

Methodology and Application of Parameter Uncertainty Quantification  
in Watershed Hydrological Models

# 流域水文模型参数不确定性

量化理论方法与应用

宋晓猛 占车生 夏军 张永勇 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 流域水文模型参数不确定性

## 量化理论方法与应用

宋晓猛 占车生 夏军 张永勇 著



## 内 容 提 要

本书全面阐述了流域水文模型参数不确定性量化研究的主要技术方法理论及最新的研究进展,系统介绍了分布式水文模型参数敏感性分析、不确定性分析及参数优化的理论基础、研究框架、技术手段和应用研究成果。主要内容包括两个部分,第一部分重点描述了水文模型参数不确定性量化研究理论基础及技术方法,提出了基于代理模型技术的不确定性量化研究框架;第二部分主要以淮河流域为例,探讨了分布式时变增益模型和新安江模型的参数不确定性问题,详细介绍了基于代理模型技术方法的应用情况,系统总结了不确定性量化平台软件 PSUADE 的主要功能,展望了未来参数不确定性研究方向。本书提出的基于代理模型技术的不确定性量化研究方法及应用,为快速有效识别和估计参数提供了技术支持,对实现复杂水动力模型系统参数不确定性研究提供了参考。

本书可作为高等学校和科研院所,水利工程、环境工程、生态学、地理学、气象学等相关学科研究者及工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

流域水文模型参数不确定性量化理论方法与应用 /  
宋晓猛等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2014. 1  
ISBN 978-7-5170-1361-7

I. ①流… II. ①宋… III. ①水文—流域模型—参数—研究 IV. ①P331.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第261488号

书 名	流域水文模型参数不确定性量化理论方法与应用
作 者	宋晓猛 占车生 夏军 张永勇 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)
经 售	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
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 16.75印张 319千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	52.00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

# 序

随着水文及相关学科的理论发展和技术进步，水文模型不断地发展和完善，已由最初的单一水文过程模拟（如 Sherman 单位线理论，Horton 下渗理论）发展到后来的水文循环系统模拟（如概念性水文模型），再到目前的水文过程、生态环境以及大气—陆面过程的集成系统模拟（如水量水质耦合模型系统，陆气耦合模型系统等），模拟的要素和过程越来越多。为了解决降雨、蒸发等要素和产流机制的空间分布不均匀性对流域水文模拟精度的影响，又由原来的集总式模型逐步发展到半分布式水文模型和分布式水文模型。

分布式水文模型结构较集总式概念性水文模型复杂，分布式水文模型的不确定性问题研究是一个复杂的科学问题，也是非常棘手的难题。限于目前的技术水平和资料（资料的分辨率和本身精度），与概念性水文模型相比，分布式水文模型尚未能充分展现其应有的优势，在实际工作中应用还受到种种限制。但是，必须指出，分布式水文模型能较好地模拟水文水资源要素和下垫面条件在空间分布上的变化，能更好地反映陆面水文过程，所以分布式水文模型的研究也越来越多地受到重视和关注。

分布式水文模型的不确定性来源于模型结构的不确定性、输入资料的不确定性、参数优化的不确定性以及模型边界和初始条件的不确定性等。由于模型参数的非独立性，模型参数的不确定性和异参同效的问题十分突出。近几十年来，参数识别与估计方法由最初的人工经验率定方法到数学自动优化算法，再到现在的自动优化和专家知识相结合的优化的方法，其理论和方法都有了较大的发展和完善，但模型参数的不确定性问题仍是水文模拟中一个重要的问题。针对水文系统模型不确定性的科学性和复杂性，认识水循环过程和不同时空尺度的水文特征规律，建立一套系统化量化水文模型不确定

性问题的研究体系和方案是当前分布式水文模型发展的重要方向和科学研究前沿。

本书作者近年来一直从事于分布式水文模型及不确定性量化方面研究，特别在参数不确定性量化分析方面取得了一些具有创新的研究成果，本书为这些研究成果的系统总结。作者针对目前参数不确定性研究体系中的敏感性分析，不确定性分析及参数优化等问题开展系统讨论和研究，提出了一种基于代理模型技术的不确定性量化新方案。以淮河流域为研究对象，构建了集水库调度和流域取用水等模块为一体的淮河流域分布式水文模型，系统地评估了模型参数的敏感性和不确定性，定量分析了模型参数对模拟结果的不确定性影响及模型的不确定性预测区间，耦合代理模型技术明显改善了模型评估过程中的计算效率，降低了模型计算消耗成本。

本书的出版将推动流域水文模型参数不确定分析方面的研究，对复杂流域分布式水文模型的研究也将提供较好的借鉴和参考价值。

是为序

南京水利科学研究院院长  
中国工程院

院士



蛇年春节于金陵

# 前 言



水是人类赖以生存的自然资源，在当今经济快速发展，人口不断膨胀的时代，稳定而可持续水资源供给是社会和谐发展的重要基础。流域水文模拟建模是科学家认识和管理水资源的重要技术手段。水文循环贯穿了整个陆地表层系统，因而水文模拟建模也是环境科学、生态科学及部分地球科学研究的重要组成部分。在过去的十几年中，水文模拟建模的研究在我国正在兴起，融汇在地球科学、水利科学和环境科学的探索中。然而水文模拟建模过程中面临着许多科学问题还没有很好解决，如几乎所有的水文模型都含有一些不能直接观测确定的参数，如何确定这些参数成为水文模拟建模过程中一个非常重要因素。可以说参数估计是联系水文模型与流域水文过程模拟的纽带，且水文模型参数不确定性估计是模型发展和应用的一个重要环节，开展水文模型参数不确定性研究具有重要的理论和应用价值。其可以有效识别关键参数，减少模型率定的不确定性，提高模型性能和优化效率，为模型推广应用提供基础。然而如何快速有效地定量评估参数对模拟结果的不确定性影响已成为分布式水文模型不确定性研究的主要问题。因此，本书选择分布式水文模型参数不确定性量化作为主要研究内容，试图提出一种新的解决思路，建立一套高效的不确定性量化研究方案，综合评估分布式水文模型参数的不确定性问题，为流域水文模拟的广泛应用和推广提供技术支持。

从20世纪中叶以来，对于模型参数的不确定性问题一直成为各领域研究的一个重要问题，近年来，流域水循环模型参数的不确定性问题受到国内外水文、水资源、环境科学、大气科学和地球科学及相关领域学者的广泛重视，特别是分布式水文模型、陆面水循环过程模型及大尺度陆气耦合模型系统参数的不确定性问题研究不断



深入和发展，为模型构建及应用提供了科技支撑和技术支持。对于参数的不确定性研究，最初只是在于寻求获得模型的最优参数值，使得模型达到较满意的结果，后来发现模型参数的最优参数组合并非唯一的，往往存在很多组合方式，继而开始探索水文模型参数的异参同效现象的影响，评估参数对模型模拟结果的不确定性影响，随着模型复杂程度的增加，参数维数的增加，导致水文模型参数不确定性分析的难度进一步扩大，随后敏感性分析方法被引进到模型参数的不确定性研究中来，用于评估模型参数对模拟结果的贡献程度，进而可通过舍弃不敏感参数，减少参数维数来更好实现和解决参数不确定性分析问题。过去的几十年间，诸多科学家提出了很多不同的研究方法和理论，开发了许多应用程序或工具，为模型参数的不确定性量化研究作出了巨大贡献，如目前广泛应用于不确定性分析中的贝叶斯理论方法，用于敏感性分析的方差分解方法，用于参数优化的启发式智能搜索算法等。这些理论的发展为水文模型参数不确定性量化研究提供了巨大的支持，也在水文模型中得到广泛应用。但这些传统的理论方法仍面临着计算消耗过大和应用不便等瓶颈，即使计算机技术的快速发展，仍不能避免上述问题的影响，因此，迫切地需要更多的新理论和新技术来突破现有的技术瓶颈，有效地解决上述难题。

在国家自然科学基金青年-面上连续资助项目“一种高效的流域蒸散过程模拟方法及其不确定性研究”（41271003）、中国科学院“一三五”战略科技计划重点项目（2012ZD003）、国家水体污染控制与治理科技重大专项河流主题“淮河流域水质改善与水生态修复技术与集成示范项目”之第六课题“淮河流域水质-水量-水生态联合调度关键技术研究”（2014ZX07204-006）、国家水体污染控制与治理科技重大专项河流主题“淮河流域水污染治理技术与集成示范项目”之第六课题“淮河-沙颍河水质水量联合调度改善水质关键技术研究”（2009ZX07210-006）、国家重点基础研究发展计划项目（973计划）“气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策”之第三课题“陆地水文-区域气候

耦合模拟及水循环变化机理分析”（2010CB428403）和全球变化研究国家重大科学研究计划项目“气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水资源安全评估”之第三课题“气候变化对区域水资源影响评估及不确定性分析”（2010CB951103）等联合资助下，我们开展了分布式水文模型参数不确定性量化研究的探索，针对上述问题尝试引进一些新技术和新方法，试图改进原有技术方法存在的不足，本书是对已取得的阶段成果的总结。

本书共分为上下两篇，上篇为理论方法篇，重点阐释了参数不确定性量化研究方法的主要理论基础，共有6章。第1章为绪论，主要讨论本研究的主要背景及研究意义，论述了变化环境下面临的主要水科学问题，阐述了水文模型的发展历程及应用前景与不足，重点评述了水文模型不确定性研究进展，阐释了全书的研究目标与主要内容；第2章为分布式水文模型理论与方法，详细概括了分布式水文模型构建流程，总结了非线性时变增益模型到分布式时变增益模型的发展历程，重点讨论了分布式时变增益水文模型的基本理论和产汇流模式，简单介绍了分布式时变增益水文模型的应用情况及模型发展；第3章为代理模型技术理论与方法，主要论述了构建代理模型的关键技术方法，探讨了常用的试验设计方法和近似模拟技术手段，同时介绍了代理模型的验证方法；第4章为参数识别与敏感性分析方法，针对参数识别的问题，提出了参数敏感性分析的主要意义，简要概述了敏感性分析方法的分类，评述了水文模型中常用的敏感性分析方法和技术的研究进展，阐释了多种全局性敏感性分析方法的理论和计算过程，重点叙述了代理模型技术在敏感性分析方面的理论基础和应用前景，提出了定性筛选和定量评估的综合敏感性分析方案；第5章为参数不确定性分析方法，阐释了当前参数不确定性研究的重要意义，详细介绍了几种常用不确定性分析方法，提出了一种结合代理模型技术和贝叶斯理论的不确定性分析方法，探讨了方法的主要原理和分析过程；第6章为参数优化分析方法，探索分析了参数优化过程存在的主要问题及特点，详述了参数优化方法理论基础与应用技术，总结了各种优化方法的优缺点，



利用代理模型技术和启发式智能搜索算法集成一种新的优化思路。下篇为实践应用篇，共有5章，第7章为淮河流域分布式水文模拟系统，简单介绍了淮河流域的基本概况，叙述了淮河流域分布式时变增益模型的建模思路和主要手段，阐述了增加考虑人类活动影响模块的淮河流域分布式时变增益水文模型结构及原理，同时应用该模型系统开展淮河流域部分站点的水量过程模拟；第8章分布式时变增益模型参数不确定性研究，结合上篇讨论的主要分析方法，应用代理模型技术和传统的不确定性量化研究技术手段，探讨了方法的应用结果，详述了分布式时变增益模型参数的不确定性结果；第9章新安江模型参数不确定性研究，简单介绍了新安江模型基本原理以及新安江模型在淮河流域的基本应用情况，量化了日尺度和小时尺度新安江模型的参数敏感性及其不确定性；第10章模型不确定性量化系统工具，详细总结了PSUADE工具的基本功能，主要命令以及研究进展；第11章为结论与展望，总结了本书的主要研究内容，展望未来分布式水文模型及模型参数不确定性量化研究的主要方向。

全书章节安排由南京水利科学研究院水文水资源研究所宋晓猛设计并统稿，由其和中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室占车生副研究员和张永勇副研究员以及武汉大学水利水电学院夏军教授共同执笔撰写，其中宋晓猛参与了全部章节撰写，占车生副研究员参与了第3章至第6章和第8章的部分撰写，夏军教授和张永勇副研究员参与了第2章和第7章部分撰写工作，最终由宋晓猛和占车生完成了全部书稿审定工作。

在研究工作中，得到了淮河水利委员会、淮河流域水资源保护局、淮河水利委员会水文局、中国科学院地理科学与资源研究所、中国矿业大学资源与地球科学学院、南京水利科学研究院、水利部应对气候变化等单位领导、专家和工作人员的大力支持，感谢淮河流域水资源保护局和淮河水利委员会水文局提供的有关资料，特别感谢作者的硕士导师中国矿业大学资源与地球科学学院孔凡哲教授和博士导师南京水利科学研究院院长张建云院士及南京水利科学研究院水文水资源研究所所长刘九夫教授级高级工程师的指导和

帮助，感谢 PSUADE 软件的开发者美国 Lawrence Livermore National Laboratory 的 Charles Tong 教授和 Yunwei Sun 教授，无偿提供他们的最新成果 PSUADE 工具且在软件的使用上提供技术指导，感谢北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院段青云教授和叶爱中博士，中国水利水电科学研究院水资源研究所陈向东博士，中国科学院遥感应用研究所窦有俊博士，中国矿业大学资源与地球科学学院韩继伟硕士和武汉大学水利水电学院曾思栋博士生在研究过程中给予的帮助。另外也感谢本书研究所引用文献的各位作者，他们的工作是本文工作的基础，也为本书研究提供了诸多支持。感谢中国水利水电出版社宋晓编辑在本书出版过程中所做的编辑和审定工作。

由于水文模型不确定性研究的复杂性，同时涉及水文学、气象学、数学、统计学和计算机科学等多学科知识，理论研究与实践仍处于探索阶段，再加上作者水平有限，书中的一些科学研究结论可能会存在一些不足之处或与生产实际不一致，今后还需要进一步加强理论方法研究与实践应用研究，如有不妥之处，诚请各位同行专家和广大读者批评指正。



2013 年 5 月

于南京

# 目 录

序  
前言

## 上篇 理论方法篇

<b>第 1 章 绪论</b> .....	3
1.1 研究背景与意义 .....	3
1.2 变化环境下的水科学问题 .....	8
1.3 水文模型发展与应用前景 .....	10
1.4 水文模型的不确定性来源 .....	13
1.5 模型参数不确定性量化研究进展 .....	16
1.6 模型结构与数据的不确定性研究进展 .....	20
1.7 水文模型不确定性研究展望 .....	22
1.8 小结 .....	24
参考文献 .....	24
<b>第 2 章 分布式水文模型理论与方法</b> .....	33
2.1 分布式水文模型构建流程 .....	33
2.2 分布式时变增益模型 .....	37
2.3 小结 .....	53
参考文献 .....	54
<b>第 3 章 代理模型技术理论与方法</b> .....	57
3.1 概述 .....	57
3.2 试验设计方法 .....	58
3.3 近似模拟技术 .....	65
3.4 模型验证方法 .....	73
3.5 小结 .....	74
参考文献 .....	75

<b>第 4 章 参数识别与敏感性分析方法</b> .....	77
4.1 概述 .....	77
4.2 敏感性分析方法分类 .....	79
4.3 常用敏感性分析方法 .....	81
4.4 基于代理模拟技术的分析方法 .....	91
4.5 定性筛选和定量评价耦合方法 .....	95
4.6 小结 .....	96
参考文献 .....	97
<b>第 5 章 参数不确定性分析方法</b> .....	103
5.1 概述 .....	103
5.2 水文模型常用不确定性分析方法 .....	104
5.3 基于代理模型和 MCMC 的分析方法 .....	110
5.4 小结 .....	116
参考文献 .....	117
<b>第 6 章 参数优化分析方法</b> .....	122
6.1 概述 .....	122
6.2 水文模型常用优化方法 .....	124
6.3 集成 RSM 和 SCE-UA 的优化方法 .....	131
6.4 小结 .....	133
参考文献 .....	133

## 下篇 实践应用篇

<b>第 7 章 淮河流域分布式水文模拟系统</b> .....	139
7.1 淮河流域概况 .....	139
7.2 模型研究数据 .....	142
7.3 模型改进与淮河水文模型构建 .....	144
7.4 结果分析 .....	149
7.5 小结 .....	153
参考文献 .....	153
<b>第 8 章 分布式时变增益模型参数不确定性研究</b> .....	154
8.1 概述 .....	154
8.2 敏感性分析 .....	155
8.3 参数不确定性分析 .....	170
8.4 参数优化 .....	175

8.5 小结 .....	180
参考文献 .....	180
<b>第 9 章 新安江模型参数不确定性研究 .....</b>	<b>182</b>
9.1 新安江模型概述 .....	182
9.2 新安江模型在淮河流域的应用情况 .....	183
9.3 大坡岭流域的应用实例 .....	186
9.4 参数不确定性研究 .....	194
9.5 小结 .....	218
参考文献 .....	219
<b>第 10 章 模型不确定性量化系统工具 .....</b>	<b>221</b>
10.1 概述 .....	221
10.2 PSUADE 工具 .....	222
10.3 PSUADE 主要命令 .....	228
10.4 PSUADE 应用研究进展 .....	244
10.5 小结 .....	245
参考文献 .....	245
<b>第 11 章 结论与展望 .....</b>	<b>249</b>
11.1 主要结论 .....	249
11.2 未来发展趋势 .....	251

## 上篇 理论方法篇

流域水文模型是研究流域水问题的重要工具之一，然而现有的水文模型预报精度还无法满足日益增长的社会预期，水文模型模拟和预报的不确定性问题使得模型结果的可靠性和实用价值受到限制。因此，水文模型不确定性是全球水文学家在水文预报和预测实践中面临的一个突出问题，也是水文模型研究发展的瓶颈问题，其理论和方法尚在不断探索之中。本篇主要阐释了流域分布式水文模型不确定性研究的主要理论基础和技术方法，总结了流域水文模型参数不确定性研究中的诸多技术手段及研究进展，探索了一种新的参数不确定性量化研究新框架，具体包括绪论、分布式水文模型理论与方法、代理模型技术理论与方法、参数识别与敏感性分析方法、参数不确定性分析方法及参数优化分析方法共 6 章。





# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景与意义

### 1.1.1 研究背景

水不仅是生命之源,更是支撑社会经济系统发展不可替代的基础资源。但由于全球变化和人类活动的影响,地球上的水循环在发生变化,许多地区正发生严重的水危机,如洪水灾害,干旱和江河水体污染等。水问题已成为制约国家与区域可持续发展的关键。因此,水文科学研究已成为国家地球科学发展中的一个重要方面(夏军,2002)。水文学是研究地球上各种水的发生、循环、分布、水的化学和物理性质,水对环境的作用以及水与生命体的关系等的科学(Maidment,1993)。水循环过程(如图1-1所示)是联系地球系统“地圈—生物圈—大气圈”的纽带,是全球变化三大主题碳循环、水资源和食物纤维中的核心问题之一<sup>①</sup>,它受自然变化和人类活动的影响,决定水资源形成与演变的规律(夏军,2002)。长期以来人们一直在努力实现水循环过程的定量化研究,然而由于水文现象的复杂性,目前还不可能用严格的物理定理来描述(王纲胜,2005)。因此,通过建立水文模型近似地进行水循环过程的量化模拟成为水文科学研究的一种手段和方法。

流域作为水系统研究的基本单元,由于人类活动和气候变化的影响,流域水系统的三大过程交互作用,具有多要素、多过程和多尺度联系与反馈的特点。面对变化环境下复杂的水科学问题,需要通过水系统的三大过程(物理过程、生物与生物地球化学过程和人文过程,如图1-2所示),机理研究与多个环节的综合调控,以维系流域健康水循环,支撑社会经济可持续发展(夏军,2012)。因此国内外对流域水循环模拟与水系统调控研究给予了高度重视,近年来也得到快速的发展。流域水文模型是为了解释流域水循环的过程及其演化

---

<sup>①</sup> 三大主题是由国际地圈生物圈计划(IGBP)提出的,IGBP的前沿问题更多关注与人类生存发展密切联系的基础科学和需求问题,即“碳循环、水循环和食物纤维”问题,其核心项目之一“水文循环的生物圈方面(IGBP-BAHC)”就是专门关注水与生态科学问题,受到国际地球学科、水文学科、生态学科广泛的关注和参与。

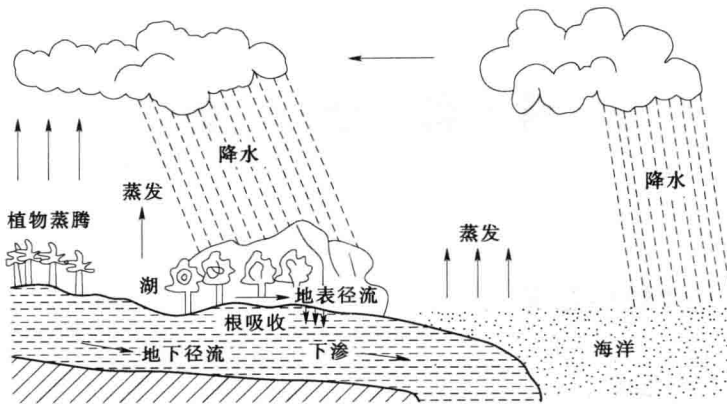


图 1-1 水循环过程示意图

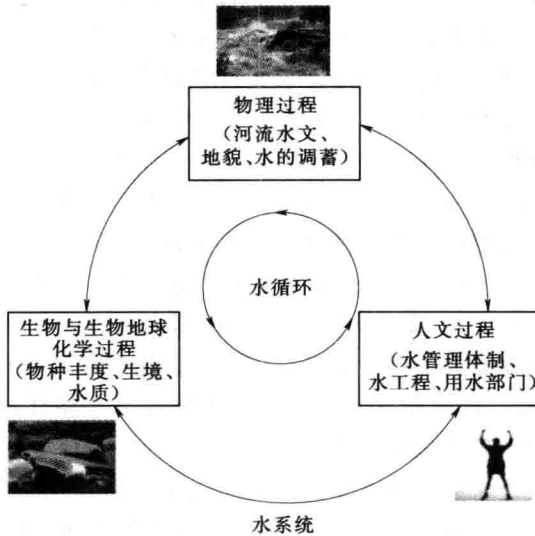


图 1-2 以水循环为纽带联系的三大过程与水系统示意 (夏军, 2012)

规律, 利用相对简单的数学公式或方程来概化和综合流域内复杂的和时空分布的水循环要素等的变化过程 (Vrugt 等, 2005; 宋晓猛、孔凡哲, 2010; 宋晓猛等, 2011b; Song 等, 2012a), 也就是说是对真实水文过程的简化, 既可以是实体比尺模型 (或物理模型), 也可以是数学模型 (Abbott、Refsgaard, 1996)。在计算机技术发展以前, 水文学者多采用物理模型来了解水文过程, 如 1856 年 Darcy 所做的砂柱实验研究水流运动的问题, 但这些研究的巨大耗费以及处理复杂系统模拟的局限性导致很难推广应用 (王纲胜, 2005)。后来随着科学技术的发展, 特别是计算机技术, 使得数学模型的发展最快、应用最