

The Hydrological Ensemble Forecast and Case

水文集合预报概述及 模型案例

叶爱中 段青云 徐静 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水文集合预报概述及 模型案例

叶爱中 段青云 徐静 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书内容包括水文集合预报的定义、发展史及水文集合预报的实现方法,以及水文集合预报产生的三大核心模块及集合预报的验证方法与应用。全书分5章:水文集合预报概述、水文集合预报前处理、分布式时变增益水文模型、水文集合预报后处理和水文集合预报验证。其中水文集合预报前处理主要是对水文模型输入的降水、气温预报进行订正并给出不确定性的概率分布;分布式水文模型是集合预报的核心,提供水循环的模拟及预报过程;水文集合后处理主要针对水文模型预报的流量进一步进行矫正,并给出流量不确定性的概率分布;水文集合预报验证介绍当前最常用的集合预报的验证方法。

本书是我国当前第一本系统介绍水文集合预报的书籍,可以作为水文预报方面的科技工作者参考,也可以作为相关专业教师、研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水文集合预报概述及模型案例 / 叶爱中, 段青云,
徐静著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 6
ISBN 978-7-5170-2305-0

I. ①水… II. ①叶… ②段… ③徐… III. ①水文预
报—水文模型—案例—研究 IV. ①P338

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第181751号

书 名	水文集合预报概述及模型案例
作 者	叶爱中 段青云 徐 静 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	北京三原色工作室
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 6.75印张 114千字
版 次	2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

2012 年自然灾害总共造成了全世界 1600 亿美元的损失,其中,中国洪涝灾害致死 673 人,直接损失 2675 亿元人民币。随着社会经济的发展,由气候变化导致的气候极端事件使全球面临更加严重洪水泛滥的危险。世界银行和经合组织发表的一份研究报告指出,如果不采取必要的应对措施,到 2050 年,洪灾每年造成的损失总额可高达 1 万亿美元。其中全球洪灾损失最高的城市是中国广州。高精度的水文预报是减少洪灾损失的最廉价、最有效的方式。传统的单值水文预报不确定性大、预见期短等问题,而水文集合预报不仅包含了传统单值水文预报的信息,更为用户提供了预报不确定性的定量信息,使用户更加明确未来洪灾发生的风险大小,从而做出最合理、高效与低成本的预防措施。

本书共分为 5 章。第 1 章系统地综述了水文集合预报基本理论方法及发展现状;第 2 章阐述了水文集合预报前处理,介绍了基于典型事件的集合预报前处理方法及应用;第 3 章系统介绍了考虑人类活动影响的分布式时变增益水文模型;第 4 章阐述了水文集合预报后处理,介绍了总线性后处理模型;第 5 章系统地总结了水文集合预报验证的分类及方法。

本书得到了国家科技支撑计划课题(2013BAB05B04)“流域水资源循环过程模拟关键技术研究”与长江科学院开放研究基金项目(CKWV2012324/KY)“基于遥感信息的跨界河流水循环模型”的资助。特此向支持和关心作者教学、科研工作的所有单位和个人表示衷心的感谢。

全书由叶爱中统稿，其中第 1 章由徐静与叶爱中编写，第 2 章、第 4 章由叶爱中与段青云编写，第 3 章由叶爱中编写，第 5 章由叶爱中与徐静编写。

作者
2014 年 1 月

学 术 术 语

集合径流预报	Ensemble Streamflow Prediction: ESP
水文集合预报实验计划	Hydrologic Ensemble Predictions Experiment: HEPEX
模型输出统计法	Model Output Statistics: MOS
贝叶斯多模型平均方法	Bayesian Model Average: BMA
贝叶斯预报系统	Bayesian Forecasting System, BFS
贝叶斯预报处理器	Bayesian Processor Forecas: BPF
指示器协克里金方法	Indicaor Cokriging: ICK
广义线性后处理模型	GeneralLinear Model Post-Processor: GLMPP
完美后预报	Perfect Prognosis
现代水文预报业务	Advanced Hydrologic Prediction Service: AHPS
美国国家天气局河流 预报系统	National Weather Service River Forecast System: NWSRFS
气候预报系统	Climate Forecast System: CFS
全球预报系统	Global Forecast System: GFS
水文集合预报前处理	Ensemble Pre-Processor: EPP
典型事件构造	Canonical Events
Schaake 洗牌法	Schaake Shuffle

美国国家大气环境预报中心	National Centers for Environmental Prediction, NCEP
欧洲洪水预警系统	European Flood Awareness System: EFAS
时变增益模型	Time Variant Gain Model: TVGM
分布式时变增益模型	Distributed Time Variant Gain Model: DTVGM
数字高程模型	Digital Elevation Model: DEM
国内生产总值	Gross Domestic Product: GDP
水文模型参数评估实验项目	Model Parameter Estimation Experiment: MOPEX
QQ 图	Quantile-Quantile plot: QQPLOT
平均绝对差	Mean Absolute Error: MAE
均方差	Mean Square Error: MSE
均方根差	Root Mean Square Error: RMSE
平均连续等级概率评分	Mean Continuous Rank Probability Score: MCRPS
布赖尔评分	Brier Score: BS
临界成功指数	Critical Success Index (or Threat Score): CSI(or TS)
相对平均差	Relative Mean Error (or Relative Bias): RME(or RB)
频率偏差	Frequency Bias: FB

皮尔逊相关系数	Pearson Correlation Coefficient: PCC
斯皮尔曼等级相关	Spearman Rank Correlation: SRC
Nash 效率系数	Nash-Sutcliffe efficiency value: NSE
平均绝对差技能分数	Mean Absolute Error Skill Score: MAESS
均方误差技能分数	Mean Square Error Skill Score: MSESS
平均连续等级概率 技能评分	Mean Continuous Rank Probability Skill Score: MCRPSS
布赖尔技能评分法	Brier Skill Score: BSS
公平预测评分(或 Gilbert 评分)	Equitable Threat Score (or Gilbert Skill Score): ETS
布赖尔可靠性评分	Brier Score Reliability: BSR
可靠性框图	Reliability Diagram: RD
等级直方图	Rank Histogram: RH
成功率	Success Ratio: SR
布赖尔解析度评分法	Brier Score Resolution: BSRe
相对操作特性得分	Relative Operating Characteristic Score: ROCS
相对操作特性图	Relative Operating Characteristic Diagram: ROCD
命中率	Probability of Detection (or Hit Rate): HR

误报率

Probability of False Detection (or False
Alarm Rate): FAR

预测频率直方图

Forecast Frequency Histogram: FFH

预报 QQ 图

Predictive Quantile-Quantile plot:
Pre-QQPLOT

泰勒图

Taylor Diagram

目 录

前言

学术术语

第1章 水文集合预报概述	1
1.1 水文集合预报理论与方法	1
1.1.1 水文集合预报前处理理论与方法	3
1.1.2 水文集合预报后处理理论与方法	5
1.1.3 水文集合预报应用现状	6
1.2 小结	7
参考文献	8
第2章 水文集合预报前处理	12
2.1 基于典型事件的集合预报前处理方法	12
2.1.1 时间窗口选择	12
2.1.2 零值降水阈值确定	13
2.1.3 降水集合预报前处理方法——典型事件模型构建	14
2.2 集合预报前处理方法实例分析	16
2.2.1 数据说明	16
2.2.2 典型事件定义	22
2.2.3 结果及讨论	23
2.3 小结	32
参考文献	32
第3章 分布式时变增益水文模型	33
3.1 模型结构	33
3.2 产流模型	34
3.2.1 降雨蒸散发计算模型	35
3.2.2 地表水产流模型	38
3.2.3 土壤水产流模型	39
3.2.4 地下水产流模型	40
3.2.5 单元产流计算	40
3.2.6 总产流	42

3.2.7	水保工程耗水模型	42
3.3	汇流模型	43
3.3.1	子流域内汇流计算	43
3.3.2	河网汇流计算	46
3.4	用水耗水模块	46
3.4.1	农业	47
3.4.2	工业	48
3.4.3	生活用水	48
3.4.4	用水取水方案	49
3.5	水库调度模块	49
3.5.1	单个水库调度	49
3.5.2	水库群调度	50
3.5.3	水库在水文模型中实现	51
3.6	跨流域调水模块	51
3.6.1	源头水库调度(保证是否有水可调)	52
3.6.2	调水中工程汇流计算(运动波)	53
3.6.3	沿途分水计算(分水到沿途水库, 供需平衡)	53
3.7	模型尺度与复杂度分析	53
3.7.1	月尺度模型	54
3.7.2	日尺度模型	54
3.7.3	时尺度模型	55
3.7.4	模型复杂度分析	56
3.8	小结	57
	参考文献	58
第4章	水文集合预报后处理	59
4.1	水文集合后处理方法	59
4.2	水文集合后处理方法应用分析	62
4.2.1	研究区简介	62
4.2.2	GLMPP 参数	64
4.2.3	后处理、参数优化后与未优化参数模拟流量对比分析	64
4.2.4	模型与观测确定性结果的经验分位数图分析	69
4.2.5	后处理及多模型的概率结果	70
4.3	小结	75
	参考文献	75

第5章 水文集合预报验证	77
5.1 基本概念及定义	78
5.1.1 集合平均	78
5.1.2 概率预报	78
5.2 验证方法汇总	79
5.2.1 平均绝对差(MAE)	79
5.2.2 均方差(MSE)	79
5.2.3 均方根差(RMSE)	79
5.2.4 平均连续等级概率评分 (MCRPS)	80
5.2.5 布赖尔评分(BS)	81
5.2.6 临界成功指数(CSI)	81
5.2.7 相对平均差(RME)	82
5.2.8 频率偏差(FB)	82
5.2.9 皮尔逊相关系数(PCC)	83
5.2.10 斯皮尔曼等级相关(SRC)	83
5.2.11 Nash效率系数(NSE)	83
5.2.12 平均绝对差技能评分 (MAESS)	84
5.2.13 均方误差技能评分 (MSESS)	84
5.2.14 平均连续等级概率技能评分 (MCRPSS)	84
5.2.15 布赖尔技能评分法 (BSS)	85
5.2.16 公平预测评分 (或Gilbert评分)(ETS)	85
5.2.17 布赖尔可靠性评分(BSR)	86
5.2.18 可靠性框图(RD)	86
5.2.19 等级直方图(RH)	87
5.2.20 成功率(SR)	88
5.2.21 布赖尔解析度评分法 (BSRe)	88
5.2.22 相对操作特性得分(ROCS)	88
5.2.23 相对操作特性图(ROC)	89
5.2.24 命中率(HR)	90
5.2.25 误报率(FAR)	90
5.2.26 预测频率直方图(FFH)	90
5.2.27 预报QQ图(Pre-QQPLOT)	90
5.2.28 泰勒图(Taylor diagram)	92
参考文献	93

第 1 章 水文集合预报概述

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进行模拟计算,然后给出流量或水位预报。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概率预报方法(丛树铮, 2010)。相对于传统确定性预报,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(Boucher 等, 2012)。

对于集合预报的研究应追溯至 1968 年, Lorenz (1963、1968) 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。为解决这一问题, Epstein (1969) 和 Leith (1974) 给出了集合预报的思想和方法,即使用多个成员来描述大气状态的不确定性 (Toth 和 Marchok, 2001) 将单一确定性预报转变为概率预报。发展至 20 世纪 90 年代, Molteni 等 (1996) 和 Kalnay 等 (1997) 使气象集合预报成为现实。

气象集合预报的发展与成熟,为水文集合预报奠定了理论基础,促进了水文集合预报的发展。长达 30 多年的气象集合回报资料库的存在,为我们了解气象预报误差统计特征和不确定性信息提供了有力的数据支持,已经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。

本章主要对水文集合预报的理论、方法及应用进展进行综述,探讨水文集合预报的研究及应用的发展方向。

1.1 水文集合预报理论与方法

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 (ESP) (Twedt 等, 1977)。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,理论上其预报精度不高,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。气象集合预报与水文模型结合是产生水文集合预报最简单的方法(李俊等,2007;彭涛等,2010),与传统 ESP 方法相比,提高了预报精度、减小了预报偏差、延长了预见期。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(Schaake 等,2010;Wu 等,2012)。

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(HEPEX)(Schaake 等,2007),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,为灾害应急管理部门和水资源管理决策部门提供决策依据。HEPEX 的发起标志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(McEnergy 等,2005;Pappenberger 等,2011;Cloke 等,2009;Luo 等,2007;Wang 等,2012)。

HEPEX 研究计划指出(Schaake,2006;Schaake 等,2007;陆桂华等,2012),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、流域初始条件和边界条件的赋值,以及模型结构和参数的选择等(段青云,2012)。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,在进行水文预报时,我们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,集合预报可以分为如下几个大的模块:①水文集合前处理;②集合数据同化;③参数集合处理;④水文集合后处理;⑤分布式水文模型。

将以上所有模块耦合到一起即是水文集合预报系统,如图 1-1 所示。此处将重点总结水文集合预报的前处理与后处理模块。

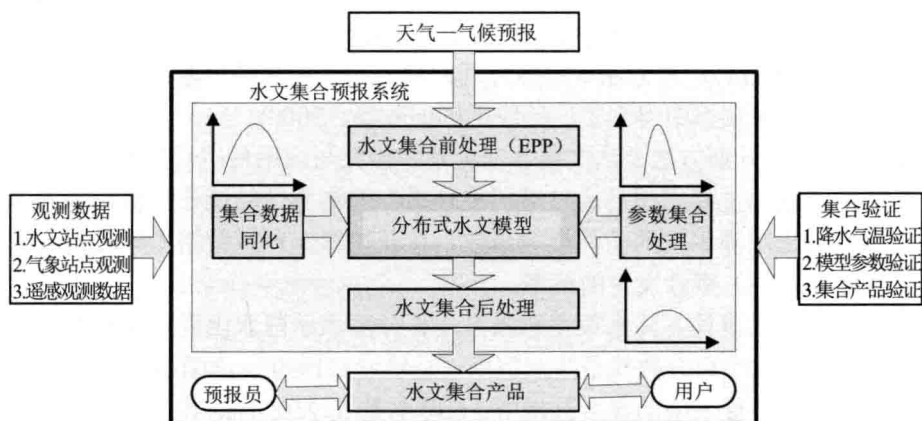


图 1-1 水文集合预报系统结构图

1.1.1 水文集合预报前处理理论与方法

水文集合预报前处理也称为气象集合预报后处理。水文集合前处理主要消除定量降水/温度预报的系统偏差，并给出包含不确定性信息的集合预报。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提供降水等输入。

(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（Klein 等，1959）。

(3) 如何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）中进行综合集成，获得最优的集合预报结果，还需要更多更好的方法。

因此，我们需要对数值气象预报产品进行统计前处理。统计前处理的基本思想是：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。

经典的水文集合前处理方法有如下几种：

(1) 早在 1959 年，Klein 等(1959)率先提出了用于校正气象预报偏差的统计处理方法——完美后预报方法（Perfect Prognosis），该方法提出将不同的观测气象要素之间的统计关系直接应用于模式输出的气象要素中。

(2) Glahn 和 Lowry(1972)建立了模型输出统计法 (Model Output Statistics, MOS), 该方法采用多元回归建立起观测与模型输出之间的统计关系, 在气象预报中得到了广泛应用(Glahn 等, 2009)。

(3) 贝叶斯方法是水文集合前处理中研究与应用最广泛的方法之一。贝叶斯方法的主要思想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。

针对降水事件, 降水概率预报是用百分率表示降水出现可能性大小的预报形式, 这个百分数就是降水概率(马培迎, 1999)。如在某天的日降水集合成员等可能发生的集合预报中, 日降水量 R_o 发生的概率为(陈朝平等, 2010):

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} P_i = 1, & R \geq R_o \\ P_i = 0, & R < R_o \end{cases} \quad (1-1)$$

式中: P 为降水集合预报概率; n 为集合预报成员数目; P_i 为每个成员降水预报值与给定降水量的比较; R 为每个成员预报日降水量值, mm。

贝叶斯公式在降水集合前处理中可写为:

$$P(R_o | R_f) = \frac{P(R_o)P(R_f | R_o)}{P(R_o)P(R_f | R_o) + P(\bar{R}_o)P(R_f | \bar{R}_o)} \quad (1-2)$$

式中: $P(R_o)$ 和 $P(\bar{R}_o)$ 分别为降水量 R_o 发生的概率与不发生的概率, 称之为先验概率; $P(R_f | R_o)$ 为对应降水量 R_o 的预报降水 R_f 发生的条件概率, 称之为似然函数; $P(R_o | R_f)$ 为已知集合预报降水概率已知的条件下实际降水发生的概率, 称之为后验概率。

Raftery 等(2005)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 (BMA)。BMA 是一种统计处理方法, 通过对多个模型的预报值进行概率集成, 产生高技能、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, 代表着每个模型在模型训练阶段相对的预报技巧(刘建国等, 2013)。Sloughter 等(2007、2012)应用 BMA 方法分别研究了降水和风速的多模式集合预报; 段青云等(2007、2010)将 BMA 方法应用到水文、气候变化预测中; Fraley 等(2010)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(2011)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(2011)也应用 BMA 算法对 TIGGE 降水预报数据进行了有效地偏差修正;刘建国等(2013)基于 TIGGE 数据和 BMA 方法建立了 24 小时气温预报。

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。如:不能将所有概率都是 1%的成员构成一个时间序列作为水文模型的输入,而是根据一定的统计规律构建时间序列。Schaake 等(2006)和 Clark 等(2004)提出了“Schaake Shuffle”。

“Schaake Shuffle”方法的基本原理是: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,重构可以体现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。

1.1.2 水文集合预报后处理理论与方法

Krzysztofowicz 等(1985、1999、2004)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。王善旭(2001)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性,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,再综合成为总的不确定性概率分布。针对降雨径流模型来说,输入不确定性主要指预见期内的降雨量,而水文模型不确定性是指模型误差、测量误差等。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(1985、2008)。Wood 和 Schaake (2008)提出了一种适用于月径流预报的统计后处理方法;Brown 和 Seo (2010)使用指示器协克里金方法(ICK)来校正集合预报的系统偏差;Weerts 等(2011)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。

从概率上讲,水文集合后处理即是求水文集合预报对应的观测值的条件概率密度函数。由于未来观测值未知,在求出概率密度函数后,即可通过模型预报值求出未来的观测值。