

气象集合预报在水文领域中的应用研究进展

卢迪¹, 彭勇^{1,2,3}, 徐炜¹, 周惠成¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;
3. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 集合预报是针对数值预报的不确定性而发展起来的概率预报技术, 在水库控制中应用集合预报信息可以延长水文预报有效预见期并且提高预报精度。目前, 集合预报已在发达国家中得到广泛的应用。现概括了集合预报的发展过程, 并从洪水预警、径流预报、水库调度决策3个方面分析了集合预报在水文领域中的研究进展, 探讨了集合预报的检验和集合预报应用中存在的关键问题。

关键词: 集合预报; 水文; 洪水预警; 径流预报

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0116-04

Research Progress on Hydrological Application of Meteorological Ensemble Forecast

LU Di¹, PENG Yong^{1,2,3}, XU Wei¹, ZHOU Hui cheng¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology and Water Resources and Water Conservancy Engineering Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Ensemble forecast is a probabilistic forecast technique developed from the uncertainty of numerical prediction. Using ensemble forecast can improve the forecast time and accuracy of hydrological forecast in reservoir operation. It has been widely used in developed countries. In this paper, the development progress of ensemble forecast was introduced, and the research progress on ensemble forecast in hydrological application was analyzed from three aspects, including the flood warning, runoff prediction, and reservoir regulation. In addition, the verification of ensemble forecast and key issues in the hydrological application were discussed.

Key words: ensemble forecast; hydrology; flood warning; runoff prediction

数值预报初值的不确定性、预报模式的不确定性及大气的混沌特性是影响确定性预报水平的主要因素。集合预报针对数值预报的不确定性, 认为预报应该是在大气空间中合适的概率密度函数随时间的演变, 即集合预报是由确定性预报向概率性预报的转变, 提高了预报准确率并弥补单一确定性预报的不足。

随着气象集合预报的发展, 气象集合预报与水文研究结合得越来越紧密。集合预报可减少单值预报的不确定性并且提高水文预报精度, 从而增加水文预报有效的预见期, 提

高水文预报的可利用性。应用气象集合预报对于实时洪水预警、水资源可持续利用、缓解水资源供需矛盾及促进区域经济规划和发展等方面具有重要意义, 同时在防灾、抗灾、保障国民经济和国防建设等方面也有广阔的应用前景。目前, 国外在水文领域已有很多集合预报的应用研究案例, 尤其是针对城市防洪安全的洪水预警, 而在国内相关研究较少。

1 集合预报发展概况

国外从20世纪60年代就开始了集合预报的研究。

收稿日期: 2013-08-07 修回日期: 2014-02-14 网络出版时间: 2014-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109025); 中央高校基本科研业务费专项(DUT13JS06); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2012490411); 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放基金资助项目(1214)

作者简介: 卢迪(1987), 男, 吉林永吉人, 博士研究生, 主要从事水库调度方面研究。E-mail: lu_di_dlut@aliyun.com

通讯作者: 彭勇(1979), 男, 湖北公安人, 副教授, 博士, 主要从事水文气象耦合不确定环境下的水电站优化调度方面研究。E-mail: pengyong@dlut.edu.cn

1963年, Lorenz的工作使他认识到数值预报结果不仅仅受到模型和预见期的影响,其自身也有很多不确定性,他的研究标志了集合预报的开始^[1]。在70、80年代,科学家主要进行集合预报的理论研究和数值实验。90年代开始,随着气象学科和计算机的发展,全球集合预报系统(Global Ensemble Forecast System, GEFS)分别在美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF)建立,加拿大气象中心(Canadian Meteorological Centre, CMC)的集合预报业务也于1998年建立,它们是目前最具代表性的全球集合预报系统。集合预报的不确定性主要包括初值的不确定性和模式的不确定性。对于初值不确定性的处理,ECMWF采用集合资料同化方法——奇异向量法, NCEP采用重新尺度化的集合转化方法, CMC采用集合卡耳曼滤波法。对于模式不确定性的处理,集合预报系统普遍应用随机的扰动方案。目前,ECMWF的集合成员数已经达到50个,有15 d的预报时效; NCEP和CMC由20个集合成员组成,预报时效达到16 d。

我国集合预报技术起步较晚,开始于20世纪90年代,并在1999年底建立了基于国产神威计算机的集合预报系统^[2],目前提供的产品主要包括3个方面:500 hPa高度场分类图;850 hPa温度距平值的概率分布;各个量级下的降水概率预报。在2006年,中国又建立了T213全球中期集合预报系统和中小尺度区域集合预报系统。世界气象组织已经提出了一项为期10年的世界天气研究计划——观测系统研究与可预报性试验(THORPEX), TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)是THORPEX的核心部分,目前已经成立了TIGGE中国中心,能接收ECMWF、NCEP、CMC等集合预报资料,预报时效达到10~16 d。在此计划中, TIGGE作为多国的集合预报系统,其主要任务是通过集合预报产品的集中评价各种预报模式,它将涵盖用户的各种信息需求,包括对预报信息系统、观测系统的开发、资料同化、以及将模式改进为多模式、多分析同化预测系统的需求,因此对当前我国业务全球集合预报进行升级和改进,以及建立新一代全球集合预报系统起到了重要的推动作用。

2 集合预报在水文领域的应用

2.1 洪水预警

洪水被认为是世界范围内最频繁和最具毁灭性的自然灾害之一,洪水预报对人们的生活安全尤为重要。目前,国内外已开始研究将集合预报信息输入水文模型中进行洪水预警,并取得了一定的成果。

在国外, Burger等人针对小流域地区,从ECMWF集合预报系统获得1997年—2006年12 h时段、预见期1~5 d的降雨和温度预报信息,运用水文模型获得概率预报的径流值,并将其与10年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^[3]。为了预测极端天气事件和洪水, Addor等^[4]基于ECMWF全球预报模式的概率大气预报,建立了水文气象集合预报系统,并应用于流经瑞士最主要的城市苏黎世的一条河流。Dietrich^[5]等通过对2002年

某小流域洪水事件的评价说明了集合预报在洪水决策管理的应用价值。2003年,欧洲洪水预警系统(European Flood Alert System, EFAS)研究计划正式启动,应用中尺度气象预报使洪水预警预见期达到10 d^[6]。Ramos等^[7]在2007年基于EFAS开发了一个简洁和实用的可视化概率预报产品,并通过多瑙河洪水事件的预测进行了说明。英国也基于ECMWF的集合预报系统开发了对于极端天气事件的概率预警产品^[8]。Moore等^[9]针对目前洪水预警的发展,提出了洪水预报的关键问题。2009年He Y^[10]的研究发现以交互式全球大集合预报系统作为模型输入体是未来洪水预警系统的一种有效方法。

在我国,包红军等^[11]构建一个基于TIGGE驱动的水文与水力学相结合的洪水预报模型,使集合预报系统每个成员的预报降雨过程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过程,从而以概率预报方式实现了复杂水系的洪水预报及早期预警。通过对淮河2007年—2008年汛期洪水进行早期预警预报,使洪水预见期延长3~5 d。彭涛等^[12]利用中尺度暴雨数值模式(Advanced Regional Eta Model, 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。

2.2 径流预报

集合径流预报(ESP, Ensemble Streamflow Prediction)由美国学者Day在1985年提出^[13]。其基本原理是通过计算流域土壤的初始状态和给定未来气象输入的集合(如降水、气温和蒸发等),来预测未来河道的流量过程。Day研究发现,集合径流预报可用于分析春汛期的洪水峰值,也可以作为干旱分析的工具,为广大用户提供有用的信息。李岩等^[14]提出以丹江口水库为例可以利用降雨、气温等历史气象数据集合来驱动水文模型,并生成未来流量过程集合,得出利用ESP方法进行中长期径流预测可以减少预报径流的不确定性,提高预报精度和预见期,为径流预报提出了新思路提高集合径流预报的精度并得到相对可靠预见期对预报输入体的精度要求很高,同时也促进了集合径流预报的发展。Mascaro等^[15]建立了分布式水文模型,在可控制的条件下观察大规模水文气象耦合事件集合,对每个事件用三种不同的预报信息驱动水文模型,结果发现集合数值预报系统对径流预报有更好的预报准确度。2004年Roulin等^[16]利用ECMWF发布的6年集合预报信息对比比利时两个流域进行了径流集合预报,发现径流集合预报的水平高于降雨预报水平,并且冬季预报水平高于夏季。Werner K等^[17]基于美国气象局河流预报系统进行了集合径流预报,发现中尺度集合预报信息的输入比历史数据的输入更优越,耦合高分辨率的大气预报模型可能会对集合径流预报效果有更好的改善。Hwang等^[18]运用集合日降水数据进行集合径流预报,并分析了输入信息的不确定性对集合径流预报的影响。Najafi等^[19]考虑到大尺度的气候变化对水文预报有一定的价值,因此在不同气候条件下对ESP集合成员进行不同方式的加权处理,改善了预报径流的可利用性。

2.3 水库调度决策

随着降雨预报水平的提高,探测手段和计算机技术的迅速发展,在水库实时调度中可以考虑应用一定预见期的降雨预报信息,这是水库预报调度应用的发展趋势。防洪调度主要应用短期预报信息,兴利调度主要应用中、长期预报信息。依据降雨预报信息,能够增加防洪和发电调度的预见期,以便及时预泄和预蓄,提高水库防洪能力和洪水资源利用率。Faber等^[20]应用美国国家气象中心的集合径流预报,用随机动态规划模型进行水库优化调度,可捕捉到所有有利的径流变化以及时空误差,进行更有效的调度决策。Saavedra等^[21]在水库调度决策支持系统的基础上,开发了基于集合预报的水库优化调度系统,并进行了实例研究。有效地描述了预报的不确定性,为水库实时调度提供了参考。Alemu^[22]等通过对水电站的调度结果进行分析,表明集合预报信息可帮助决策者进行决策,对水库调度带来很大的经济效益。

在我国,应用集合预报进行水库调度研究较少,王福兴等^[23]耦合集合预报和分布式水文模型于水库实时优化调度模型,开发了基于集合预报的水库实时调度系统(EPROS),水库运行状态不仅与预报精度有关,也与决策模型中预报信息的利用方式密切相关,如何选择集合预报的利用方式有待进一步研究,以提高水库调度决策水平。

3 集合预报检验

预报检验对于检测预报水平及预报信息是否可应用于水文模型和决策实施等方面十分关键,因此是国际水文预报研究计划高度重视的问题之一。预报检验可以分析预报不确定性的来源,运用不同的方法比较预报的质量,从科学和技术的角度评估预报水平,帮助人们认识预报信息的可利用程度,给预报使用者提供更好的决策参考。

目前,对集合成员预报的评价,一般以均方误差或者相关系数来表示。国际上常采用的集合预报检验方法主要有Talagrand分布、离散度、BS评分、信息检测理论等。Raghavendra等^[24]用均方误差与距平相关系数对GEFS集合预报进行检验;Kristie使用“面向分布”^[25]的检验方法和传统的统计方法对ESP进行检验,并认为面向分布的方法可提取更详细的信息;James D. Brown等^[26]开发的集合预报检验系统,可以应用于任何地理条件及不同预见期的集合预报检验;加拿大气象中心也开发了集合预报检验系统,可以准确比较集合预报系统间的差异^[27];Pappenberger等^[28]基于ECMWF的降雨和温度预报信息对水文应用的适用性进行了评价,得出降水和温度预报有效预见期为5~7d。此外,在检验中加入决策者的因素是以后的研究方向之一,即概率域值要适合决策的客观条件^[29]。在我国,韩焱红应用连续等级概率评分对贝叶斯降水概率预报进行检验,其评分值越小,概率预报可靠性越高,预报结果越好^[30];刘永和等^[31]基于5种TIGGE资料,应用相关系数、均方根误差、Nash效率系数、TS评分等方法,对我国东部沂沭河流域的集合降水预报水平进行了全面的评估;李俊等^[32]基于我国AREM区域中尺度模式建立起11个成员的短期集合预报系统并用Talagrand分布、Brier评分(BS)和Brier技巧评分的

方法进行检验。

4 集合预报在水文应用中的关键问题

气象集合预报和水文模型的发展为两者的耦合提供了很好的技术支持。利用集合预报信息,可以提高长、中、短期水文预报的精度,但在集合预报信息的应用过程中需要面对一些不确定性及关键问题。

第一,如何使用集合预报结果。首先,人们可通过集成的方法把集合预报转化为单一值预报,在平均意义上可以获得较准确的预报值,且对于越难预报的变量,通过简单的集合平均的方法就能得到更准确的单一预报值。其次,可对预报信息进行适合不同条件下的修正,提高集合预报的可利用性。再次,集合预报可以通过概率给使用者决策指导,这是集合预报的一个重要功用,且应用集合预报进行决策比应用单一值预报有更好的经济价值,即根据不同概率条件下发生降雨量值,结合具体流域调度决策模型,通过历史资料进行分析,选择最适合该流域的可信概率,从而获得目标最大效益。文献[33]用风险分析的方法结合集合预报对暴雨灾害进行分析,为科学决策提供了有利支持。另外,小概率预报事件对高风险用户具有较高的应用价值,而对低风险用户几乎没有价值。

第二,如何双向耦合集合预报与流域水文模型。集合预报最终目的是提供大气变量的完全概率预报,但由于水文过程的复杂性和不确定性,不同的气候条件及不同的时空适用于不同的流域水文模型,因此对于高分辨率的水文模型,集合预报的时间和空间尺度尚不能满足需要,需要实现气象模式同高分辨率的分布式水文模型耦合的尺度转换。

第三,如何改进水文模拟技术。水文模型本身的不确定性(如模型参数的合理性、适用性)也限制了预报信息的可利用性,所以水文模型本身的模拟及技术条件也是研究的关键。

第四,如何集合不同预报中心的产品。对于不同集合预报中心,由于预报模式以及预报初始场等因素的不同,各自的预报精度也各不相同。若只是简单地进行等权重系数处理,这样可能会使超级集合后的效果差于某一个预报中心的预报效果。如何在实际应用时,赋予每个预报中心的预报产品合理的权重系数,是提高预报精度的关键。可以分析每个预报中心的预报与实际指标相关系数、预报准确率、预报误差或参数率定等方法确定权重。

第五,如何提高信息服务质量。气象水文预报系统的构建需要很好的信息技术支持,多源信息的完整性、实效性即信息服务成为影响系统的重要因素之一。例如国内GFS的降雨信息要在发布后6小时左右才能完成数据处理及提取,因此在此之前数据的预报可利用性很小。

5 结语

集合预报平均要优于单一初值的确定性预报。集合预报技术的广泛使用,使得数值天气预报在概念、理论或实践中,都出现了新技术、新成果,而把数值天气集合预报信息引入到径流预报中是一个重要的研究方向和趋势。随着计算机技术的不断进步,集合预报系统对于减少误差和修复降雨

时空不确定性将产生重要的促进作用,并对提高水文预报预见期、实时洪水预警、水资源可持续利用、缓解水资源供需矛盾及促进区域经济规划和发展等方面具有重大意义。

参考文献(References):

- [1] Lorenz E N. Deterministic Nonperiodic Flow[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20: 130-141.
- [2] 李俊,纪飞,齐琳琳,等.集合数值天气预报的研究进展[J].*气象*, 2005, (2): 3-7. (LI Jun, JI Fei, QI Linlin, et al. Advance in Ensemble Numerical Weather Prediction [J]. *Meteorological Monthly*, 2005, (2): 3-7. (in Chinese))
- [3] Burger G, Reusser D, Kneis D. Early Flood Warnings from Empirical (Expanded) Downscaling of the Full ECMWF Ensemble Prediction System [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45 (10).
- [4] Addor N, Jaun S, Zappa M. An Operational Hydrological Ensemble Prediction System for the City of Zurich (Switzerland): Skill, Case Studies and Scenarios [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011, 15(7): 2327.
- [5] Dietrich J, Trepte S, Wang Y, et al. Combination of Different Types of Ensembles for the Adaptive Simulation of Probabilistic Flood Forecasts: Hindcasts for the Mulde 2002 Extreme Event [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2008, 15(2): 275-286.
- [6] Thielen J, Bartholmes J, Ramos M H, et al. The European Flood Alert System- Part 1: Concept and Development [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2008, 5(1): 257-287.
- [7] Ramos M H, Bartholmes J, Thielen Del Pozo J. Development of Decision Support Products Based on Ensemble Forecasts in the European Flood Alert System [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2007, 8(4): 113-119.
- [8] Legg T P, Mylne K R. Early Warnings of Severe Weather from Ensemble Forecast Information [J]. *Weather and Forecasting*, 2004, 19(5): 891-906.
- [9] Moore R J, Bell V A, Jones D A. Forecasting for Flood Warning [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2005, 337(1): 203-217.
- [10] He Y, Wetterhall F, Cloke H L, et al. Tracking the Uncertainty in Flood Alerts Driven by Grand Ensemble Weather Predictions [J]. *Meteorological Applications*, 2009, 16(1): 91-101.
- [11] 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(2): 216-224. (BAO Hongjun, ZHAO Lina. Flood Forecast of Huaihe River Based on TIGGE Ensemble Predictions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012(2): 216-224. (in Chinese))
- [12] 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[J].*暴雨灾害*, 2010, (3): 274-278. (PENG Tao, LI Jun, YIN Zhiyuan, et al. Preliminary Experiment on Flood Forecast in Flood Season Based on Ensemble Precipitation Prediction Products [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2010, (3): 274-278. (in Chinese))
- [13] Day G N. Extended Streamflow Forecasting Using NWSRFS. [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1985, 111(2): 157-170.
- [14] 李岩,胡军,王金星,等.河流集合预报方法(ESP)在水资源中长期预测中的应用研究[J].*水文*, 2008, (1): 25-27. (LI Yan, HU Jun, WANG Jinxing, et al. Application of Ensemble Streamflow Prediction (ESP) to Medium and long term Water Resources Prediction [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, (1): 25-27. (in Chinese))
- [15] Mascaro G, Vivoni E R, Deidda R. Implications of Ensemble Quantitative Precipitation Forecast Errors on Distributed Streamflow Forecasting [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(1): 69-86.
- [16] Roulin E, Vannitsem S. Skill of Medium range Hydrological Ensemble Predictions [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(5): 729-744.
- [17] Werner K, Brandon D, Clark M, et al. Incorporating Medium range Numerical Weather Model Output into the Ensemble Streamflow Prediction System of the National Weather Service [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(2): 101-114.
- [18] Hwang Y, Clark M P, Rajagopalan B. Use of Daily Precipitation Uncertainties in Streamflow Simulation and Forecast [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(7): 957-972.
- [19] Najafi M R, Moradkhani H, Piechota T. Ensemble Streamflow Prediction: Climate Signal Weighting Methods vs. Climate Forecast System Reanalysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2012.
- [20] Faber B A, Stedinger J R. Reservoir Optimization Using Sampling SDP with Ensemble Streamflow Prediction (ESP) Forecasts [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 249(1): 113-133.
- [21] Valeriano S, Oliver C, Koike T, et al. Decision Support for Dam Release during Floods Using a Distributed Biosphere Hydrological Model Driven by Quantitative Precipitation Forecasts [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(10).
- [22] Alemu E T, Palmer R N, Polebitski A, et al. Decision Support System for Optimizing Reservoir Operations Using Ensemble Streamflow Predictions [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010, 137(1): 72-82.
- [23] Wang F, Wang L, Zhou H, et al. Ensemble Hydrological Prediction Based Real Time optimization of a Multiobjective Reservoir during Flood Season in a Semiarid Basin with Global Numerical Weather Predictions [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(7).
- [24] Ashrit R, Iyengar G R, Sankar S, et al. Performance of Global Ensemble Forecast System (GEFS) during Monsoon 2012 [J]. 2013.
- [25] Franz K J, Hartmann H C, Sorooshian S, et al. Verification of National Weather Service Ensemble Streamflow Predictions for Water Supply Forecasting in the Colorado River Basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(6): 1105-1118.
- [26] Brown J D, Demargne J, Seo D J, et al. The Ensemble Verification System (EVS): A Software Tool for Verifying Ensemble Forecasts of Hydrometeorological and Hydrologic Variables at Discrete Locations [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2010, 25(7): 854-872.
- [27] Candille G, COTE E C, Houtekamer P L, et al. Verification of an Ensemble Prediction System against Observations [J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(7): 2688-2699.

(下转第124页)