

# Theory and Framework of Hydrological Modeling Based on Multiple Working Hypotheses

Kairong Lin<sup>1,2</sup>, Yang Hu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Water Resource and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou

<sup>2</sup>Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou

Email: [linkr@mail.sysu.edu.cn](mailto:linkr@mail.sysu.edu.cn)

Received: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2014; revised: Sep. 29<sup>th</sup>, 2014; accepted: Oct. 6<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Due to complexity of environment system and impact of climate change and human activity, there are many uncertainties in hydrological modeling and forecasting, which affect the reliability and practicability of the simulation and prediction results to some degree. To solve this problem, a framework of hydrological modeling based on multiple working hypotheses was presented, including developing a hydrological model based on CORBA (Common Object Request Broker Architecture), to provide more alternative model hypotheses and parameter based on characteristics of climate and underlying in study basin, for model hypothesis testing; and establishing a multi-factors diagnostic approach based on Bayesian theory for model evaluation. Multiple working hypotheses for hydrological modeling will benefit the improvement of the hydrological forecasting theory and accuracy, and provide the scientific decision for flood control and operation.

## Keywords

Hydrological Modeling, Multiple Working Hypotheses, Changing Environment, Uncertainty

---

# 基于多重工作假说的水文模拟理论与框架

林凯荣<sup>1,2</sup>, 胡 杨<sup>1,2</sup>

作者简介: 林凯荣(1980-), 男, 福建龙海人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究工作。

<sup>1</sup>中山大学水资源与环境系, 广州

<sup>2</sup>华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州

Email: [linkr@mail.sysu.edu.cn](mailto:linkr@mail.sysu.edu.cn)

收稿日期: 2014年9月22日; 修回日期: 2014年9月29日; 录用日期: 2014年10月6日

## 摘要

由于环境系统本身的复杂性, 加上气候变化以及人类活动的影响, 使得现有的水文模型在模拟和预测自然过程中存在很大的不确定性, 这在一定程度上限制了模拟与预报结果的可靠性和实用价值。针对这个问题, 本文提出了建立基于组件技术的模块化流域水文模型, 结合研究流域的气候和下垫面信息, 确定可供选择的相对合理的假说模型和参数; 运用每个假说模型进行模拟试验; 同时建立基于贝叶斯理论的流域水文模拟多重因子评价诊断方法进行模型假说检验的基于多重工作假说的水文模拟框架。这对于完善水文预报理论、改善预报精度以及为防洪调度提供科学的决策依据, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

## 关键词

水文模拟, 多重工作假说, 变化环境, 不确定性

## 1. 引言

自 20 世纪 60 年代以来, 以计算机技术、水情自动测报系统、现代控制理论等为代表的新技术、新方法在水文预报中的应用不同程度的提高了预报精度, 水文预报技术在理论与实践方面都获得了突飞猛进的发展。随着计算机、地理信息系统、雷达、遥感、以及全球定位系统等科学技术发展的日新月异, 流域水文模型的研究与应用在过去三十多年里也相应的取得了重要的进展。但是, 洪水过程是一个复杂的动态过程, 它的发生与发展取决于气象因素和地理因素; 水文预报需要应用多种水文、气象资料, 采用概化后的水文模型结构和参数, 依赖于对输入、输出信息进行解释的专家判断, 这些复杂的因素导致了水文预报的不确定性, 它始终存在并制约着防洪决策的正确性。水文模拟与预报的不确定性已经成为当前国际水文科学研究中的重要课题, 国内外很多水文学家[1] [2]都认为现在阻碍水文模型发展的因素有两个, 一是人们经常在“贩卖”自己的模型, 重推销而轻验证; 二是水文学研究更是像集邮一样对个别流域做专题研究, 而没有利用更多的数据来寻找通用的模型方法。因此, 如何在变化环境条件下找到最合适的水文模型, 有效地弱化水文模拟与预报中的不确定性, 是其中的一个关键科学问题; 而更加精确科学地进行水文模拟与预报是其最终的目的。这也是国际水文科学协会的 PANTA RHEI (Everything Flows)的新的国际水文十年计划(2013~2022)和国际水文集合预报试验计划 HEPEX(Hydrologic Ensemble Prediction Experiment)[3]的重要研究内容。本文旨在总结现行水文模拟存在的问题的基础上, 提出采用多重工作假说的水文模拟框架, 建立更加符合实际水文过程的方法。

## 2. 多重工作假说理论

### 2.1. 当前水文模拟存在的主要问题

流域水文模型经历了几十年的发展, 随着科学技术的发展, 模型也在不断的改进和完善。到目前为止, 据不完全统计至少有上千种流域水文模型。在 20 世纪 60~80 年代主要以概念性模型和系统模型的研究

制和开发为主,至今仍得到广泛地应用。进入 20 世纪 90 年代,随着计算机技术和一些交叉学科的发展,流域水文模型研究的方向主要反映在计算机技术、空间遥感技术(RS)、地理信息系统(GIS)等的应用,分布式流域水文模型的研究开发得到普遍的关注[4]。虽然我们已开发了很多流域水文模型,但不管是集总式概念性的或者是分布式物理性的,每一个流域水文模型在模拟和预测自然界的水文循环过程都存在误差。这样的误差直接体现了水文模型在模拟环境系统中的不确定性。对于流域水文模型的不确定性的来源归纳起来可分为三类:1) 观测资料的误差;2) 模型结构的误差;3) 模型参数估计的不确定性。

近些年来水文模型的不确定性问题在国际上得到了广泛的关注。Bormann 和 Diekkruger[5]指出在变化环境条件下应用流域水文模型必须考虑模型不确定性的影响。而 Singh 和 Woolhiser[6]指出,未来的分布式物理性流域水文模型的研究重在模型验证、误差传递和不确定性、风险和可靠性的分析等方面。Beven[7]于 1992 年率先提出了流域水文模型“异参同效”的观点,并针对流域水文模型的不确定性研究问题,基于 Horberger 和 Spear 的 RSA 方法,提出了通用似然不确定性估计(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, GLUE)方法。该方法易于理解和操作,可以用于各种程度的复杂性和非线性的模型中,是目前水文模拟、水质模拟中主要的不确定性估计方法之一。国内,莫兴国和刘苏峡[8]较早将 GLUE 方法应用到黄河支流卢氏流域估计 LISFLOOD 模型的不确定性。在 GLUE 方法的基础上,刘艳丽等采用多准则似然判据进行了碧流河水库洪水预报的不确定性分析[9],林凯荣等提出了基于 Copula-Glue 的水文模型参数不确定性估计方法[10]。但也有研究者认为 GLUE 方法并非经典的 Bayesian 方法、主观判断参数可行域阈值和推求的参数后验概率分布不具有显著的统计特征[11] [12]。20 世纪 90 年代,研究人员将马尔科夫链蒙特卡罗法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)引入到参数的不确定性研究中[13] [14],它的发展又为不确定性研究提供了更强大的数学工具。MCMC 方法从参数的后验分布提取样本,提供了比单点估计更多的信息,而且避免了用一个正态近似后验分布用于推断的必要。另一种考虑模型不确定性的方法是采用基于贝叶斯理论的不确定性方法。该方法包括贝叶斯模型选择法(Bayesian model choice)和贝叶斯模型平均法(Bayesian model averaging)[15]。贝叶斯模型选择法认为应该通过模型的后验概率来比较各个模型的优劣,具有最大后验概率的模型即为最好的模型。贝叶斯模型平均法则通过估算每个模型的一些变量值,然后根据模型正确度概率进行估算。国内,梁忠民等[16]采用贝叶斯统计模型法来估计 TOPMODEL 参数不确定性;董磊华等[17]则利用贝叶斯模型加权平均方法进行水文模型的不确定性分析。其他有代表性的方法还有:Thiemann 等人提出的贝叶斯递归估计 BaRE (Bayesian Recursive Estimation)方法[18],由 SCE-UA 算法衍生来的 SCEM-UA (shuffled complex evolution Metropolis algorithm)方法[19],Butts 等提出的集束法(Ensemble)[20],Montanari 和 Brath 提出的 Meta-Gaussian 模型[21],Wagener 提出的动态可识别方法(Dynamic identifiability analysis, DYNIA)[22],参数求解方法(ParaSol)[23],等等。

由上可知,目前针对如何估计水文模拟与预报的不确定性问题已经提出了很多的方法,虽然各有优点,也有不足,国际上对于不确定性的定量估计方法的选择也还存在一些争论,比如说 GLUE 方法;但是对于模型输入和参数的不确定性估计比较公认的最常用的方法还是贝叶斯统计模型法[24];而对于模型结构本身的不确定性一般较难量化,为此,Clark 等[25]建立了 FUSE (framework for understanding structural errors)来分析不同模型结构在不同情景下的模拟效果;同时对于如何针对给定问题提出最优模型结构并定量估计模型结构的不确定性,提出了采用多重工作假说方法的设想[26]。

另外,如何有效地弱化水文模拟与预报的不确定性成为了水文模拟与预报的不确定性的另一个主要问题。虽然流域水文模型对水文循环的很多过程都进行了模拟,但传统的方法大多仅采用流域出口断面的流量过程来对其进行验证。Goodman 等人[27]认为弱化水文模拟与预报的不确定性的有效途径之一就是充分挖掘所有可利用的数据,建立定量估计不确定性的统计方法,有效地综合各种不同的信息源。在没有新数据源的时候,就只有最大程度地挖掘现有的数据中有用的信息。Gupta 与 Sorooshian[28]认为数

据包含的信息多少取决于水文过程的变幅,如果数据涵盖了丰水、中水、枯水年,则认为数据中包含的水文信息较多。Uhlenbrook 等人[29]指出对于不确定性潜在的有效约束在于对于新增数据源的模拟进行拟合良好性优选。基于此,Choi and Beven[30]在 GLUE 方法的框架下,以 TOPMODEL 为例,提出了使用多过程和多目标的模型控制来弱化水文预报不确定性的方法。Gallart 等人[31]则以实测水位记录数据为控制条件,来弱化地表和地下径流预报的不确定性。Schmittner 等人[32]采用同位素示踪法来弱化海洋跨密度面混合和碳循环工程。Maschio 等人[33]也尝试了通过以观测数据作为控制条件,结合不确定性分析和历史拟合方法来弱化水库参数的不确定性。Karasaki 等人[34]则通过勘探试验利用温度、压力和密度等信息来减小地下水模型的不确定性。林凯荣等尝试了采用洪水过程分类、分子流域和分水源方法以减少水文模拟与预报中的不确定性的研究[35]-[37]。另外,在不确定性结果的估计方面采用的评价指标也比较单一。Blasone 和 Vrugt 最早采用估计的预测区间的覆盖率作为评价指标[14],Feyen 等则以预测区间的覆盖率和区间宽度为评价指标[38],卫晓婧和熊立华进一步提出采用覆盖率、区间宽度和区间的对称性进行评价[39]。由于不确定性区间的评价指标不是单一的,而且覆盖率和区间宽度往往是相矛盾的,区间宽度越大,相应的覆盖率会越高,反之亦然;因此,对于水文模拟的不确定性的评价,不能够仅从单一的因子和评价指标出发,必须根据具体情况的实际需要进行多因子多目标综合评价。

## 2.2. 多重工作假说理论

美国著名的地质学家 Chamberlin[40]1890 年在 Science 期刊发表了一篇文章,题目是多重工作假说方法,引起了科学家们高度的注意及好评,后来这篇文章又陆续重新刊印在 Journal of Geology(1931),Scientific Monthly(1941)及 Science(1965)。时至今日,这个方法历经百年,已经被公认为是科学研究的重要方法之一。多重工作假说的核心思想就是对尽可能多的假说进行尽可能多的检验。承袭一个单一的假说,思想有可能会产生单一解释的概念,但是适合的解释通常涉及许多假说的组合,才能导出以不同构成的组合性成果。真正的解释因此必然是复杂的,复杂的现象的解释通常鼓励使用多重假说的方法,这也是这种方法的主要优点之一。美国著名水文学家 Clark 等于 2011 年首次提出了采用多重工作假说方法进行水文模拟的设想[26] [41] [42],也就是对尽可能多的假说模型进行尽可能多的检验。Clark 等认为该方法是解决复杂环境下水文模拟与预报中不确定性的一种有效的途径。

## 3. 基于多重工作假说的水文模拟框架

### 3.1. 基于同步观测实验的流域水文信息挖掘与分析

基于多重工作假说的水文模拟需要更多观测数据的支持,首先需要对研究的流域进行水文同步观测试验,采用“三性审查”方法对选用的资料进行分析与取舍,并利用智能算法结合聚类分析对水文过程进行科学分类。采用多普勒雷达技术,结合流域点雨量观测,进行流域降雨定量估计;利用 ENVISAT 高空间分辨率的 ASAR 主动雷达遥感数据和 AMSR-E 被动微波数据,通过迭代正向辐射算法反演得到研究流域的土壤湿度数据,并采用粒子滤波方法进行同化处理;结合同位素示踪法建立具有物理基础的水源划分方法得到研究流域的不同径流成分数据;利用水文同步观测数据结合典型流域的连续水文模拟和比较分析,对上述方法进行定量评估和修正。

### 3.2. 基于组件技术的模块化水文模型框架

随着模型不确定性问题的发现,现在的流域水文模拟与预报已经发展成可采用多种模型进行组合模拟和预报的方式。为了能够更加全面地认识水文模型描述的各个过程,构建更加合理的流域水文模型,本文提出需要建立一个基于组件技术的模块化流域水文模型框架。首先是根据流域环境分析结合水文观



测试选择产流机制和汇流方式相对合理的模型，通过构建通用化的状态变量、模型参数和状态方程，把模型分离成相互独立的各个部分；然后采用国际对象管理组织(Object Management Group)提出的CORBA (Common Object Request Broker Architecture)组件技术建立模块化的流域水文模型框架，为基于多重工作假说的水文模拟提供不同组合模型方案。

### 3.3. 基于贝叶斯理论的多重因子评价诊断方法

传统的方法主要以用流域水文站的流量过程来对流域水文模拟与预报的结果其进行验证，这已经不能满足社会发展而需要更加全面评价水文模拟与预报的合理性的更高要求。为此，本文建议选用目前比较公认的贝叶斯统计方法，建立多重因子的流域水文模拟与预报的评价与诊断方法，如图1所示。

另外，对于水文模拟与预报的评价，根据我国水情报预报规范，本项目选取确定性系数、峰值误差、总量误差和峰现时间误差等作为评价指标。而对于不确定性区间的评价，则选择区间覆盖率、相对区间宽度和区间对称性作为评价指标进行。需要指出的是这里采用相对区间宽度代替传统的区间宽度，因为由于不同流域或者不同场次的洪水的大小不同，所以得到的区间宽度不能够很直观地反映出不确定性区间的大小。

### 3.4. 基于多重工作假说的流域水文模拟系统

根据 3.2 建立的基于组件技术的模块化流域水文模型框架，结合研究流域的气候和下垫面信息，确定可供选择的相对合理的假说模型和参数；运用每个假说模型进行模拟试验；根据 3.3 建立的基于贝叶斯理论的流域水文模拟多重因子评价诊断方法进行模型假说检验；最后通过建立的多重工作假设检验的水文模型进行实际的预报，整个工作流程如图2所示。多重工作假说的核心思想就是对尽可能多的假说进行尽可能多的检验，这就需要构建一个比较灵活的、交互能力比较强的可操作的系统来实现；因此在上述研究内容的基础上，最终设计和开发一个可视化基于多重工作假设的流域水文模拟系统。

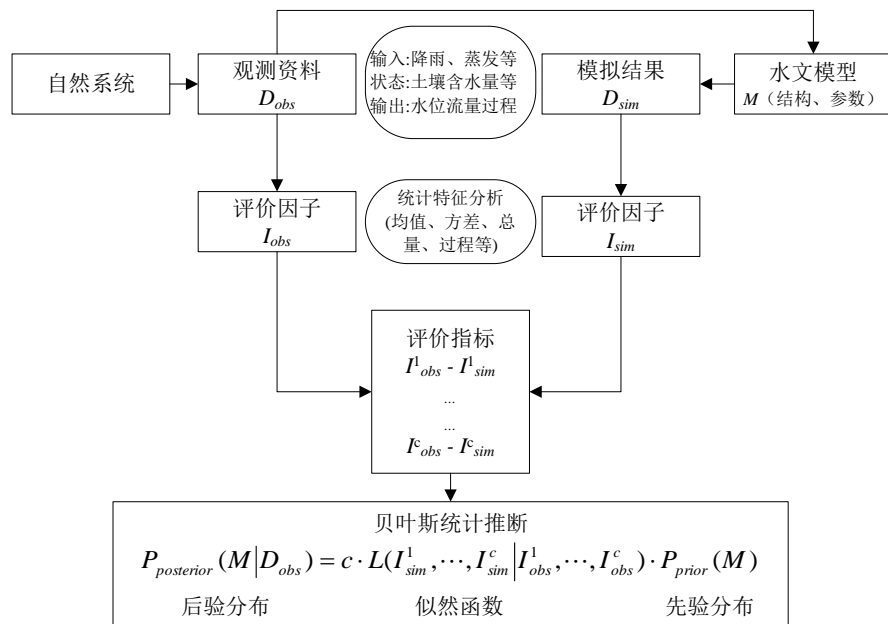


Figure 1. Schematic diagram of multiple factor hydrological simulation evaluation diagnosis based on Bayesian theory

图 1. 基于贝叶斯理论的多重因子水文模拟评价诊断方法示意图

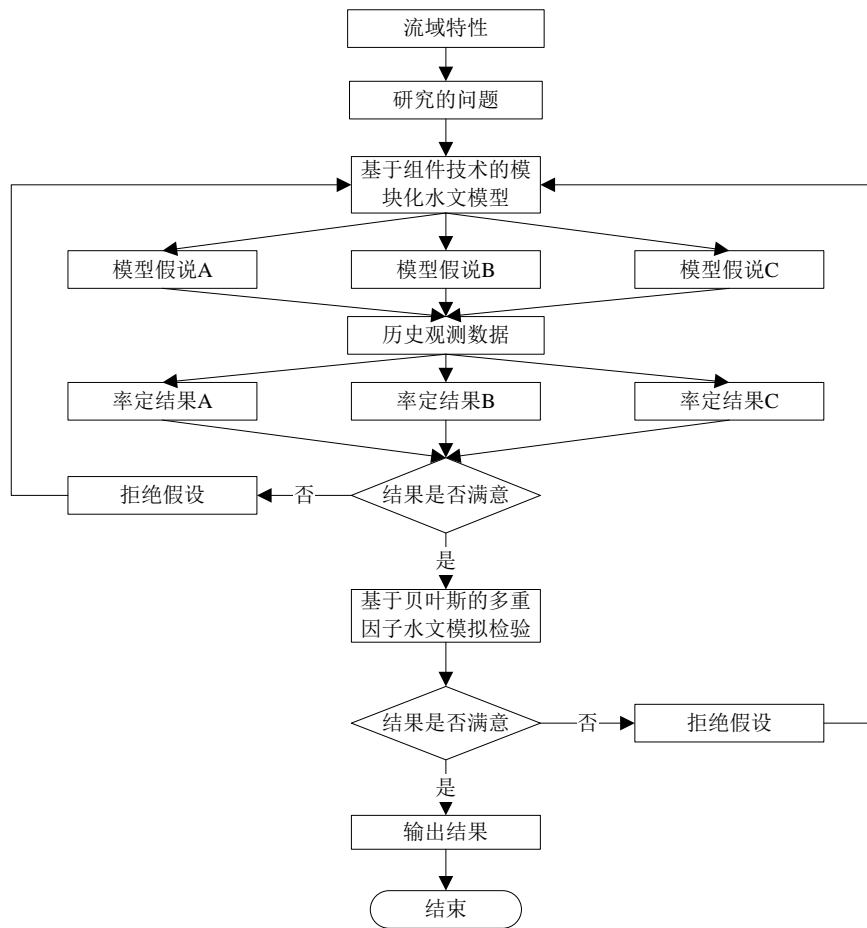


Figure 2. The workflow chart of hydrological simulation system based on multiple working hypotheses  
 图 2. 基于多重工作假说的流域水文模拟系统工作流程图

#### 4. 结论与展望

综上所述，复杂环境条件下的水文模拟与预报及其不确定性问题已经成为国际水文科学研究中的重要课题，目前的不确定性研究大都是针对如何定量估计不确定性的问题本身的，而对于如何弱化水文模拟与预报不确定性，这一国际水文学科的前沿问题，虽然已有一些学者开始了一些探索性的研究，但还很不够。其中，数据问题是阻碍水文科学发展的最重大的“瓶颈”。通过增加新的观测数据，如水位、土壤含水量、地表径流、地下径流等，作为控制条件是弱化水文模拟与预报不确定性的有效方法。另一个方面是相对于参数不确定性和输入不确定性来说，模型结构不确定的研究相对滞后。主要的问题是传统的单一工作假说更关注一个较为固定结构的水文模型的研究，而忽略其他可能更为科学合理的结构或者方法。因此，只有通过引入新技术新方法，充分挖掘可利用数据的信息，同时采用多重工作假说的方法才能大大提高复杂环境条件下流域水文模拟和预报的精度。这对于完善水文预报理论、改善预报精度以及为防洪调度提供科学的决策依据，具有重要的理论意义和实际应用价值。

#### 致 谢

本文获得国家自然科学基金面上项目(51379223)资助，在此表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] ANDRASSIAN, V., LERAT, J., LOUMAGNE, C., MATHEVET, T., MICHEL, C., OUDIN, L. and PERRIN, C. What is really undermining hydrologic science today? *Hydrological Processes*, 2007, 21(20):2819-2822.
- [2] 杨大文, 夏军, 张建云. 中国 PUB 研究与发展. 水问题的复杂性与不确定性研究与进展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.  
YANG Dawen, XIA Jun and ZHANG Jianyun. PUB research and development in China. The complexity and uncertainty of water issues research and development. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 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): 728-734.  
LU Guihua, WU Juan and WU Zhiyong. Advances in hydrologic ensemble prediction experiment. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 728-734. (in Chinese)
- [4] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1009-1017.  
XU Zongxue, CHENG Lei. Progress on studies and applications of the Distributed Hydrological Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(9): 1009-1017. (in Chinese)
- [5] BORMANN, H., DIEKKRUGER, B. Possibilities and limitations of regional hydrological models applied within an environmental change study in Benin (West Africa). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(33-36): 1323-1332.
- [6] SINGH, V. P., WOOLHISER, D. A. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(4): 270-292.
- [7] BEVEN, K. J., BINLEY, A. The future of distributed models, model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3): 279-298.
- [8] 莫兴国, 刘苏峡. GLUE 方法及其在水文不确定性分析中的应用. 水问题的复杂性和不确定性研究与进展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.  
MO Xingguo, LIU Suxia. The GLUE method and its application in hydrological uncertainty analysis. The complexity and uncertainty of water issues research and development. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 刘艳丽, 梁国华, 周惠成. 水文模型不确定性分析的多准则似然判据 GLUE 方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(4): 89-96.  
LIU Yanli, LIANG Guohua and ZHOU Huicheng. Uncertainty analysis of hydrological model using multi-criteria likelihood measure within the GLUE Framework. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(4): 89-96. (in Chinese)
- [10] 林凯荣, 陈晓宏, 江涛. 基于 Copula-Glue 的水文模型参数不确定性研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(3): 109-115.  
LIN Kairong, CHEN Xiaohong and JIANG Tao. Parameter uncertainty in hydrological model based on Copula and Glue. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(3): 109-115. (in Chinese)
- [11] MANTOVAN, P., TODINI, E. Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 2006, 330(1-2): 368-381.
- [12] BEVEN, K., SMITH, P. and FREER, J. Comment on "Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology" by Pietro Mantovan and Ezio Todini. *Journal of Hydrology*, 2007, 338(3-4): 315-318.
- [13] KUCZERA, G., PARENT, E. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 1998, 211(1-4): 69-85.
- [14] BLASONE, R. S., Vrugt, J. A., MADSEN, H., ROSBJERG, D., ROBINSON, B. A. and ZYVOLOSKI, G. A. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov chain Monte Carlo sampling. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(4): 630-648.
- [15] WASSERMAN, L. Bayesian model selection and model averaging. *Journal of Mathematical Psychology*, 2000, 44(1): 92-107.
- [16] 梁忠民, 李彬权, 余钟波, 华家鹏, 刘金涛. 基于贝叶斯理论的 TOPMODEL 参数不确定性分析. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 129-132.  
LIANG Zhongmin, LI Binqun, YU Zhongbo, HUA Jiapeng and LIU Jintao. Parametric uncertainty analysis for TOPMODEL based on Bayesian theory. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(2): 129-132. (in Chinese)
- [17] 董磊华, 熊立华, 万民. 基于贝叶斯模型加权平均方法的水文模型不确定性分析[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1065-1074.  
DONG Leihua, XIONG Lihua and WAN Min. Uncertainty analysis of hydrological modeling using the Bayesian Model Averaging Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(9): 1065-1074. (in Chinese)

- [18] THIEMANN, M., TROSSET, M., GUPTA, H. and SOROOSHIAN, S. Bayesian recursive parameter estimation for hydrological models. *Water Resources Research*, 2001, 7(10): 21-35.
- [19] VRUGT, J. A., GUPTA, H. V., BOUTEN, W. and SOROOSHIAN, S. A shuffled complex evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 2003, 39(8): 1-16.
- [20] BUTTS, M. B., PAYNE, J. T. and KRISTENSEN, H. An evaluation of the impact of model structure on hydrological modeling uncertainty for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 2004, 298(1-4): 242-266.
- [21] WAGENER, T., MCINTYRE, N., LEES, M. J., WHEATER, H. S. and GUPTA, H. V. Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modeling: Dynamic identifiability analysis. *Hydrological Processes*, 2003, 17(2): 455-476.
- [22] MONTANARI, A., BRATH, A. A stochastic approach for assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. *Water Resources Research*, 2004, 40(1): W01106.
- [23] VAN GRIENSVEN, A., MEIXNER, T. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Science and Technology*, 2006, 53(1): 51-59.
- [24] 梁忠民, 戴荣, 李彬权. 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*, 2011, 21(2): 274-281.  
LINAG Zhongmin, DAI Rong and LI Binqun. A review of hydrological uncertainty analysis based on Bayesian theory. *Advances in Water Science*, 2011, 21(2): 274-281. (in Chinese)
- [25] CLARK, M. P., SLATER, A. G., RUPP, D. E., WOODS, R. A., VRUGT, J. A., GUPTA, H. V., WAGENER, T. and HAY, L. E. Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research*, 2008, 44(12): W00B02.
- [26] CLARK, M. P., KAVETSKI, D. and FENICIA, F. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 2011, 47(9): W09301.
- [27] GOODMAN, D. Extrapolation in risk assessment: Improving the quantification of uncertainty, and improving information to reduce the uncertainty. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8(1): 177-192.
- [28] GUPTA, V. K., SOROOSHIAN, S. The relationship between data and the precision of estimate parameters. *Journal of Hydrology*, 1985, 81(1-2): 55-77.
- [29] UHLENBROOK, S., SIEBER, A. On the value of experimental data to reduce the prediction uncertainty of a process-oriented catchment model. *Environmental Modelling and Software*, 2005, 20(1): 19-32.
- [30] CHOI, H. T., BEVEN, K. Multi-period and multi-criteria model conditioning to reduce prediction uncertainty in an application of TOPMODEL within the GLUE framework. *Journal of Hydrology*, 2007, 332(3-4): 316-336.
- [31] GALLART, F., LATRON, J., LLORENS, P. and BEVEN, K. Using internal catchment information to reduce the uncertainty of discharge and baseflow predictions. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 808-823.
- [32] SCHMITTNER, A., URBAN, N. M., KELLER, K. and MATTHEWS, D. Using tracer observations to reduce the uncertainty of ocean diapycnal mixing and climate-carbon cycle projections. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(4): 19-32.
- [33] MASCHIO, C., SCHIOZER, D. J., MOURA, M. A. B. and BECERRA, G. G. A methodology to reduce uncertainty constrained to observed data. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2009, 12(1): 167-180.
- [34] KARASAKI, K., ITO, K., WU, Y. S., SHIMO, M., SAWADA, A., MAEKAWA, K. and HATANAKA, K. Uncertainty reduction of hydrologic models using data from surface-based investigation. *Journal of Hydrology*, 2011, 403(1-2): 49-57.
- [35] 林凯荣, 陈晓宏. 基于 FCM-SCEMUA 的水文模型参数不确定性估计方法. *水利学报*, 2010, 41(10): 1186-1192.  
LIN Kairong, CHEN Xiaohong. Uncertainty estimation of the hydrological model based on FCM and SCEMUA. *Journal of hydraulic engineering*, 2010, 41(10): 1186-1192. (in Chinese)
- [36] LIN, K. R., LIU, P., HE, Y. H. and GUO, S. L. Multi-site evaluation to reduce parameter uncertainty in a conceptual hydrological modeling within the GLUE framework. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(1): 60-73.
- [37] LIN, K. R., LIAN, Y. Q. and HE, Y. H. Effect of Baseflow Separation on Uncertainty of Hydrological Modeling in the Xinjiang Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014: Article ID: 985054.
- [38] FEYEN, L., KALAS, M. and VRUGT, J. A. Semi-distributed parameter optimization and uncertainty assessment for large-scale streamflow simulation using global optimization. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(2): 293-308.
- [39] 卫晓婧, 熊立华, 万民等. 融合马尔科夫链-蒙特卡洛算法的改进通用似然不确定性估计方法在流域水文模型中的应用. *水利学报*, 2009, 40(4): 464-473.  
WEI Xiaojing, XIONG Lihua, WAN Min, et al. Application of Markov Chain Monte Carlo method based modified generalized likelihood uncertainty estimation to hydrological models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(4): 464-473. (in Chinese)



- [40] CHAMBERLIN, T. C. The method of multiple working hypotheses. *Science (Old Series)*, 1890, 15: 92.
- [41] BEVEN, K. J., SMITH, P. J., WESTERBERG, I. K. and FREER, J. Comment on “Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling” by P. Clark et al. *Water Resources Research*, 2012, 48(11): W09301.
- [42] CLARK, M. P., KAVETSKI, D. and FENICIA, F. Reply to comment by K. Beven et al. on “Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling”. *Water Resources Research*, 2012, 48(11): W11802.