

水文集合预报研究与应用综述

徐静, 叶爱中, 毛玉娜, 邓学

(北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: 相对于传统的确定性水文预报, 水文集合预报包含了水文预报各个环节的不确定性信息, 因此在理论上更加科学, 在生产实践中也提高了对暴雨、洪水、干旱等事件的认知和预报能力, 为水资源管理和防洪抗旱提供了更精确的实用信息。水文集合预报当前研究的热点是前处理与后处理, 以及如何给出业务化的预报。在回顾水文集合预报发展历程的基础上, 总结了水文集合预报处理的方法及其应用研究, 重点分析了水文集合预报系统中前处理、后处理两大模块, 提出了水文集合预报发展面临的问题与挑战。

关键词: 水文集合预报; 不确定性信息; 水文集合前处理; 水文集合后处理

中图分类号: TV 122; P338; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014) 01- 0082- 06

Review of Research and Application of Hydrologic Ensemble Forecast

XU Jing, YE Ai zhong, MAO Yu na, DENG Xiao xue

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

Abstract: Compared with the traditional determined hydrologic forecast, hydrologic ensemble forecast contains various uncertainties in the hydrologic forecast processes. Therefore, the accuracy and validity of hydrologic forecast have been improved theoretically. Meanwhile, the cognitive and predictive capabilities of the events such as storm, flood, and drought have been enhanced in the practical applications. The hydrologic ensemble forecast can provide more accurate and useful information in flood control, drought relief, and sustainable water resources management. In this paper, we firstly reviewed the history of hydrologic ensemble forecast, and then we summarized the research progresses in theory, methods, as well as the applications and operational hydrologic ensemble forecast. We focused on two research aspects of the pre processing and post processing issues in an effort to provide a useful platform for the development of hydrologic ensemble prediction. The perspectives and recommendations on this subject were provided. This paper is of important significance in the future development of hydrologic ensemble forecast research.

Key words: hydrologic ensemble prediction; uncertainty; hydrologic ensemble pre processing; hydrologic ensemble post processing

水文循环系统是一个高度的非线性系统。水文模型是对这个复杂非线性系统进行简化并模拟的工具。水文预报通常采用水文模型, 模拟计算流量或水位预报。传统单值水文预报主要基于实测降水和气温资料来预报洪水/ 干旱过程, 预见期较短且未给出水文模拟的不确定性信息, 而水文集合预报是一种既可以给出确定性预报值, 又可以提供预报值不确定性信息的预报方法^[1]。相对于传统确定性预报, 集合预报最大的不同点是给出带有概率信息的预报集合, 而不是一个单值。因此, 结合气象预报信息以及概率预报优势的水文集合预报, 逐渐成为水文预报研究与应用的新方向^[2]。

1 水文集合预报发展历程

气象预报的输出是水文预报的输入, 所以水文集合预报的发展基于气象集合预报的发展。在理论、方法及应用方面都吸收了气象集合预报的发展经验, 并针对水文集合预报的特点进行了改进与发展。

水文集合预报的发展史可以归结为以下三个阶段。

(1) 集合预报提出阶段。对于集合预报的研究应追溯到1963年, Lorenz 首先发现大气具有高度非线性的混沌特性, 微小的初始条件扰动也会造成系统状态的极大偏差^[3-4]。为

收稿日期: 2013-08-21 修回日期: 2013-11-16 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01086.html>

基金项目: 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2012324/KY); 国家科技支撑计划课题(2013BAB05B04)

作者简介: 徐静(1989-), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事水文集合预报研究。E-mail: amyxu_89@163.com

通讯作者: 叶爱中(1978-), 男, 安徽安庆人, 讲师, 博士, 主要从事气候变化对水文水资源影响方面的研究。E-mail: azye@bnu.edu.cn

解决这一问题, Epstein^[5]提出了动力随机预报理论, 之后 Leith^h^[6]又提出了“蒙特卡罗”预报理论, 即使用多个成员描述大气状态的不确定性^[7], 将单一确定性预报转变为集合概率预报, 奠定了水文气象集合预报的发展基础。

(2) 集合预报发展阶段。发展至 20 世纪 90 年代, Molteni^[8] Kalnay^[9] 使得气象集合预报成为现实。集合预报技术的迅猛发展, 启发了水文学家们开始将集合预报的思想应用于水文预报中, 即使用一组集合预报的降雨过程驱动水文模型, 得到相应的一组预报径流过程, 从而奠定了水文集合预报理论基础, 促进了水文集合预报的发展。

(3) 水文集合预报成熟并业务化阶段。目前, 积累的长达 30 多年的气象集合预报资料库, 拥有大量气象预报误差统计特征和不确定性信息, 为水文集合预报的发展提供了有力的数据支持, 目前已有越来越多的国家和地区开始进行水文集合预报的研究与应用, 见表 1。

2 水文集合预报方法

水文集合预报的发展历史较短, 其中, 比较著名的方法有长期径流预报方法 (Ensemble Streamflow Prediction, ESP)^[27]。ESP 方法以预报当日流域土壤状态为初始条件, 对历史观测信息进行随机采样, 使用历史降水、气温等历史时间序列代表未来气象信息, 驱动水文模型进行径流预报。

传统 ESP 方法采用历史观测信息作为未来预报信息, 相当于完全忽略了气象预报信息, 因此, 越来越多的科研人员尝试将各预报中心的气象预报信息应用到水文集合预报中。这种将气象集合预报与水文模型结合的方法, 是最简单的水文集合预报方法^[28-29], 与传统 ESP 方法相比, 其预报精度得到了提高, 偏差减小, 且预见期延长。值得注意的是气候模式产生的数值降水预报产品精度太低, 无法直接驱动水文模型, 往往需要进行集合前处理, 如贝叶斯降尺度^[30-31]。

2004 年, 美国海洋与大气管理局 (NOAA)、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 等研究机构的科研人员联合发起了水文集合预报实验计划 (Hydrologic Ensemble Predictions Experiment, HEPEX)^[32], HEPEX 旨在发展水文集合预报, 推动概率水文预报技术发展, 保证预报信息的精确度和可靠性, 为灾害应急管理部和在水资源管理决策部门提供决策依据。HEPEX 的发起象征着水文预报进入一个新纪元, 大量新型的水文集合预报方法和技术涌现出来^[33-37]。

HEPEX 研究指出^[32, 38-39], 影响水文集合预报精度及可靠性的不确定性因素很多, 主要来源于模型的输入、流域初始和边界条件的赋值, 以及模型结构和参数的选择等^[40]。不同来源的不确定性在水文模拟过程中相互作用和影响, 最终将反映到输出的预报结果上, 因此在做水文预报时, 必须量化随机不确定性、降低认知不确定性。将这些不确定性进行量化并通过集合或概率的形式输出的预报即为集合预报。根据模型的不确定性来源, 集合预报可以分为五大模块: 水文集合前处理; 集合数据同化; 参数集合处理; 水文集合后处理; 分布式水文模型。将所有模块耦合到一起即是水文集合预报系统 (见图 1)。本文将重点总结水文集合预报的前处理与后处理模块。

表 1 不同国家/地区关于水文集合预报的研究与应用
Table 1 The researches and applications of hydrological ensemble prediction in different countries and regions

国家/地区	研究计划/系统/机构	研究与应用	参考文献
美国	水文集合预报实验计划 (HEPEX)	将气象、水文、水资源等领域的科研工作者和管理决策者联系起来, 共同发展可靠的、高精度的水文气象集合预报方法, 为应急管理部和在水资源相关行业如公共健康与安全, 经济, 环境, 粮食生产等服务。	Andrew Wood, et al. (2008) ^[10] Jutta Thielen, et al. (2008) ^[11] Russ S., et al. (2010) ^[12] Mabrouk Abaza, et al. (2013) ^[13]
	全球对地观测系统 (GEOSS)	通过全球 75 个国家数据资料共享, 发展“全球对地观测系统”, 水文集合预报是其中组成部分。	http://www.epa.gov/geoss/
	欧洲洪水预警系统 (EFAS)	完善欧洲国家洪水预报系统, 为决策部门提供 3~15 天中程洪水预警信息, 其先进性体现在对概率洪水预报的应用与发展上。	Alionte Eklund, et al. (2013) ^[14] V Ntegeka, et al. (2013) ^[15]
欧洲	THORPEX/HEPEX 水文集合预报系统 (THEPS)	旨在研究水文预报与气象预报的耦合: (1) 协助 HEPEX 计划有效应用 (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble, TIGGE) 数据集和 THORPEX 研究成果; (2) 反馈水文集合预报应用中结果和问题, 促进全球交互式预报系统 (GIFS) 的发展。	J Thielen Del Pozo, et al. (2009) ^[16] Schalk Andel, et al. (2013) ^[17]
中国	中国气象局、北京师范大学等科研院所	国内研究集中在将水文集合预报前处理、后处理等技术应用在不同流域, 以及对青藏高原等缺资料地区的水文集合预报可行性进行研究。	R Cibin, et al. (2013) ^[18] Y Liu, et al. (2013) ^[19] L Zhao, et al. (2013) ^[20] J Ye, et al. (2013) ^[21]
日本	日本气象厅及东京大学等科研院所	研究水文集合预报技术在亚太地区的应用与发展。	T Koike, et al. (2013) ^[22] S Otsuka, et al. (2013) ^[23] MM Khan, et al. (2013) ^[24]
澳洲	澳洲气象局	研究季节性径流集合预报技术在各流域的应用	SK Singh, et al. (2013) ^[25] AIJM Dijk, et al. (2013) ^[26]

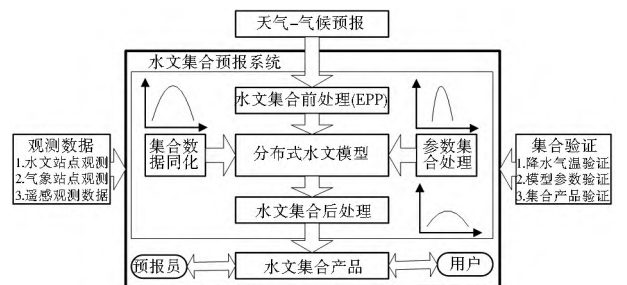


图 1 水文集合预报系统结构

Fig. 1 Schematic diagram of the hydrologic ensemble prediction system

2.1 水文集合预报前处理方法

水文集合预报前处理也称为气象集合预报后处理, 主要处理定量降水/温度预报。现有的水文气象耦合技术虽然已取得了很大的发展, 但仍然存在许多问题: (1) 数值天气预报普遍存在系统偏差, 譬如降雨带位置偏离或者降雨量整体偏大(偏小), 导致气象预报产品很难直接为水文模型所用; (2) 数值气象预报产品精度太低, 在时空尺度上无法与水文模型匹配^[41]; (3) 还需要更好的方法, 能够在海量的集合预报产品(如降水平均、离散度或暴雨降水概率等)中, 求取最优的概率预报结果。因此, 需要对数值气象预报产品进行统计前处理, 即: 根据多年实测与后预报数据, 研究历史预报误差的统计特征, 剔除系统偏差, 用概率分布的形式代替单一确定的气象要素值, 最终生成的降水、气温等预报信息作为水文模型的输入。

水文集合前处理较经典的方法有如下几种: 1959 年 Klein 等^[41]提出的完美后预报方法(Perfect Prognosis)是一种用于校正气象预报偏差的统计处理方法; 1972 年 Glahn 和 Lowry^[42]建立的模型输出统计法(Model Output Statistics, MOS), 是采用多元回归建立起的观测与模型输出之间的统计关系^[43]; 贝叶斯方法是通过对历史预报与观测事件的统计分析, 求取预报事件对应观测事件的条件概率函数, 在获得未来预报数据后即可得到未来实际(观测)事件发生的概率。

贝叶斯方法是水文集合前处理中应用最广泛的方法之一, 各学者对其也有进一步的发展。Raftery 等^[44]提出一种多模型集合概率预报的统计处理方法——贝叶斯多模型平均方法(Bayesian Model Average, BMA), 通过对多个模型的预报值进行概率集成, 产生无偏差的预报概率分布。该方法可以针对某一特定变量的概率预报, 求取经过偏差校正后单个模型概率预报的加权平均, 其权重是相应模型的后验概率, 反映每个模型在模型训练阶段相对的预报技巧^[45]。

此外, 水文预报中输入的气象信息需要时空连续, 所以要求降水/气温集合预报各个成员构成的时间序列必须连续。Schaake 等人^[46,47]提出了“Schaake Shuffle 洗牌法”, 通过生成历史预报与历史观测之间的相关参数, 记录观测降水和预报降水在时空上的分布关系, 重构体现了历史观测降水连续关系的集合空间, 使得集合成员间具有连续的时间信息, 从而减少输入水文预报系统的数据偏差。

2.2 水文集合预报后处理方法

Krzysztofowicz 等^[48-50]于 20 世纪 90 年代开发出以贝叶斯理论为基础的降水和径流集合处理器, 建立起贝叶斯预报系统(Bayesian forecasting system, BFS)。王善旭^[51]研究指出, 基于贝叶斯理论的概率水文预报, 综合考虑各方面的不确定性, 并以分布函数形式描述水文预报的不确定度, 从而能较好地满足优化决策的需要。BFS 将系统的总不确定性分解为输入不确定性和水文模型不确定性, 并采用不同的方法进行处理, 再综合成为总的总不确定性概率分布。针对降雨径流模型来说, 输入不确定度主要指预见期内的降雨量误差, 而水文不确定度指得是模型误差、测量误差等。在此基础上, Krzysztofowicz 又将 BFS 方法与数值预报产品相融

合, 建立起贝叶斯预报处理器 BPF(Bayesian Processor Forecast)^[50,52]。此外, Wood 和 Schaake^[53]提出了一种适用于月径流预报的统计后处理器; Brown 和 Seo^[54]使用指示器协克里金方法(Indicator Cokriging, ICK)来校正集合预报的系统偏差; Weerts 等^[55]使用分位数回归的方法来处理英国国家洪水预报系统的径流预报不确定性。

对于流量或水位的预报, 每个水文模型都有各自的特色与局限性, 单一模型不可能在任何情况下都能提供始终优于其它模型的预报结果^[56-58], 因此, 将不同模型的预报结果进行集合, 通过赋予不同的权重, 可以发挥各个模型的优势, 提高预报精度, 而 BMA 方法即可胜任这一任务^[59]。

3 水文集合预报的应用现状

水文集合预报的应用发展, 大致可划分为两个阶段。

第一阶段始于 20 世纪 80 年代, GN Day 等^[60]在美国国家天气局河流预报系统(National Weather Service River Forecast System, NWSRFS)中展开对 ESP 方法的应用, 提供中长期河道径流和入库水量的预测服务; 李岩等^[61]在丹江口水库对 ESP 进行了应用研究。

第二阶段始于 21 世纪初, 水文学家们借鉴数值气象预报中集合预报的概念, 应用于水文预报中。Andrew Wood 等人^[62]率先于 2002 年在美国东海岸和俄亥俄河流域进行了长期实验性水文集合预报, 以 GSM 气候模型产生的数值降水预报驱动 VIC 水文模型得到高精度、无偏差、预见期更长的水文预报。之后, 他们又在美国西部五个地区, 对比了基于 GSM 气候模型的季节水文预报与传统 ESP 方法两者间预报技能的差异。Xiaogang Shi 等人^[63]也在美国西部 8 个流域上做过类似的工作, 发现对于季节性径流集合预报而言, 通过水文模型率定或百分位映射误差校正方法, 均可以相同程度地减少预报误差。Gillaume Thirel 等^[64]在 M t o France 境内分别使用 ECMWF 和 PEARP 两套数值预报降水来驱动 ESP, 以评估它们各自预报极端水文事件的能力。Haibin Li 等^[65]在传统 ESP 的基础上进一步探索, 发现若以统计降尺度后的 CFS 数据驱动水文模型, 其预报效果要优于传统的 ESP 方法。Webster 等^[66]指出忽略气象预报信息的传统水文预报方法, 其预见期仅为 1~2 d, 可减少洪水损失 2%~3%; 而应用气象气候预报信息的水文预报能把预见期延伸到 10 d 或更长, 可减少洪灾损失约 20% 左右。S Shukla 等^[67]也认为, 对于全球多个地区而言, 尽管受气象预报信息的局限, 但通过对初始水文条件的良好率定, 也可以有效地提高季节水文集合预报的预报水平。

其中, 在水文集合预报前处理部分, Reggiani 等^[68]通过贝叶斯方法有效地修正了莱茵河集合预报系统中的不确定性。Fraleley 等^[69]针对 TIGGE 中缺失数据的处理问题, 对 BMA 方法进行了改进。田向军等^[70]则对 BMA 的(对数)似然函数进行改进, 利用一种有限记忆的拟牛顿优化算法(LBFGS-B)对其进行极大化, 进而提出了一种求解贝叶斯模型平均的新方法(BMA-BFGS), 并将 BMA-BFGS 与 EM 法及 MCMC 法在计算精度和耗时性方面进行了比较; 赵琳娜等^[71]也应用 BMA 算法对 TIGGE 降水预报数据进行了偏差修正。

在水文集合预报后处理的研究中, Tae Ho Kang 等^[72]研究指出在枯水季节后处理方法可以更有效地减少径流集合预报(ESP)中的不确定性。Morawietz 等^[73]针对降雨径流模型产生的预报误差,以不同的自回归误差模型作为后处理方法分别进行研究,有效减少了水文模型的不确定性。Aizhong Ye 等^[74]在 12 个 MOPEX 流域上,使用广义线性模型后处理器(GLMPP)对 7 个不同水文模型模拟结果进行后处理,研究发现后处理可以替代甚至超过水文模型率定的效果,极大地改善水文预报精度。

目前,美国已建立了以水文集合预报为标志产品的先进水文预报业务(Advanced Hydrologic Prediction Service, AHPS)^[33],欧洲也建立了欧洲洪水预警系统(European Flood Awareness System, EFAS)^[75-76],带来了显著的经济和社会效益。

4 水文集合预报研究面临的挑战

虽然水文集合预报系统日臻完善,且在欧洲与美国均已开始业务化,但水文集合预报的研究与应用还面临如下挑战。

(1) 不确定性的识别。当前的研究更多集中在单个环节不确定性,比如,输入不确定性、模型参数不确定性等,而水文集合预报希望识别水文预报各个环节的不确定性,并最终能够精确地反映到集合预报的产品中。

(2) 气象-水文预报耦合研究。目前,数字天气/气象预报的时空尺度与精度难以直接应用到水文预报中,还需要进一步研究气象到水文降尺度及数据同化问题。

(3) 水文集合预报的业务化。随着水文集合预报理论研究的成熟,从技术上看,水文集合预报的业务化将水到渠成。但是,习惯了传统确定性预报的用户暂时无法理解概率性集合预报,难以接受水文集合预报产品,更遑论应用到生产实践中去,所以需要对用户进行培训,使其理解并应用水文集合预报的优点。

参考文献(References):

- [1] 丛树铮. 水科学技术中的概率统计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. (CONG Shuzheng. Probability and Statistical Methods in Water Science and Technology [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [2] Boucher M A, Tremblay D, Delorme L, et al. Hydroeconomic Assessment of Hydrological Forecasting Systems [J]. Journal of Hydrology, 2012, 416-417: 133-144.
- [3] Lorenz E N. Deterministic Nonperiodic Flow [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20: 130-141.
- [4] Lorenz E N. The Predictability of A Flow Which Possesses Many Scales of Motion [J]. Tellus, 1968, 21(3): 289-307.
- [5] Epstein E S. Stochastic Dynamic Prediction I [J]. Tellus, 1969, 21(6): 739-759.
- [6] Leith C. Theoretical Skill of Monte Carlo Forecasts (Stochastic Atmospheric Processes) [J]. Monthly Weather Review, 1974, 102: 409-418.
- [7] Toth Z, Zhu Y, Marchok T. The Use of Ensembles to Identify Forecasts with Small and Large Uncertainty [J]. Weather and Forecasting, 2001, 16(4): 463-477.
- [8] Molteni F, et al. The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and Validation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(529): 73-119.
- [9] Toth Z, E Kalnay. Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method [J]. Monthly Weather Review, 1997, 125(12): 3297-3319.
- [10] Andrew W Wood, Dennis P L. An Ensemble Approach for Attribution of Hydrologic Prediction Uncertainty [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: 14, L14401.
- [11] Jutta Thielen, John Schaake, Robert Hartman, et al. Challenges and Progress of the Hydrological Ensemble Prediction Experiment (HEPEX) Following the Third HEPEX Workshop Held in Stresa 27 to 29 June 2007 [J]. Atmospheric Science Letters, 2008, 9(2): 29-35.
- [12] Russ S Schumacher, Christopher A Davis. Ensemble Based Forecast Uncertainty Analysis of Diverse Heavy Rainfall Events [J]. Weather and Forecasting, 2010, 25(4): 1103-1122.
- [13] Abaza M, Anctil F, Fortin V, et al. A Comparison of the Canadian Global and Regional Meteorological Ensemble Prediction Systems for Short-Term Hydrological Forecasting [J]. Monthly Weather Review, 2013, 141(10): 3462-3476.
- [14] Alionte Eklund Cristin, Hazlinger Michal, Sprockler Eric, et al. European Flood Awareness System now Operational [C]// EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013.
- [15] Ntegeka V, Declodet C, Willems P, et al. Quantifying the Impact of Climate Change from Inland, Coastal and Surface Conditions [J]. Comprehensive Flood Risk Management, 2013(32): 103-111.
- [16] Thielen Del P J, Pappenberger F, Bogner K, et al. Seamless Flood Forecasting Based on Monthly, Medium Range and Short Range Ensemble Prediction Systems [C]// EGU General Assembly, 2009.
- [17] Andel S J, Weerts A, Schaake J, et al. Post processing Hydrological Ensemble Predictions Intercomparison Experiment [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(1): 158-161.
- [18] R Cibin, P Athira, K P Sudheer, et al. Application of Distributed Hydrological Models for Predictions in Ungauged Basins: a Method to Quantify Predictive Uncertainty [J]. Hydrological Processes, 2013, DOI: 10. 1002/hyp. 9721.
- [19] Y Liu, Q Duan, L Zhao. Evaluating the Predictive Skill of Post-processed NCEP GFS Ensemble Precipitation Forecasts in China's Huai River Basin [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(1): 57-74.
- [20] Linna Zhao, Hongjun Bao, Ying Liu, et al. Application of a Developed Ensemble Model Based on Single Numerical Weather Prediction in the Huaihe River [C]// EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013.
- [21] Ye Jinyin, He Yi, Pappenberger Florian, et al. Evaluation of ECMWF Medium-range Ensemble Forecasts of Precipitation for River Basins [C]// EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013.
- [22] T Koike, R Lawford, D Cripe. GEOSS Water Cycle Integrator [C]// EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013.
- [23] S Otsuka, S Nisizawa, T Horinouchi, et al. Gfdnavi: A Tool to Analyze, Visualize, and Share Meteorological Data, and its Ap

- plication to the Output of Ensemble Predictions [J]. Journal of Disaster Research, 2013, 8(1): 135.
- [24] Khan M M, Shamseldin A Y, Melville B W. Impact of Ensemble Size on Forecasting Occurrence of Rainfall Using TIGGE Precipitation Forecasts [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 10. 1061/ (ASCE) HE. 1943-5584. 0000864.
- [25] Singh S K, Zammit C, Hreinsson E, et al. Effect of Initial Conditions of a Catchment on Seasonal Streamflow Prediction Using Ensemble Streamflow Prediction (ESP) Technique for the Rangitata and Waitaki River Basins on the South Island of New Zealand [C] // EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013, 15: 3717.
- [26] Dijk A I J M, Peir Arancibia J L, Wood E F, et al. Global Analysis of Seasonal Streamflow Predictability Using an Ensemble Prediction System and Observations from 6192 Small Catchments Worldwide [J]. Water Resources Research, 2013, 49(5): 2729-2746.
- [27] Twedt T M, J C Schaake Jr, E L Peck. National Weather Service Extended Streamflow Prediction [USA] [C] // Proceedings Western Snow Conference, 1977.
- [28] 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 [J]. 高原气象, 2007, 26(4): 854-861. (LI Jun, LIAO Yr shan, ZHANG Bing, et al. The Preliminary Application of Ensemble Prediction in Flash Flood Forecasting [J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 854-861. (in Chinese))
- [29] 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, 29(3): 274-278. (PENG Tao, LI Jun, YIN Zhi yuan, et al. Study on a Disaster Risk Prediction Method for Regional Heavy Rain Events based on Euclidean Distance Function [J]. Torrential Rain and Disasters, 2010, 29(3): 274-278. (in Chinese))
- [30] Schaake J, et al. Summary of Recommendations of the First Workshop on Postprocessing and Downscaling Atmospheric Forecasts for Hydrologic Applications Held at M t o - France, Toulouse, France, 15 - 18 June 2009 [J]. Atmospheric Science Letters, 2010, 11(2): 59-63.
- [31] Wu W, et al. Statistical Downscaling of Climate Forecast System Seasonal Predictions for the Southeastern Mediterranean [J]. Atmospheric Research, 2012, 118: 346-356.
- [32] Schaake J C, et al. The Hydrological Ensemble Prediction Experiment [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(10): 1541-1547.
- [33] McEnery J, et al. NOAA's Advanced Hydrologic Prediction Service [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(3): 375-385.
- [34] Pappenberger F, J Thielen, M, Del Giudice, et al. The Impact of Weather Forecast Improvements on Large Scale Hydrology: Analysing a Decade of Forecasts of the European Flood Alert System [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(7): 1091-1113.
- [35] Cloke H, F Pappenberger. Ensemble Flood Forecasting: a Review [J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(3): 613-626.
- [36] Luo L, E F Wood, M Pan. Bayesian Merging of Multiple Climate Model Forecasts for Seasonal Hydrological Predictions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 - 2012), 2007, 112(D10): D10102.
- [37] Wang Q, A Schepen, D E Robertson. Merging Seasonal Rainfall Forecasts From Multiple Statistical Models Through Bayesian Model Averaging [J]. Journal of Climate, 2012, 25(16): 5524-5537.
- [38] Schaake J. Hydrologic Ensemble Prediction: Past, Present and Opportunities for the Future [J]. Ensemble Predictions and Uncertainties in Flood Forecasting, 2006.
- [39] 陆桂华, 吴娟, 吴志勇. 水文集合预报试验及其研究进展 [J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 728-743. (LU Guai hua, WU Juan, WU Zhi yong. Advances in Hydrologic Ensemble Prediction Experiment [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 728-743. (in Chinese))
- [40] 段青云, 叶爱中. 改善水文气象预报的统计后处理 [J]. Journal of Water Resources Research, 2012, 4: 161-168. (DUAN Qing yun, YE Ai zhong. Statistical Post Processing to Improve Hydrometeorological Forecasts [J]. Journal of Water Resources Research, 2012, 4: 161-168. (in Chinese))
- [41] Klein W H, B M Lewis. I Enger. Objective prediction of Five day Mean Temperatures During Winter [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1959, 16: 672-682.
- [42] Glahn H R, D A Lowry. The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting [J]. Journal of Applied Meteorology, 1972, 11(8): 1203-1211.
- [43] Glahn B, et al. MOS Uncertainty Estimates in an Ensemble Framework [J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(1): 246-268.
- [44] Raftery A E, et al. Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(5): 1155-1174.
- [45] 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 [J]. 大气科学, 2013, 37(1): 43-53. (LIU Jian guo, XIE Zheng hui, ZHAO Lin na, et al. BMA Probabilistic Forecasting for the 24-h TIGGE Multi model Ensemble Forecasts of Surface Air Temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2013, 37(1): 43-53. (in Chinese))
- [46] Schaake J, K Franz, A Bradley, et al. HEPEX: The Hydrologic Ensemble Prediction Experiment [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 88(10): 1541-1547.
- [47] Clark M, et al. The Schaake Shuffle: A Method for Reconstructing Space - Time Variability in Forecasted Precipitation and Temperature Fields [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(1): 243-262.
- [48] Krzysztofowicz R, A A Sigrest. Calibration of Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts [J]. Weather and forecasting, 1999, 14(3): 427-442.
- [49] Krzysztofowicz R, C J Maranzano. Hydrologic Uncertainty Processor for Probabilistic Stage Transition Forecasting [J]. Journal of Hydrology, 2004, 293(1-4): 57-73.
- [50] Krzysztofowicz R. Bayesian Model of Forecasted Time Series [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1985, 21(5): 805-814.
- [51] 王善序. 贝叶斯概率水文预报简介 [J]. 水文, 2001, 21(5): 33-34. (WANG Shan xu. Introduction of Bayesian Forecasting System [J]. Journal of China Hydrology, 2001, 21(5): 33-34. (in Chinese))

- [52] Krzysztofowicz R, W B Evans. Probabilistic Forecasts from the National Digital Forecast Database [J]. *Weather and Forecasting*, 2008, 23(2): 276-289.
- [53] Wood A W, J C Schaake. Correcting Errors in Streamflow Forecast Ensemble Mean and Spread [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(1): 132-148.
- [54] Brown J D, D J Seo. A Nonparametric Postprocessor for Bias Correction of Hydrometeorological and Hydrologic Ensemble Forecasts [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(3): 642-665.
- [55] Weerts A, H Winsemius, J Verkade. Estimation of Predictive Hydrological Uncertainty Using Quantile Regression: Examples from the National Flood Forecasting System (England and Wales) [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 255-265.
- [56] Reid D J. Combining Three Estimates of Gross Domestic Product [C]. *Economica*, 1968, 35(140): 431-444.
- [57] Bates J M, C W Granger. The Combination of Forecasts [J]. *OR*, 1969, 20(4): 451-468.
- [58] Dickinson J. Some Statistical Results in the Combination of Forecasts [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1973, 24(2): 253-260.
- [59] 梁忠民, 戴荣, 王军, 等. 基于贝叶斯模型平均理论的水文模型合成预报研究[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(2): 114-119. (LIANG Zhongmin, DAI Rong, WANG Jun, et al. Study on Forecast Combination of Different Hydrological Models by Bayesian Model Averaging [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(2): 114-119. (in Chinese)).
- [60] Day G N. Extended Streamflow Forecasting Using NWSRFS [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1985, 111(2): 157-170.
- [61] 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, 28(1): 25-30. (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, 28(1): 25-30. (in Chinese)).
- [62] Wood A W. Long-range Experimental Hydrologic Forecasting for the Eastern United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 2002, 107(D20): A41-6.
- [63] Shi X, A W Wood, D P Lettenmaier. How Essential is Hydrologic Model Calibration to Seasonal Streamflow Forecasting? [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(6): 1350-1363.
- [64] Thirel G. On the Impact of Short-range Meteorological Forecasts for Ensemble Streamflow Predictions [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(6): 1301-1317.
- [65] Li H, et al. The Role of Initial Conditions and Forcing Uncertainties in Seasonal Hydrologic Forecasting [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2009, 114(D4): F10.
- [66] Webster P J. Extended-range Probabilistic Forecasts of Ganges and Brahmaputra floods in Bangladesh [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(11): 1493-1514.
- [67] Shukla S, D P Lettenmaier. Seasonal Hydrologic Prediction in the United States: Understanding the Role of Initial Hydrologic Conditions and Seasonal Climate Forecast Skill [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 8(4): 6565-6592.
- [68] Reggiani P, et al. Uncertainty Assessment Via Bayesian Revision of Ensemble Streamflow Predictions in the Operational River Rhine forecasting system [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(2): 1-14.
- [69] Fraley C, A E Raftery, T Gneiting. Calibrating Multimodel Forecast Ensembles With Exchangeable and Missing Members Using Bayesian Model Averaging [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(1): 190-202.
- [70] 田向军, 谢正辉, 王爱慧, 等. 求解贝叶斯模型平均的新方法 [J]. *中国科学 (地球科学)*, 2011, 41(11): 1679-1687. (TIAN Xiangjun, XIE Zhenghui, WANG Aihui, et al. A New Approach for Bayesian Model Averaging [J]. *Sci China Earth Sci*, 2011, 41(11): 1679-1687. (in Chinese)).
- [71] 赵琳娜, 梁莉, 王成鑫, 等. 基于贝叶斯模型平均的集合降水预报偏差订正 [C]. // 赵琳娜. 第 28 届中国气象学会年会——S3 天气预报灾害天气研究与预报, 2011. (ZHAO Lina, LIANG Li, WANG Chengxin, et al. The Calibration of Precipitation Ensemble Forecast Using Bayesian Model Averaging [C]. *The 28th annual meeting of China meteorological society—S3 research and forecasting of disaster weather forecast*, 2011. (in Chinese)).
- [72] Kang T H, Kim Y O, Hong I P. Comparison of Pre and Post processors for Ensemble Streamflow Prediction [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2010, 11(2): 153-159.
- [73] Morawietz M, Xu C Y, Gottschalk L, et al. Systematic Evaluation of Autoregressive Error Models as Post-processors for a Probabilistic Streamflow Forecast System [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1): 58-72.
- [74] Ye A, Duan Q, Yuan X, et al. Hydrologic Post-processing of MOPEX Streamflow Simulations [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.055.
- [75] Thielen J. The European Flood Alert System-Part 1: Concept and Development [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(2): 125-140.
- [76] Bartholmes J. The European Flood Alert System EFAS-Part 2: Statistical Skill Assessment of Probabilistic and Deterministic Operational Forecasts [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(2): 141-153.