报生成概率预报的方法 // 第28届中国气象学会年会论文集——S17 第三届研究生年会. 北京: 气象出版社, 2011: 718.
- [89] Zappa M, Rotach M W, Arpagaus M, et al. MAP D-PHASE: Real-time demonstration of hydrological ensemble prediction systems. *Atmos Sci Lett*, 2008, 2: 80-87, doi: 10.1002/asl.183.
- [90] Preface: Hydrological Ensemble Prediction Systems. *Hydrol Process*, 2013, 27: 1-4.
- [91] Demeritt D, Nobert S, Cloke H L, et al. Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. *Meteorological Applications*, 2010, 17(2): 209-222, doi: 10.1002/met.194.
- [92] Nobert S, Demeritt D, Cloke H L. Informing operational flood management with ensemble predictions: Lessons from Sweden. *Journal of Flood Risk Management*, 2010, 3: 72-79.
- [93] Ramos M H, Mathevet T, Thielen J, et al. Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: Mission impossible? *Meteorological Applications*, 2010, 17: 223-235, doi: 10.1002/met.201.

The Progress on Application of Ensemble Prediction to Flood Forecasting

Zhao Linna¹⁾ Liu Ying²⁾ Dang Haofei³⁾ Jiang Di⁴⁾ Duan Qingyun⁵⁾
Wang Binyan³⁾ Bai Xuemei³⁾ Liang Li⁶⁾⁷⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Sichuan Provincial Meteorological Observatory, Chengdu 610072)

³⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

⁴⁾ (Nanjing Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210009)

⁵⁾ (College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

⁶⁾ (Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

⁷⁾ (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

Hydrological Ensemble Prediction is a forming and developing branch of hydrology. Its development can be roughly divided into two stages. The first stage is the longer term streamflow predictions stage from 1970 to the end of the 20th Century, and the second stage is to learn the concept of the numerical weather forecast applied to hydrological ensemble prediction at the beginning of the 21st Century. Compared with the single deterministic prediction meteorological, ensemble numerical forecasting can describe the uncertainly quantitatively. In recent ten years, the application of meteorological ensemble numerical forecasting to hydrological ensemble prediction on the warning of flood forecasting attaches great importance. In addition to single ensemble system, multiple ensemble system is gradually applied to hydrological ensemble forecast, even in some small basins. To study potential benefits of using the TIGGE database in early flood warning, an atmospheric-hydrologic-hydraulic coupled cascade system driven by TIGGE ensemble forecasts is set up. Some hydrological ensemble prediction systems use high resolution ECMWF-EPS or limited area EPS as weather forecasts as initial and boundary conditions. Over the past decade, many studies show that forecasts based on hydrological ensemble prediction systems not only can add accuracy but also increase the warning lead time. The European Flood Alert System and the Advanced Hydrologic Prediction Services of NOAA realize real-time prediction in flood forecast, but there are still some problems, such as large amount of calculation and massive data to handle. The various pre-process and post-process of ensemble forecasts of techniques are in the stage of exploration and verification. Besides, there are a great deal of challenges and difficulties in understanding how to make flood warning decisions based on probabilistic forecasts better.

Key words: ensemble prediction; uncertainty; hydrological ensemble prediction; flood warning