



水利科技专著译著出版项目

Routledge
Taylor & Francis Group

Environmental Modelling: An Uncertain Future ?

一本介绍环境预测中不确定性估计方法的书

环境模拟： 一个不确定的未来？

[英] Keith Beven 著

刘艳丽 许钦 王国庆 陈星 等译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



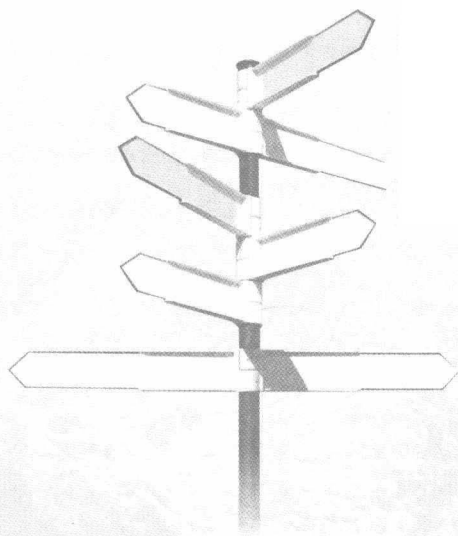
水利科技专著译著出版项目

Environmental Modelling:
An Uncertain Future ?

环境模拟： 一个不确定的未来？

[英] Keith Beven 著

刘艳丽 许钦 王国庆 陈星 等译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

北京市版权局著作权合同登记号：图字 01-2011-2502

Environmental Modelling: An Uncertain Future? /by Keith Beven/ISBN 978-0-415-45759-0

Copyright © 2009 Keith Beven

Authorized translation from the English language edition published by Routledge, a member of the Taylor & Francis Group. All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下，Routledge 出版公司出版，并经其授权翻译出版。版权所有，侵权必究。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor&Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

图书在版编目（C I P）数据

环境模拟：一个不确定的未来？ /（英）贝文著；
刘艳丽等译. — 北京：中国水利水电出版社，2015.9
书名原文：Environmental Modelling:An Uncertain
Future?
水利科技专著译著出版项目
ISBN 978-7-5170-3631-9

I. ①环… II. ①贝… ②刘… III. ①环境系统—系
统动态学—环境模拟—研究 IV. ①X21

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第215440号

书 原 著 译 者 出 版 发 行	名 称 著 者 等 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)	环 境 模 拟 : 一 个 不 确 定 的 未 来 ? Environmental Modelling: An Uncertain Future? [英] Keith Beven 刘艳丽 许钦 王国庆 陈星 等 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	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 印 规 版 印 定	版 刷 格 次 数 价	中 国 水 利 水 电 出 版 社 微 机 排 版 中 心 北 京 嘉 恒 彩 色 印 刷 有 限 责 任 公 司 175mm×245mm 16 开本 19.5 印张 371 千字 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷 0001—1000 册 79.00 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

水是人类及一切生物赖以生存的必不可少的重要物质。是工农业生产、经济发展和环境改善不可替代的极为宝贵的自然资源。水文学是研究和探讨与水有关的自然现象的基本规律的自然科学，同时也是研究水文现象服务于人类社会的技术科学。水文预报是水文学的一个重要组成部分，是防洪调度决策、生态环境保护、水资源综合利用以及水利水电工程设计、施工、调度、管理等的重要依据，水文模型是进行水文预报的基础，是认识水文循环和管理水资源的重要手段。

全球气候变化所导致的气温增高、海平面上升、极端天气和气候事件频发等，不仅影响自然生态系统和人类生存环境，而且也影响世界经济发展和社会进步。水是大气环流和水文循环中的重要要素，是全球气候变化最直接和最重要的影响领域。气候变化改变了陆地水文循环过程，影响着水文水资源系统的结构与功能，将对水资源的开发利用和管理带来重大挑战。人类活动通过土地利用、水土保持、水利工程等方式改变流域下垫面，使产汇流机制发生变化，改变天然径流和蒸发的时空分布及地下水含水层的补给，导致水文循环变化。在全球变化的背景下，流域的产汇流条件发生变化，水文资料的一致性受到了影响，水文过程的不确定性更为复杂。

水文模型的不确定性通常认为来源于输入资料的不确定性（包括用以率定模型的观测数据和模型边界初始条件等）、模型结构的不确定性、模型参数的不确定性等。近年来，国内外对模型参数的不确定性探讨较多，出现了很多模型参数不确定性的估计方法。但对模型输入资料的不确定性研究相对较少。下垫面条件变化改变了陆面水文过程，仅通过模型参数率定已经不能解决现在的水文模拟问题，正如本书中所提到的一样，水文模型的改进很大程度上将依赖

于资料观测水平的提高。

本书全面系统地介绍了环境模拟，尤其是水文模拟中的主要难点和热点问题，对不确定性问题的来源、分析和估计，以及在决策中如何应用都提出了较好的建议，对目前研究中的瓶颈问题针对性地给出了解决方案，具有很好的启发意义。

本书从概念上阐述了环境系统不确定性的哲学基础，指出面对系统复杂的不确定性，如何选取合适的定性或定量的不确定性分析方法是不确定性分析的关键，针对不同资料序列、不同预见期情况的水文预报给出了不确定性分析方法选取的建议，对水文预报工作具有重要的指导意义。此外，本书还创新性地提出了在决策中考虑不确定性的适应性管理理念，介绍了不确定性分析在管理实践中具体应用的研究实践。本书亦详细梳理了水文模拟及其不确定性问题常用的分析方法和软件资源。总之，该书具有重要的参考价值，值得从事水文模拟研究的相关人员认真研读。

翻译工作的艰辛我本人也深有体会，一本好的翻译书稿要经历反复推敲和斟酌，不仅需要译者具有较好的专业素质、英语水平，还需要较为宽泛的知识背景和较为深厚的语言功底。此书的译者，曾在英国兰卡斯特大学师从本书的作者 Keith Beven 教授学习，对这方面具有较好的研究基础，回国后也一直从事水文不确定性的研究工作，为本书的翻译奠定了较好的基础。

本书具有较好的借鉴和参考价值，其正式出版将推动我国环境模拟不确定性方面的研究。

是为序。

南京水利科学研究院院长
中国工程院院士

陆建云

羊年春节于金陵

译者的话

水文过程是一种受气候、气象、地形、地貌和下垫面等因素影响的复杂自然过程，蕴含着很多不确定性因素，人类社会的生活生产活动对水文过程产生的扰动加剧了这一系统的复杂性和不确定性。但一直以来传统水文模拟与预测理论是基于确定性的预报，往往回避了不确定性的问题。从统计的角度来说目前几乎所有的水文模拟和预测结果都被设定提供点估计，因为水文学的大多数研究只是尽力找到最好的估计值，而不是基于不确定性的模型预测。在确定性预报中，水文模型通过参数优选找到“最优估计”，从而应用与有关决策。此理论最初遇到的挑战即为在模型参数优选中出现的“异参同效”现象，人们发现很难找到一组具有绝对优势的全局最优参数。参数不确定性是水文模型不确定性研究最为广泛的方面之一。

我国在水文不确定性方面的研究目前还在初级阶段，即使在全世界范围内，不确定性研究目前仍是水文学研究的热点和难点问题之一。当译者2007年回国在博士论文中提及研究水文不确定性时，很多学者问我为什么要研究不确定性。当时（即使是现在的水文相关决策管理工作中）人们认为确定性的优选结果是决策需要的，把研究的重点放在了优选方法的开发和改进上。但随着研究的深入、水文观测水平的提高和计算机水平的改进，人们认识到水文模型的不确定性是远非水文模型参数能代表的。尤其在全球气候变化和强人类活动影响下，流域的产汇流特征发生了较大变化，水文系统的不确定性更为复杂，寻找“最优模拟”已经成为一种不可能，不确定性分析应成为水文预测的重要组成部分，甚至决策者也应该接受在不确定性下作出相关决策，科学家们应努力促进不确定性的评估以及在决策中的应用。

正如本书前言中提到的一样，本书是基于对环境科学的分支学

科——水文学预测中不确定性长期研究的。虽然是针对水文学的特定问题，但是也同样适用于环境模拟领域的其他方向。译者2007年从导师 Keith Beven 教授那里拿到手稿，在博士论文期间曾参考了本书中的理论和方法，甚至目前的研究中仍在研读此书，获益匪浅。因此，将本书的知识全面、系统地介绍给我国的环境科学，尤其是水文科研工作者，使更多的人从中获益，推进环境科学不确定性的研究，用以帮助解决在水文水资源管理工作中的实际问题，推动我国环境科学，尤其是水文科学的进步，成为译者翻译此书的初衷。

在国家自然科学基金青年基金项目“气候变化下流域径流响应模拟及不确定性分析方法研究”（项目编号：51009094）、国家自然科学基金重点项目“变化环境下不同气候区河川径流变化归因定量识别研究”（项目编号：41330854）、国家自然科学基金面上项目“不同尺度流域水文循环过程对气候与植被变化的耦合响应关系及模拟”（项目编号：41371063）、全球变化研究国家重点基础研究发展计划（973 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”（项目编号：2010CB951100）、十二五国家科技支撑计划项目“沿海地区应对海平面上升适应技术集成与应用”（项目编号：2012BAC21B01）、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“变化环境对流域水文循环的影响及不确定性研究”（项目编号：Y514007）支持下，本书得以翻译完成，并在研究中进行了初步应用。同时，本书还得到南京水利科学研究院出版基金的资助。

本书在什么是不确定性、不确定性的哲学基础、不确定性估计方法的应用以及如何在不确定性下进行水文预报和决策深入浅出地给出了详细的介绍和总结，并结合目前世界范围内的最新研究提出了一些具有较强操作性的解决方案。对研究经历较多的科研工作者，本书有助于回答对水文不确定性研究的一些容易迷惑的问题，譬如不确定性评估是否是模拟的最后一步、如何在决策中应用不确定性评估信息等，在具体应用中关于方法可详细参阅每章后面的专栏部分和本书后面的相关软件介绍部分；对了解较少的初学者，本书也有助于了解水文不确定性的内涵、研究的必要性和可行性，可仅阅

读正文部分而不细究具体理论方法。

Keith Beven 是一个具有较为深厚哲学基础的著名水文学家，翻译他的书的难度超出了译者初发此衷时的想象。为了尽可能地保证整本书翻译的高质量和一致性，仅选取了四位主要翻译人：刘艳丽（博士，在英国留学时为 Keith Beven 的学生，系统学习了本书中的相关理论），负责翻译本书第 3、第 4、第 6、第 7 章；黎思乐（博士，曾同为英国兰卡斯特环境中心的学生，与 Keith Beven 在一个研究组），负责翻译本书第 2 章；许钦、陈星（博士，具有较好的水文基础和英文水平），负责第 1、第 5 章。并在翻译章节的安排上，充分考虑了每个人的研究专长。王建进行了初步统稿，王国庆教授阅读了初稿并提出了修改意见，刘艳丽对本书进行了统稿和定稿。

感谢所有参加译校工作的学者对本书的出版所付出的辛勤劳动，在此对他们所做出的贡献表示最真挚的感谢！感谢 Keith Beven 的著作（截至目前，该书在 google 学术搜索的数据为“被引 274 次”，在百度文库中更被评为“环境科学模型的骨灰级经典书籍”）并感谢其在翻译中对一些疑难词汇给出的具体详尽的解释。感谢张建云院士提出的宝贵意见和为本书作序。中国水利水电出版社的武丽丽副编审及其同事对本书的版权办理及出版做出许多细致的工作，没有他们的帮助和努力，本书中文版的出版是不可能的。在此一并表示感谢。

时至今日，离译者初发此衷已 7 年有余，期间经历了博士毕业、工作、结婚、生子。最近的两年，译者在繁忙的工作和照料孩子的缝隙时间之中；在每天下班后办公室里忍饥挨饿译稿校稿的时光中；在每字每句的斟酌之中；坐在计算机前译稿、校稿、统稿之中度过了寂寞而又对孩子愧疚的一个又一个晚上，但在本书完成的那一刻，所有的辛苦仿佛都变成了甜蜜。

现在每当翻起导师张建云先生翻译的《水文学手册》（水文经典参考书）一书，读及导师前言中所述感悟，简直不能同意更多。此书稿仅是其五分之一就如此辛苦，可见导师翻译《水文学手册》付出的努力超乎想象，但或许正是这种坐得冷板凳、耐得住寂寞的科

研精神，成就了导师今日的辉煌。作为一名科研工作者，笔者只是希望能认真踏实地做好几件有意义的事，希望本书的翻译并不太坏。

马云说过，“人还是要有梦想的，万一它实现了呢。”本书的翻译应该说是笔者自博士研究生以来的一个梦想，希望若干年后，有人提及本书，认为还算有用、还算不错就很欣慰了。同 Keith Beven 教授一样，我甚至也希望把本书献给我的孩子（虽然他年龄尚小），希望我们的下一代能从中有所收获，推进我们的研究事业。

本书的翻译中，保留了一些缩写的英文名字的全称，以便于读者参考。

需要指出的是，虽然本书是译者字斟句酌，几次三番认真校对才完成的，但由于本书科学性和理论性均较高，译者的水平有限，译文中错误遗漏在所难免，敬请读者批评指正。

刘艳丽

2015 年 1 月于南京

原著前言

本书经历了较长的酝酿阶段。它来源于 35 年前我博士阶段的一些水文模拟的工作。由于结果不太理想，这些研究成果直到 2001 年才发表 (Beven, 2001)。该模拟过程的设计比较科学且目标明确，旨在寻求日过程的最佳模拟，但模型对研究的小流域和山坡响应的模拟结果都比较差。在当时，计算机能力还是一个问题，计算机程序还依靠穿孔卡片来实现，因而程序的调试和运行时间极其耗时；计算机存储和速度受到模型单元大小和模拟时段长短的制约。我记得当我的模拟在大学的“主机”上少于预定的 12 个小时完成时，我们甚至简单的庆祝了一番！

然而，计算机的能力局限并不足以解释为什么模拟结果会这么差。我个人认为结果差的原因是模型没有足够考虑径流过程的机理和观测到的土壤异质性，尽管该模型基于当时可用的最优理论，且模型参数亦是在研究区域测得（虽然尺度较小）。然而，我的研究可以总结为一种对处理此类模拟失败的尝试，试图寻找在某种意义上“合适地”模拟环境系统的方式。

对“合适地”的定义本身就是一个涉及哲学科学领域的难题，本书给出了一个有关哲学问题的讨论。当然，可以在没有明确的哲学假定的情况下开发和应用环境模型。它们是简单的应用工具。然而，冒着仓促下判断的风险，我建议大部分环境模拟者至少隐式地是一个活跃的现实主义哲学家。我是一个水文学者，我知道我的计算机模型只是在一些复杂的电子硬件上应用的一系列逻辑结构，但我始终认为模型的变量表征了真实的水过程。如果对污染迁移的预测，我会认为模型是对真实污染物过程的模拟。我的目标是改进模型，从每个应用到接近真实总量的过程中学习。

同样的，一个生态模拟者希望表征真实的种群；大气模拟者希

望表征大气中的真实能量和动力流；火山学家希望表征熔岩流与矿物和油气的不同。他们的目标是提高时间上的模型性能，以便于模型变得更为“现实的”，但大部分的环境模拟者意识到我们考虑这一过程的局限性。模拟者必须成为一个实用主义者，即使在预测中亦不想仅成为使模型“有用”的一个执行者。

本书实际上是这些局限性及其在对模拟实践和决策中模型应用影响的探索。这些局限性意味着在环境模型的预测能力中存在固有的不确定性，因而存在错误决策的风险。然而，本书的论题是这些不确定性应该显式地进行评估，且基于此类预测的决策应该考虑决策错误的风险。

然而，不确定性评估并未想当然地成为常规应用实践，虽然现在这方面的研究文献在迅速增加。概率概念和随机模型得到了广泛应用但正如我们所看到的一样，通常以确定的形式。有充分的理由这样做，但这并不能说明在环境预测中完全忽略不确定性是合理的。这里的目的是列出可用的方法并展示如何以容易理解的方式应用在实际中，特别是对那些需要在决策中考虑不确定性的决策者。我希望本书的研究可促进未来对此问题更加广泛深入的理解，甚至在某些未来变化预测领域应强制在环境模拟中应用不确定性估计。虽然在这样一本书中很难覆盖大范围的方法技术，只可能提供一个简介和指导，但列出了更为详细的相关出处。很多此类研究都介绍了不同的方法。介绍如此多的方法的原因之一是环境模型的不确定性估计仍在发展之中且有时候存在争议。关于方法的合理性有很多争论，本书试图如实反映目前的争议状态。

环境模型都有（或者应该有）一个运行目标。其目标可能是理解环境系统是如何工作的，但通常用于帮助形成决策。很多人提出决策者“未准备好”处理来自科学家的不确定性预测，或者如果不确定性太大则对决策过程没有帮助，但在我看来，上述提议均不正确。的确，我个人认为一个科学家如果因为可能造成已作出的决策发生改变而不考虑不确定性是不对的。当不确定性确实很大时，可能应用一个对不确定性更具稳健性和适应性从而能从系统本身学到

更多的方法。如何实现这一过程的一些方法在本书中也进行了介绍。

我个人的研究工作主要在水文和水力过程模拟方面，我在环境模拟的其他领域的经验有限。本书中用来阐明方法的例子很多都是来自我比较熟悉的领域，但同时我也试图从其他学科选取一些合适的例子。环境科学毕竟是物理、化学和生物学过程联系和耦合下多学科交叉的活动。任何特定空间或过程领域的界定可能涉及的简化过程都有可能导致不确定性。我希望，本书中介绍的方法在大范围的环境问题中都能应用，读者有足够的方法，从而可以找出一两种对他们而言比较新的方法。当难以对多种不确定性源假设时，可在环境模拟和决策过程中应用这些方法。然而，关于不确定性估计的文献增加迅速，很可能我错过了一些其他领域的重要文献（例如，在地球物理学应用和区域技术方面的不确定性估计方法比较少）。我同时意识到本书并没有包括所有的方法（本书已经超过了原本设想的一个介绍文档的厚度）。我向那些认识到应该给他们未来的工作中更多指导的读者致歉。

过去的 30 年，这里提出的观点受到了很多人的影响，他们中的一些人我素昧平生，但他们的一些著作促使我深入思考如何将模拟的“适合地”做到最好。这里只引用了一些比较好的例子，我应该首先提到兰卡斯特大学的 Peter Young 教授，他的尝试表明科学确实可以通过灵感和归纳法推进。当我在弗吉尼亚州立大学时我也通过与 George Hornberger 关于模拟的讨论获益匪浅，确实，我后来开发的不确定性估计 GLUE 方法是他曾与 Bob Spear 和 Peter Young 一起提出的 Monte Carlo 敏感性分析方法的一个直接扩展。

统计学家们倾向于从统计学角度解释不确定性评估，但环境模拟中的不确定性的很多方面与统计无关。很多统计学家对 GLUE 方法中的一些方面尤其是主观似然度准则不认可，但我感谢兰卡斯特大学统计学院的 Jonathan Tawn 和现在布里斯托的 Jonathan Rougier 的开放式讨论。现在 GLUE 方法已广泛应用于很多问题，帮助了大批兰卡斯特大学的研究生、博士后、大学教师和访问学者。感谢 Bruno Ambroise, Giuseppe Aronica, Kathy Bashford, Andrew Bin-

ley, Sarka Blazkova, Rich Brazier, Kev Buckley, Wouter Buytaert, David Cameron, Hyung Tae Choi, Sarah Dean, Luc Feyen, James Fisher, Stewart Franks, Hannah Green, Barry Hankin, Ion Iorgulescu, Helen Kettle, Rob Lamb, Trevor Page, Florian Pappenberger, Pep Piñol, Renata Romanowicz, Karsten Schulz, Paul Smith, Phil Younger 和 Susan Zak。特别感谢 Jim Freer 长期为不同模拟和 GLUE 方法做出的努力, 他热情地推动国际水文学者对不确定性准则和模型预测的研究, 尤其是保障兰卡斯特的并行计算系统的连续运行。

非常感谢瑞典和丹麦的博士研究生, 他们参与了在乌普萨拉举办的本书草稿的讨论课程, 并提出了一些反馈。非常感谢乌普萨拉大学和瑞典农业大学的热烈款待以及在乌普萨拉为我提供的支持。最后, 感谢 Monique Romanens, Susanne Abbuehl, Angela Hewitt, Thomas Tallis, Svenska Polskor, 和 Arditti, Alban Berg, Borodin, Brodsky, Emerson, Fitzwilliam, Keller, Kronos, Lindsay, Maggini, 乌普萨拉驻校四重奏使我在过去一年的写作中保持清醒。

在我的《降雨径流模拟》一书的前言中, 我记得我提到了 Anna, 她应该读过此书, 我希望对她有用。完全没想到, 她的确在她的一部分硕士课程中用到了此书 (她评价为 “的确不算太坏”)。因此这次, 我正式地将此书献给 Anna 和下一代环境模拟者, 希望他们开始在实际应用中用到本书提到的方法。毕竟, 一些客户已开始询问一些预测中的不确定性估计问题, 因此这次我希望本书是一个对可用方法不算差的指导。

Keith Beven

于兰卡斯特, 奥斯吉尔和乌普萨拉

目 录

序

译者的话

原著前言

第 1 章 如何进行预报	1
1.1 本书的目的	1
1.2 环境模拟的目的	2
1.3 不使用不确定性分析的 7 个原因	3
1.4 模型过程的本质	5
1.4.1 从概念模型到过程模型	5
1.4.2 参数、变量与边界条件	6
1.5 尺度问题与不可公度的概念	8
1.6 模拟空间	10
1.7 模型集成	14
1.8 为了机理解而模拟	15
1.9 模拟的具体应用	17
1.9.1 无历史资料情况下的模拟	17
1.9.2 有历史数据情况下的模拟	18
1.9.3 近期模拟	19
1.10 有效模拟的导则	20
1.11 不确定性的含义	21
1.12 选择不确定性估算方法	24
1.13 模型模拟及决策制定的不确定性	26
1.14 本章总结	27
第 2 章 哲学转换	29
2.1 为什么担心哲学?	29
2.2 实用现实论	31
2.3 其他现实主义的哲学观点	32
2.4 模型是工具主义者的工具	33

2.5	模型有效性的问题	34
2.6	模型证伪的问题	35
2.7	模型证实的问题: 贝叶斯方法	36
2.8	作为证实模型证据的观测信息内容	37
2.9	解释的深度和预测非预期的	41
2.10	不确定性、无知和安全因素	43
2.11	本章总结	45
第3章	无历史资料地区模拟	46
3.1	敏感性、情景和前向不确定性分析	46
3.2	先验信息决策	48
3.2.1	参数的先验分布	49
3.2.2	置信网络	50
3.3	模拟空间抽样	52
3.3.1	概率不确定性的传递分析	53
3.3.2	离散抽样或随机蒙特卡洛搜索	54
3.3.3	伪随机数和实现效果	57
3.3.4	导向性蒙特卡洛搜索	60
3.3.5	联合(copula)抽样	62
3.3.6	实例: 模拟地下水水质的联合抽样	63
3.4	不确定性的模糊表征	65
3.4.1	实例: 应用模糊变量的前向不确定性分析	66
3.5	敏感性分析	68
3.5.1	点敏感性分析	68
3.5.2	全局敏感性分析: Sobol' 普适敏感性分析	69
3.5.3	实例: 水文模型中 Sobol' GSA 的应用	70
3.5.4	全局敏感性分析: HSY 普适敏感性分析	71
3.6	模型仿真技术	73
3.7	不确定情景	74
3.8	本章总结	75
第4章	已知历史数据的模拟	94
4.1	模型率定和模型调试	94
4.2	模型率定的权重非线性回归方法	96
4.2.1	成本(目标)函数选择	97
4.2.2	参数估计和不确定性预测	98

4.2.3	评估额外数据的价值	99
4.3	模型率定的规范贝叶斯方法	99
4.3.1	规范似然度准则	101
4.3.2	马尔可夫蒙特卡洛链模拟方法	103
4.3.3	研究实例：评估概念水量平衡模型的 不确定性 (Engeland 等, 2005)	103
4.4	帕累托 (Pareto) 优选集	105
4.5	普适似然不确定性估计方法	106
4.5.1	GLUE 方法的基础	108
4.5.2	确定模拟是否有效	109
4.5.3	等效性、置信区间、容许偏差区间、预测区间	114
4.5.4	等效性和模型验证	117
4.5.5	等效性和模拟空间：抽样效率的问题	118
4.5.6	模型评估中的模糊准则	119
4.5.7	实例：GLUE 方法在径流产流模型的假设检验中的应用	119
4.5.8	GLUE 方法的变形	123
4.5.9	当发现所有的模拟均应拒绝时该做什么	125
4.6	模糊系统：应用数据设定模糊准则	126
4.7	模型调试的方法比较：数据的一致性 & 信息	127
4.8	本章总结	128
第 5 章	短期预报	150
5.1	实时数据的同化	150
5.2	最小二乘误差修正模型	155
5.3	卡尔曼滤波	156
5.3.1	模型残差的修正	158
5.3.2	预测模型增益修正	158
5.3.3	实例：塞文 (Severn) 河的洪水预报	159
5.3.4	广义卡尔曼滤波	161
5.4	集合卡尔曼滤波	163
5.4.1	实例：集合卡尔曼滤波在 Leaf 河流域的应用	164
5.4.2	集合卡尔曼平滑滤波	166
5.5	粒子滤波方法	167
5.5.1	实例：EnKF 和 PF 方法在莱茵 (Rhine) 河的应用比较	168
5.6	变分方法	170

5.7	天气预报的集合方法	171
5.8	本章总结	173
第6章	面对不确定性的决策方法	184
6.1	不确定性及风险决策	184
6.2	决策框架中的不确定性	185
6.3	决策树、影响流程图以及置信网络图	186
6.4	决策中的风险评估方法	188
6.5	风险决策方法	189
6.5.1	评估决策者的偏好	190
6.5.2	不同方案的相同之处	190
6.5.3	增加不确定性和更多的信息	190
6.5.4	实例：防洪预警和控制决策（Lake Como，意大利；The Red River， N. dakota）	191
6.6	专家建议在决策中的应用	193
6.7	综合专家意见：贝叶斯置信网络	193
6.7.1	信任网络中的经验事实	194
6.7.2	实例	195
6.8	证据原因方法	197
6.8.1	实例分析：证据原因方法在尼泊尔的 Rupa Tal 湖管理决策评估中 的应用	198
6.9	决策支持系统	199
6.10	信息差距理论	200
6.10.1	实例：信息差距决策方法在防洪工程设计中的应用	203
6.11	决策中不确定性的所有权问题	206
6.12	NUSAP 方法论	210
6.13	面对不确定性的稳健性适应管理	211
6.14	决策中的不确定性和预防性原则	213
6.15	本章总结	214
第7章	一个不确定的未来	223
7.1	在面对如此多的不确定性估计方法时实践者应做什么？	223
7.2	未来问题——不可知性和不确定性	225
7.3	不确定性问题是简单地由于应用了较差模型吗？	226
7.4	接受一个不确定的未来	227
7.4.1	作为一种学习过程的模拟	229