



Studies on Parameter Estimation Methods
for Hydrological Model and
Associated Uncertainties

水文模型参数估计方法及 参数估计不确定性研究

王书功 著



黄河水利出版社

水文模型参数估计方法及参数估计 不确定性研究

王书功 著

黄河水利出版社
· 郑州 ·

内 容 提 要

本书主要内容包括以下几个方面:依据水文模型参数估计研究与应用中的基本假设,将水文模型参数估计问题划分为确定性参数估计和概率估计两类;系统介绍了遗传算法和模拟退火算法之类经典启发式优化算法以及混合和策略优化算法 SCE-UA 算法在确定性水文模型参数优化中的应用,并以 SCP-SO 算法为例,给出了针对水文模型参数优化问题进一步发展优化算法的一般思路;详细介绍了基于贝叶斯统计理论进行水文模型参数概率估计的方法,如 GLUE 算法和马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)算法;从异参同效、参数间相互作用、目标函数对于参数的敏感性、模型误差以及人为因素等角度,分析了两类水文模型参数估计中存在的 uncertainty。

图书在版编目(CIP)数据

水文模型参数估计方法及参数估计不确定性研究/王书功
著. —郑州:黄河水利出版社,2010.9

ISBN 978 - 7 - 80734 - 835 - 1

I. ①水… II. ①王… III. ①水文 - 流域模型 - 参数
估计 - 研究 IV. ①P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 106367 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11.50

字数:265 千字

印数:1—1 000

版次:2010 年 9 月第 1 版

印次:2010 年 9 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

序

数字水文模型已成为水文、水资源管理工作者的必不可少的工具。从短期洪水预报到中长期水库来流量预报,从水利工程设计到城市排水系统规划,从水资源管理规划到研究气候变化对水文水资源的影响,都需要用到水文模型,然而水文模型所产生的信息一直受困于各类不确定性因素,给模型使用者对模拟信息的理解带来困难,也使模型的广泛应用受到一定限制,这些不确定性因素主要来自于气象观测和预报、初始和边界条件、模型结构和模型参数,以及所采用的水文观测资料等方面。有大量的文献和书籍介绍了许多方法来处理气象观测和预报方面的不确定性,例如 Daniel S. Wilks 的《大气科学的统计方法》系统地介绍了各类气象资料和预报的统计处理方法;在处理由初始条件和观测资料所带来的不确定性问题方面,有数本经典书籍阐述数理理论成熟的资料同化方法,例如 Eugenia Kalnay 的《大气模拟、资料同化和可预测性》和 Geir Evensen 的《资料同化:集合卡尔曼滤波》。

自从 20 世纪 60 年代 Norman Crawford 第一个提出斯坦福数字水文模型以来,如何估计水文模型参数、降低和量化由水文模型参数引起的不确定性的相关方法一直被水文模型研究者 and 应用者所重视,数字水文模型实质上就是一系列的数学方程,方程中的系数或指数就是我们所说的模型参数。一般说来,水文模型的参数是不可观测的,其参数值只是间接地跟模型应用区域的陆地和地表特征性质相关,即使是所谓的分布式物理机制的水文模型,它们的参数在应用空间范围内也是不可观测的,所以模型参数往往需要通过模型率定的方式来获取。所谓模型率定,就是指通过调试模型参数使得模型输出与相应观测资料相吻合,模型率定方法也叫做模型参数估计方法。由于数学方程只是对自然界发生过程的一个近似,加上前面所述各类不确定性因素,水文模型参数的估计值本身具有不确定性。

尽管对模型参数估计方法的研究已有 40~50 年的历史,有不计其数的文章描述各种各样的模型率定方法和不确定性分析方法,但是到目前为止还没有一本書能够比较连贯且系统地描述各类方法,至少在英文和中文书籍中我还没有发现这样的书。我和我的同事编写的《流域模型率定》于 2003 年出版,尽管我们原来的意图是想全面和系统地把与流域水文模型参数率定和不确定性分析的理论方法相关的文章汇集起来,但是由于书中文章作者的组合是松散的,作者之间的协作也少,最终书的连贯性和系统性还是牵强。王书功博士的这本书情况有所不同,这本书完全出于王博士一人之手,它有一个比较清晰的思路,也具有比较好的连贯性和系统性,所以我认为其是一本值得水文水资源工作者使用的参考书。

该书首先对水文模型建模和参数估计的过程进行概述,然后对水文模型参数的各类率定方法和不确定性分析方法进行逐步介绍,早期和传统的水文模型参数估计方法着重于寻找一组唯一的最优参数解,以使得模拟结果与相应观测资料相吻合的某个测度为最

优, Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) 方法属于这一类。研究者后来意识到参数的不确定性, 发现唯一最优参数解在现实世界中是不存在的, 近年来一个普遍的做法是把参数看做概率分布, 随之而生的是一系列数学方法, 如 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 和 Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) 等类的方法, 这本书把流域水文模型领域流行的单值最优解和概率解作了较为详细的介绍。

该书所介绍的方法的应用范围主要是板块式水文模型, 即流域或模型应用范围是由一个或几个有限的板块组成, 在模型板块内假设模型的参数是均匀的, 因此书中的方法很难直接应用到分布式水文模型上去, 如何估计分布式水文模型的参数, 尤其是如何采用时空上具有高密度的遥感观测资料来帮助率定水文模型参数仍然是水文模拟界的一个大难题。另外, 该书介绍的方法也难以直接应用到计算量特别大的模型, 随着计算机技术的不断提高, 我们现在有由几千甚至几万个中央处理器 (CPU) 组成的超级计算机, 这些计算机可以进行每秒上亿万次的计算, 即使是这样, 有一些模型像高分辨率分布式水文模型或地下水模型类模型每次运算可能需要几小时, 甚至几天, 而书中介绍的方法往往需要超过几千次模型运算才能找到合适的参数最优值或概率分布, 如何率定如此昂贵的大复杂动力系统模型也是地学界的一个巨大挑战, 现在有学者在探索解决大复杂动力系统模型的参数率定问题的方法, 我希望这本书的读者在学习和掌握书中介绍的方法时, 要把它们应用于你们所感兴趣的问题, 同时我也希望读者能够深入研究水文模型参数估计领域里的难题, 开发出新的理论和数理方法, 从而准确和有效地降低模型参数带来的不确定性, 达到提高水文模型的模拟和预报能力的目标。

段青云

北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院

2010年9月

自序

本书总结了我在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所学习期间的成果。水文模型参数标定是水文过程模拟必不可少的前期环节。对于土壤植被观测资料欠缺的流域,基于优化算法和统计推理的参数估计方法研究更具实践意义。水文模型参数估计中的不确定性是水文模拟结果不确定性的重要来源。在李新研究员的悉心指导下,我在博士研究生学习期间对水文模型参数估计方法及参数估计的不确定性进行了较为系统的研究。近年来,水文过程模拟在国内流域科学研究中方兴未艾。考虑到参数估计及其不确定性研究在流域水文模拟中的应用价值,尽管作者才疏学浅,水平有限,所做研究也尚未成熟,但仍愿通过本书交流我的研究心得,以盼得到指正,也望为本领域的初学者提供易于着力的出发点。

水文模型参数估计与参数估计中的不确定性研究并不是我博士研究生学习期间的第一个研究题目。在北京中国科学院研究生院完成了一年的基础课程学习之后,我于2001年7月回到位于兰州的中国科学院寒区旱区环境与工程研究所。我的第一个研究题目是应用美国华盛顿大学(西雅图)土木与环境工程系开发的 DHSVM^① 模型模拟黑河流域的水文过程。DHSVM 模型非常详细地考虑了土壤和植被在流域水文过程中的作用。因此,它的运行需要确定大量的土壤和植被参数。为了开展研究,我用了一年多的时间来收集流域内土壤和植被数据。黑河流域覆盖面积很大,除中游区域是人类活动频繁的绿洲外,上游祁连山区和下游荒漠/沙漠区人迹罕至,土壤和植被调查数据样点很少,远远不能满足 DHSVM 模型参数集的需要。尽管黑河中游地区存在一定数量的土壤植被调查数据,但是有限的样点数据仍然不足以描述区域内土壤和植被参数的空间分布格局。由于土壤和植被的采样数据是在既定的时间和空间尺度上取得的,数学插值算法无法直接算出满足水文模拟尺度特征参数集。

参数制备的瓶颈使得我的第一个研究题目迟迟无法完成。研究工作的停滞不前让我不得不重新考虑解决眼前问题的技术方案。正当在困境中求索出路之时,我有幸得到了李新老师的指导。李老师建议我首先应用启发式优化算法或者 Bayes 统计方法进行水文模型参数优化估计,然后进行流域的水文过程模拟。在李老师的帮助下,我的研究题目转为应用启发式优化算法和 Bayes 统计理论进行水文模型参数估计。我对这个新的题目非常感兴趣。它将水文研究与优化和统计理论在计算机平台上结合起来,随后的研究过程给我带来了许多乐趣。作为经典的启发式优化算法,模拟退火算法和遗传算法因其在优化计算领域的成功,引起了许多水文模型参数估计研究者的注意。由于水文模型本身结构的复杂性,在水文模型参数优化估计研究中,很难构造具有解析表达式的目标函数,因此无法应用那些依靠目标函数梯度信息的优化方法。启发式算法的优化搜索不需要对目

① <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/indexs.html>

标函数进行求导,所以它们非常适用于求解水文模型参数优化估计问题。近些年来,启发式算法以及以启发式算法为基础发展起来的优化算法也越来越多地出现在与水文模型参数优化相关的文献中。然而,这些文献大多针对个案进行讨论,或着重讨论具体算法以及具体模型。考虑到目前相关文献对基于启发式优化算法进行的水文模型参数优化研究缺乏系统性描述,我在本书写作时尽可能系统地描述。

在我的研究中,有相当一部分是从模仿前人工作开始的。段青云博士发展的 SCE-UA 在水文模型参数优化研究领域享有盛名。受 SCE-UA 算法的启发,我将一个粒子群算法与洗牌算法组合在一起,发展了 SCPSO 优化算法。与模拟退火算法、遗传算法以及 SCE-UA 算法相比,SCPSO 优化算法在水文模型参数优化求解中表现出更高的效率和更好的性能。然而,由于 SCPSO 算法属于启发式优化算法,它仍然无法避免启发式优化算法在时间效率上的不足。为了提高计算速度,我应用 MPI^① 开发了一个并行的 SCPSO 算法。如此一来,算法的速度可以得到显著提高。

2004 年在美国加州大学伯克利分校访问学习期间,我有机会接触并系统地学习了 Bayes 统计中 Monte Carlo Markov Chain (MCMC) 的理论。Bayes 统计理论为我们提供了不同于优化理论的思考方式。基于 Bayes 理论,水文模型参数估计不是搜索一组最优的模型参数,而是通过先验的知识与收集到的数据,推演模型参数的后验概率分布。由于水文模型结构复杂,我们通常无法推导解析的参数后验概率分布表达。MCMC 方法通过迭代,产生有限数量的参数样本,而这些样本的分布可以作为参数总体后验概率分布的有效近似。MCMC 方法理论完备,但是计算量非常大且耗时。相对而言,Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)方法假设较为宽松,计算需求也较 MCMC 小,可以作为基于 Bayes 统计理论进行水文模型参数估计的预研究方法。

针对基于优化方法与 Bayes 统计方法估计水文模型参数之数学假设的不同,我将水文模型参数估计问题分为两类,即第一类参数估计与第二类参数估计。然而,不管应用哪一类方法,所估计到的参数都具有一定的不确定性。参数的敏感性、参数间的相互作用、参数的优劣判据(目标函数)的选择、似然函数以及后验概率的数学表达方式,都是水文模型参数估计结果不确定性的可能来源。研究水文模型参数估计中的不确定性有助于我们分析水文模拟的不确定性。在本书的第 3 章与第 5 章,我尝试着对两类参数估计方法中的不确定性进行了描述和分析。但是,不确定性是一个比较宽泛的概念,对水文模型参数估计的不确定性研究并不仅限于本书所述部分。

水文模型参数估计是一个蓬勃发展的学科方向。新计算技术、新优化推理算法、新水文模型以及新数据为这一方向提供持续的发展契机。利用新近发展的技术、理论、模型与数据提高参数估计的效率,并降低参数估计的不确定性,这将会在流域水文模拟研究中长期保有一席之地。我希望本书能够抛砖引玉,为这一领域的研究略尽绵薄之力。

最后,我要向本书所涉研究中给予我指导与帮助的老师和朋友表达谢意。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的康尔泗老师不但引导我进入水文科学的研究之中,还将我介绍到李新老师门下,使我有机会学习更多水文科学的研究手段。李老师对我的指导

① <http://www.mpi-forum.org>.

不仅仅限于专业知识,还有很多为学为人的道理。在博士学习的几年里,不但可以向老师学习优化估计方法与计算技术,还可以和老师谈论历史,探讨科学哲学。甘肃省水文水资源勘测局的胡兴林高级工程师不遗余力地将他丰富的水文学理论与实践经验传授给我,让我学到了大量课本之外的水文知识。此外,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的田伟博士多次帮助我校对书稿,并重绘了部分图表,特此感谢。

本书的出版受到中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(课题号:KZCX2-XB2-09)和“国家自然科学基金特殊学科冰川学冻土学人才培养基金”(批准号:11J0930003)的资助。

王书功
美国·匹兹堡
2009年9月

目 录

序	段青云
自 序	王书功
前 言	
第 1 章 水文模型与参数估计	(1)
1.1 国内外研究进展	(2)
1.2 水文建模的流程	(3)
1.3 水文模型参数估计	(12)
1.4 本章小结	(17)
第 2 章 第一类参数估计方法	(18)
2.1 参数估计的数学问题	(18)
2.2 复杂水文模型参数优化问题的求解方法	(30)
2.3 优化算法的发展:SCPSO 算法	(84)
2.4 本章小结	(102)
第 3 章 第一类参数估计中的不确定性	(104)
3.1 源于模型结构的不确定性	(105)
3.2 源于观测数据的不确定性	(118)
3.3 本章小结	(122)
第 4 章 第二类参数估计方法	(124)
4.1 理论背景	(124)
4.2 基于均匀采样技术的参数估计方法	(127)
4.3 基于重要性采样技术的参数估计方法	(130)
4.4 本章小结	(143)
第 5 章 第二类参数估计中的不确定性	(145)
5.1 人为的不确定性	(145)
5.2 误差模型导致的不确定性	(148)
5.3 异参同效现象导致的不确定性	(151)
5.4 本章小结	(154)
第 6 章 结论与展望	(155)
6.1 主要结论	(155)
6.2 存在的问题	(155)
6.3 研究展望	(156)
附 录	(157)
附录 1 试验流域简介	(157)

附录 2	新安江模型简介	(157)
附录 3	VIC-3L 模型简介	(159)
附录 4	随书代码	(160)
参考文献		(164)

第 1 章 水文模型与参数估计

水是人类赖以生存的自然资源。在当今经济快速发展、人口不断增加的时代,稳定而可持续的水资源供给是社会和谐发展的重要基础。流域的模拟建模是科学家认识和管理水资源的重要手段(韦斯特维尔特,2004)。水文循环贯穿了整个陆地表层系统,因而水文学模拟建模也是环境科学、生态科学以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兴起,融汇在地球科学、水利科学和环境科学的探索中。

目前,我国的水文模拟建模研究以引进和消化国外的模型为特色。在引进的模型中,应用较多的模型有 TOPMODEL(Beven 等,1977;Beven 等,1995;Beven,1997)、VIC 模型(Abdulla 等,1996;Liang 等,1994;Liang 等,1996a;Liang 等,1996b;Liang 等,1999;Liang 等,2001;Liang 等,2003b;Guo 等,2004)、SHE 模型(DHI,1998;Vazquez 等,2002)和 DHSVM 模型(Wigmosta 等,1994;Whitaker 等,2003)等。这些模型都是在水文数据资料相对丰富的西欧和北美地区开发的,其应用也是面向水文数据资料比较丰富的地区。相对西欧和北美,我国的水文数据相对缺乏,特别是在地广人稀的西部地区,一些在国外可以通过观测数据确定的模型参数在国内却因没有相应的基础数据而无法直接确定,不得不借助参数估计的方法间接地确定。

几乎所有水文模型都含有一些不能直接通过观测试验确定的参数,这些参数与流域的特征有关,但是却很难与流域特征建立直接关系。在应用水文模型模拟流域水文过程之前,必须先要确定这些参数的数值。水文模型的参数估计在流域现有数据的基础上,给出满足模拟要求的模型参数数值。因而可以说,参数估计是连接水文模型与流域水文过程模拟的重要环节。

水文模型参数估计将水文学理论与应用实践联系起来。为了深入探讨水文模型参数估计的方法以及参数估计中存在的 uncertainty,有必要对流域水文建模的一般过程作简要介绍。水文建模过程是由认知模型、概念模型、过程模型、参数标定以及模型验证等 5 个环节构成的一个螺旋式上升的过程(Beven,2001)。本书将着重研究水文模型的参数标定。

参数标定是指通过手动或者计算机来调整水文模型参数,以期获得最好的拟合效果,从而确定模型参数的过程。从数学上讲,水文模型的参数标定属于反问题的研究范畴(Sun,1994;McLaughlin 等,1996),通常称为参数估计。最优化理论和 Bayes 统计推断理论是常用的参数估计方法(Montanari 等,2004)。

自然系统本身就具有一定的随机性特征,水文循环的过程也不例外。无论用什么水文模型预报一条河流的流量,都必须承受一定的不确定性(Carpenter 等,2004)。对模型模拟不确定性进行分析,要求对模型参数进行概率估计(Carsel 等,1988)。

由以上原因可知,水文模型的参数估计在我国当前阶段的水文水资源研究中是必不可少的一个环节,有重要的理论与应用价值。因而,本书选择“水文模型参数估计方法”

作为主要研究内容。在进行水文模型参数估计的研究与实践中,数学方法和专家知识相辅相成。水文模型参数估计问题的特点、应用的数学方法以及专家判断都会给参数估计带来不确定性(Aronica 等,1998)。因此,除了研究参数估计的方法,本书还对不同类型的参数估计中存在的 uncertainty 进行了探讨。

本书主要论述了水文模型参数估计的数学理论以及问题的求解方法,并分析不同类型参数估计中存在的 uncertainty 问题。本书共分 6 章,其内容概要如下:

第 1 章介绍了水文建模的一般流程以及参数估计在水文建模中的作用,并根据水文模型参数估计的特点,对水文模型参数估计进行了类型划分。

第 2 章给出了在模型最优参数存在且唯一的假设下,水文模型参数估计的数学框架与问题的求解方法。本章给出了模拟退火算法、遗传算法、SCE-UA 算法的原理,系统而深入地讨论了这些算法在水文模型参数估计中的应用细节。此外,作者在本章中提出了一个面向水文模型参数估计的优化算法——SCPSO 算法,经过证明,这个算法比以上 3 个算法的性能与效率更佳。

第 3 章引入了 Monte Carlo 分析方法和局部敏感性分析方法,讨论了在模型最优参数存在且唯一的假设下,模型参数估计的 uncertainty 及其原因。

第 4 章给出了模型参数在服从某一联合概率分布的随机变量的假设下,基于 Bayes 统计的参数估计方法。本章详细地描述了基于 Bayes 统计的水文模型参数估计的数学理论,并给出了 GLUE 和 SCEM-UA 两种估计方法。

第 5 章讨论了模型参数在服从某一联合概率分布的随机变量的假设下,水文模型参数估计的 uncertainty。

第 6 章给出了本书的结论,指出了存在的问题,并对未来研究方向作了展望。

本书是作者对 2001 年 9 月到 2006 年 6 月从事水文科学研究的发现探索之旅的回顾和总结。书中所有的算法和数据处理程序,全部由作者独立实现。书中提出的 SCPSO 算法,为作者在前人工作的基础上发展的一个启发式优化算法。试验分析表明,SCPSO 算法在水文模型参数优化问题求解中具有出色的性能和效率。

1.1 国内外研究进展

国外对水文模型参数估计方法和参数估计 uncertainty 的研究起步比较早。从 20 世纪 70 年代到 90 年代末期,研究集中在以优化算法进行的参数自动估计上。研究成果多以某一种优化算法在水文模型参数估计中的应用为主,以水文学家针对水文模型参数估计提出优化算法为辅。相关文献中的成果多以个案给出,很少有系统的论述。Duan 等提出的 SCE-UA 算法是这一阶段里程碑式的成果,这个算法成为用于水文模型参数估计的经典算法(Duan 等,1992;Duan 等,1993;Duan 等,1994;Smith 等,2003)。在 2000 年之前,水文模型参数估计中的优化问题以单目标优化为主,2000 年之后,这类研究扩展到多目标优化,并且从水文模型的参数估计延伸到陆面过程模型的参数估计研究中(Gan 等,1996;Franks,1999;Gupta, 1999; Duan 等,2003;Duan,2003)。可以说,基于优化方法的参数估计方法在国外的研究正在走向成熟。

从 20 世纪 90 年代中期开始,基于 Bayes 统计的水文模型参数估计方法的文章开始在水文学顶级刊物(如 Journal of Geophysics Research、Water Resources Research、Journal of Hydrology 和 Advances in Water Resources)中出现,引起了越来越多水文学家的注意。这一阶段知名的研究成果包括 Beven 等提出的 GLUE 方法(Freer 等,1996;Romanowicz 等,1994;Romanowicz 等,1996;Zak 等,1997;Zak 等,1999)和 Sorooshian 与他的学生开发的 Markov 链 Monte Carlo 采样算法(Vrugt 等,2003a;Vrugt 等,2003b;Vrugt 等,2003c;Misirli 等,2003)。基于 Bayes 统计的参数估计方法方兴未艾,代表着现阶段水文模型参数估计的研究方向。

国际水文学会(IAHS)和 MOPEX(Model Parameter Estimation Experiment)都把 PUB(Prediction in Ungauged-Basin)作为未来水文学的研究方向,而 PUB 的核心为基于先验信息的水文模型参数估计,它是未来的水文模型参数估计研究方向(Sivapalan,2003;Young,2006;Gan 等,2006;Ao 等,2006;Oudin 等,2006;Huang 等,2006;Duan 等,2006;Shaake 等,2006)。

国内对水文模型参数估计方法与参数估计不确定性的研究虽然较国外起步晚,但是形成了一定的研究特色。夏军教授对系统水文模型参数辨识进行了深入的研究,提出了系统水文模型参数辨识的理论与方法(夏军,1982;夏军,1985;夏军,1987a;夏军,1987b;夏军,1988;夏军,2002)。相对系统水文模型、概念性水文模型和分布式水文模型的参数估计要更加复杂一些,分为手动/半手动参数标定(陈祖铭等,1994;程春田等,1995;胡凤彬等,1997)和自动参数标定。手动/半手动水文模型参数标定方法对专业知识有很高的要求,随着计算机科学的发展,已经逐渐被参数自动标定/估计方法所取代。新安江模型是国内发展的一个非常成功的且在湿润半湿润地区有着广泛应用的概念性水文模型,概念性水文模型参数自动标定/估计的研究多以这个模型为应用实例(吴瑞新,1996;张洪刚等,2002;张洪刚等,2004)。国内大多数概念性模型/分布式模型参数估计研究工作多以介绍国外研究成果、引进国外参数标定/估计方法为主(Hapuarachchi 等,2001;陆桂华,2004)。近几年来,水文模型参数估计方法已经成为一些博士/硕士论文的研究主题(杨小华,2002;栾承梅,2005)。其中,杨小华探讨了二进制编码遗传算法、格雷码编码遗传算法、简单的实数编码遗传算法、改进的模拟退火算法在水文模型参数估计中的应用;栾承梅给出了遗传算法和 SCE-UA 算法在新安江模型、萨克拉门托模型、TOPMODEL 参数估计中的应用实例分析。国内应用 Bayes 统计学进行参数估计的研究相对较少,Markov 链 Monte Carlo 方法在水质模型参数估计中有应用发表(王建平等,2006)。以上研究以对参数估计方法的引入和介绍为主,而对参数估计中存在的 uncertainty 讨论较少。

1.2 水文建模的流程

研究流域水文过程模拟建模的一个重要原因是观测的局限性。流域内的水文过程分布式地发生在流域内部的三维空间之内。从大气降水到植被、地面、不饱和带土壤(包气带)以及饱和带土壤(潜水层),甚至更复杂的地下水系统之间的垂直方向的水量分配,到水平方向上的水量再分配,水文过程贯穿于大气圈、水圈、生物圈和岩石圈等圈层之间(Dawdy 等,1965)。尽管现代观测技术迅速发展,但是,即使在观测站网密集、观测设备

先进的西欧和北美地区,观测数据提供的信息仍然不能完全满足流域管理、水资源规划开发和水文预报对流域内水文信息的需求 (Fulton 等, 1998; Hamlin, 1983; Johnson 等, 1999)。通过认识水文过程的一般规律,可以用模型作为手段来再现或者模拟流域水文过程。视复杂程度而定,水文模型可以提供整个流域的降水—径流响应关系,或者流域内部植被蒸腾、土壤蒸发、土壤内部不饱和带内水分的渗流扩散以及土壤饱和带内部水流运动的场景。相对于观测,水文模型可以提供流域内部三维的,并且在时间上连续的水文过程状态信息。

水文模型是水文学家对水文过程认识的计算机语言形式化。从学科划分上来看,水文学属于地球物理学研究范畴。地球学强调个性,即地球上每个区域内发生的过程都有别于其他区域内的过程;物理学研究的是共性,物理学的规律在一定的假设范围内是普遍适用的,没有地域性的限制。水文学是共性与个性的结合。对一个流域进行水文建模,既要考虑一般规律性,同时也要考虑流域的特征。流域水文建模是一个从粗到细、逐步求精的螺旋式上升过程,其一般流程可以归纳为图 1-1 所示的 6 个主要阶段。水文建模绝非一挥而就,往往需要循环往复认知模型、概念模型、过程模型、参数标定、模型验证和适用性判断这 6 个阶段。每一次循环,模型对流域水文过程的真实性接近程度就更进一步。

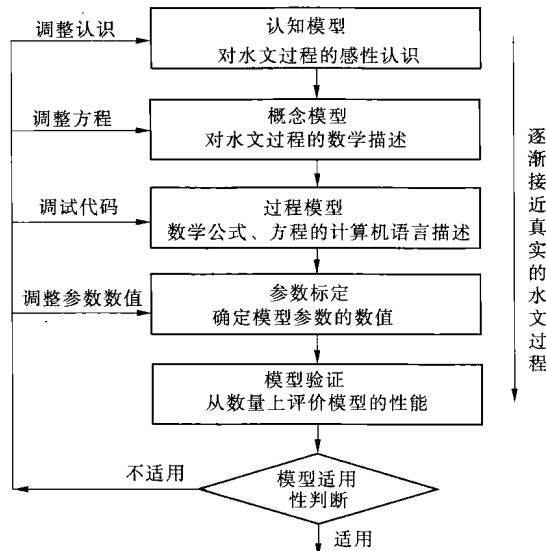


图 1-1 流域水文模拟流程

1.2.1 认知模型阶段

所谓的认知模型,就是建模者对流域水文过程认识的总结。建模者可能来自不同领域,有不同的教育和工作背景,因而认知模型具有强烈的个人色彩。以产流方式为例,以地表水文过程研究见长的建模者,习惯于应用超渗产流 (Infiltration Excess)、蓄满产流 (Saturation Excess) 和部分面积超渗产流 (Partial Infiltration Excess) 描述产流过程。这 3 个模型产流过程如图 1-2 所示,其中超渗产流和蓄满产流是经典的水文学理论,大量的水文模型采用这两者之一或者全部作为水文模型中径流的发生机制,而部分面积超渗产流

机制是超渗产流机制的发展,目前有越来越多的水文模型和陆面过程模型开始对部分面积产流机制给予关注。

具有地下水研究或者工作背景的建模者会更加强调地面以下的渗流层系统对地表产流的贡献(Rubin,2003)。如图 1-3(a)所示,地下水会在合适的地形下出露,以泉水的形式形成地表产流,或者直接补给河流。如果土壤沉积结构复杂,如图 1-3(b)所示,其内部存在着水平走向的结构性界面,潜水面之上的饱和带内部会有局部饱和,形成上层滞水,上层滞水亦有机会成为地表产流的水源。

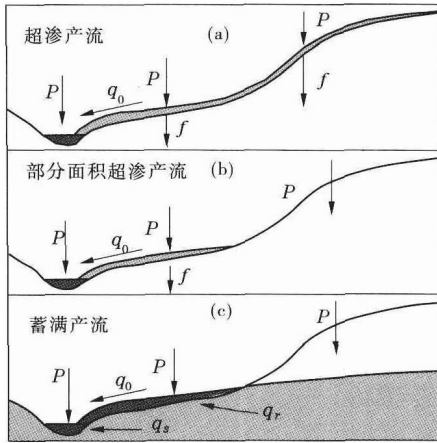


图 1-2 常用的产流方式^①

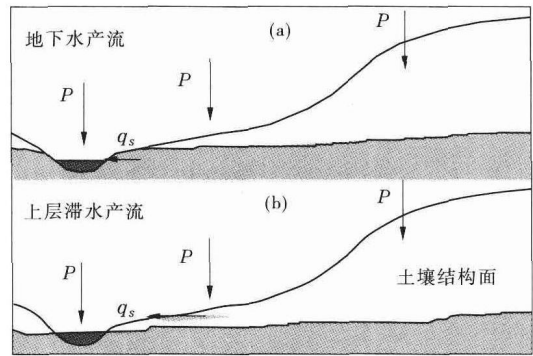


图 1-3 地面下发生的产流方式^①

降水落到地面之后向土壤中渗流,该过程在水文过程中非常重要,它的描述方式决定了降水在土壤表面再分配的比例。有水文学背景的建模者倾向于应用经验或者半经验半理论方程描述下渗过程(Barling 等,1994;Dingman,2004)。有地下水背景的建模者喜欢用下渗系数对下渗过程进行参数化。有陆面过程背景的建模者更愿意用数学物理方程去描述,而把降水输入作为一个边界条件处理(Chen 等,1997;Pitman,1999)。

蒸散发是流域水量的重要支出,不同背景的建模者的认识方式更是差异很大。有地下水背景的建模者往往利用一个蒸散发系数,进行简单地参数化处理;有水文学背景的建模者倾向于用经验公式处理(Clapp 等,1978;Cosby,1984);而有陆面过程模拟经验的人,更愿意使用物理方程去描述。

涉及流域内的冰川、冻土、积雪等水文过程,不同背景的建模者更是会有截然不同的处理办法。有人可能不加以考虑,而有人会深入探讨相关过程。

认知模型是建模的最初级阶段,建模者可以考虑其想象所及的所有水文相关环节。而下一阶段的概念模型则需要在认知模型的基础上进行简化。

1.2.2 概念模型阶段

对水文过程的数学描述这里称之为概念模型阶段。并不是认知模型中考虑到的所有

^①本图绘制参考了 Keith J. Beven 的 Rainfall-Runoff Modelling: The Primer.

细节都会在概念模型里面有相应的数学描述。一个流域内的产流方式可能有很多种,但是在水文过程中起主导作用的往往是一种或者两种。同样地,认知模型中可能考虑了下渗、蒸散发以及其他水文环节,但是基于可用数据、建模目的与建模者背景等方面的考虑,需要对这些过程加以简化。假设条件是进行简化工作的一个重要前提,将非均质的研究对象均质化,将各向异性的研究对象各向同性化,将多种作用因素归结为一个主要因素等方式,是水文建模中常常用到的假设方式。

以下部分给出了水文模型中常用来描述蒸散发、下渗、地表水流和地下水流运动的经验公式或者数学物理方程(Fetter,2000;芮孝芳,2004)。这些公式有不同的应用背景和前提假设。

1.2.2.1 蒸散发的数学描述

(1)线性经验公式。许多概念性水文模型应用非常简单的线性经验公式计算流域蒸散发,如新安江模型应用如下形式的线性经验公式:

$$E_t = kE_p \quad (1-1)$$

式中: E_t 、 E_p 分别为实际蒸散发和蒸散发潜力(水面蒸散发); k 为经验系数。

(2)Penman-Monteith 方程。Penman-Monteith 方程是能量平衡方程和空气动力学方程的综合,其形式如下:

$$\lambda E = \frac{\Delta H + \rho_a c_p \frac{e_s(T_a) - e_z}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (1-2)$$

式中: λ 为蒸散发潜热; Δ 为气温等于 T_a 时饱和水汽压曲线之斜率; γ 为干湿温度计常数; ρ_a 为空气密度; c_p 为空气热容; r_a 和 r_c 分别为植被的空气动力学阻力和冠层有效气孔阻力; $e_s(\cdot)$ 为饱和蒸汽压函数; e_z 为参考高度 z 处的蒸汽压; H 为用于蒸散发的总能量,其计算公式如下:

$$H = R_n - A - G - S \quad (1-3)$$

式中: R_n 为净辐射; A 为对流量损失; G 为地热通量; S 为植被体内以物理或者生物化学方式截留的能量。

植被的空气动力学阻力 r_a 和冠层有效气孔阻力 r_c 的计算与植被本身的形态特征有关。 r_a 的计算公式如下:

$$r_a = \frac{\ln^2\left(\frac{z-d}{z_0}\right)}{\kappa^2 u_z} \quad (1-4)$$

式中: z 为植被高度; d 为零位移平面高度; u_z 为在高度 z 处的风速; z_0 为植被的粗糙高度; κ 为 Von Karman 常数(取 0.41)。

r_c 的计算公式如下:

$$r_c = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad (1-5)$$

式中: r_l 是光照良好条件下叶面的气孔阻力; LAI_{active} 为有效(光照之下)的叶面积指数。

1.2.2.2 下渗过程的数学描述

(1) 科斯加科夫 (Kostiakov) 公式, 形式如下:

$$f(t) = kt^{-\alpha} \quad (1-6)$$

式中: k, α 为经验系数。

(2) 霍顿 (Horton) 公式, 形式如下:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1-7)$$

式中: f_0 为初始下渗率; f_c 为稳定下渗率; k 为经验常数。

(3) 菲利普 (Philip) 公式, 以下渗水量表达的形式如下:

$$F(t) = S_p t^{\frac{1}{2}} + K_p t \quad (1-8)$$

式中: $F(t)$ 为下渗开始后 t 时刻的下渗水量 (体积); S_p 为土壤水分吸收度 (Sorptivity); K_p 为水力传导率。

以下渗率表达的菲利普公式形式如下:

$$f(t) = \left(\frac{S_p}{2}\right)t^{-\frac{1}{2}} + K_p \quad (1-9)$$

式中参数含义同前。

(4) 霍尔坦 (Holtan) 公式, 任意时刻的下渗率计算公式如下:

$$f = GI\alpha SA^{1.4} + f_c \quad (1-10)$$

式中: SA 为土壤表层含水量, 以英寸 (in) 计; GI 为作物生长指数; α 为地面孔隙率指数; f_c 为稳定下渗率。

(5) 史密斯 (Smith) 公式, 形式如下:

$$f(t) = f_{\infty} + A(t - t_0)^{-\alpha} \quad (1-11)$$

式中: f_{∞} 理论上等于饱和水力传导率; A, t_0, α 分别为与土壤类型、初始土壤含水量和雨强有关的参数。

(6) 格林 - 安普特 (Green - Ampt) 方程。格林 - 安普特方程有两个组成部分, 一个是土壤下渗率方程, 土壤下渗量是这个方程的一个变量; 另外一个为土壤累计下渗量方程, 它是一个自身的隐函数, 只能通过数值方法迭代求解。两个方程的形式如下:

$$f(t) = K_s \left[\frac{F(t) + \psi(\theta_s - \theta_0)}{F(t)} \right] \quad (1-12)$$

$$F(t) = K_s t + \psi(\theta_s - \theta_0) \ln \left[1 + \frac{F(t)}{\psi(\theta_s - \theta_0)} \right] \quad (1-13)$$

式中: K_s 为饱和水力传导率; ψ 为湿润锋面处毛管上升高度 (吸湿水头, Suction Head); θ_s 为饱和土壤含水量; θ_0 为初始土壤含水量。

(7) 理查德兹 (Richards) 方程及其定解条件。理查德兹方程是描述不饱和状态下土壤下渗过程的控制方程, 其方程形式和定解条件形式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \\ \theta(z, 0) = \theta_0 \\ \theta(0, t) = \theta_s \\ \lim_{z \rightarrow \infty} \theta(z, t) = \theta_0 \end{cases} \quad (1-14)$$