

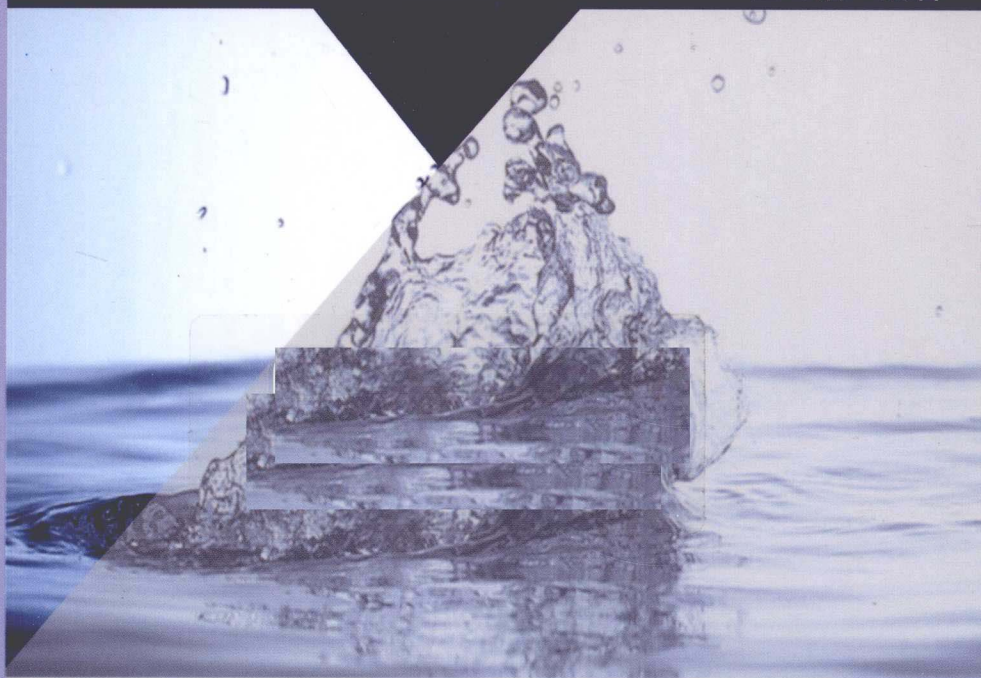


自主创新 方法先行

水文学不确定性 分析方法

Methods of Uncertainty
Analysis for Hydrology

王文圣
张翔
金菊良
丁晶
王浩 编著



科学出版社

内 容 简 介

本书从科学方法论角度对当前主要的水文学不确定性分析法——随机分析法、模糊分析法、灰色分析法、集对分析法的哲学基础、基本原理和基本方法进行归纳、对比和评价,较系统地总结了这些不确定性方法在水文分析计算、评价(或决策)和预测中的研究和应用,最后对这四种方法的主要耦合途径和应用进行了简要的介绍。全书具有综合性、实用性和新颖性等特点。

本书可作为高等学校水文水资源及环境类专业的高年级本科生和研究生的教学和科研参考书,也可供理工科大专院校气象、农业等相关专业的高年级学生、研究生和教师阅读,同时也适合有关科技工作者和工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

水文学不确定性分析方法=Methods of Uncertainty Analysis for Hydrology/王文圣等编著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-030531-2

I. ①水… II. ①王… III. ①水文学-不确定系统-分析方法-高等学校-教材 IV. ①P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 039805 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:李 影

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 3 月第一次印刷 印张: 28

印数: 1—2 500 字数: 548 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

当前不确定性分析法日益成为复杂性科学中最重要的分析方法之一。水文科学既涉及大自然中水的变化规律,又关系到利用这些规律如何为人类服务、促进整个社会持续和谐发展,是一门众所周知的复杂科学。因此,不确定性分析法在水文学中具有独特的显著地位。不确定性分析法早就被引入水文学,近几十年人类对水安全需求的急剧增加以及科技发展的明显进步,有力促进了该法在水文学中的研究和应用,并且内容不断更新、充实和完善。为了进一步加强水文不确定性分析法的科学性和切实提升其实用性,特别是为了适应水文学面临的更多、更高的新要求,从科学方法论高度对当前主要不确定性分析法加以归纳、对比、评价和综合,无疑是十分必要的。本书正是基于这种必要性,在国家科技基础性工作专项项目(编号:2007FY140900、2009IM020100)和教育部新世纪优秀人才支持计划的资助下而专门撰写的。

在水文学的现有文献中,几乎尚未发现一本综合论述水文学不确定性分析法的书籍。经过本书5位作者多次讨论、争辩和协调并在实际撰写过程中反复修改和完善,本书的结构和主要内容才最终确定下来。本书尽力突出水文不确定性分析法的综合性、实用性和新颖性,其主要内容可归纳为:

- (1) 论述水文学中当前主要流行的多种不确定性分析法。
- (2) 较全面地阐述水文不确定性分析法中最主要的方法——随机分析法。
- (3) 较系统地阐述由模糊性引起的水文不确定性的分析法——模糊分析法。
- (4) 重点论述信息量不足导致的水文不确定性的分析法——灰色分析法。
- (5) 重点论述水文不确定性分析法中最近出现的一种新方法——集对分析法。
- (6) 较系统地论述水文不确定性分析法之间相互结合的分析方法——耦合分析法。

全书共7章,由5位作者负责撰写。第1章由王文圣、王浩共同撰写;第2章和第5章由王文圣撰写;第3章由金菊良撰写;第4章由张翔撰写;第6章6.1节由金菊良、王文圣共同撰写,6.2节、6.5节、6.7节由金菊良撰写,6.3节、6.6节、6.8节由张翔撰写,6.4节、6.9节、6.10节由王文圣撰写;第7章由丁晶撰写。全书初稿完成后,丁晶、王浩系统阅读,除对某些部分直接做了更改、充实和完善外,更多的是对各章提出修改意见。各章撰写人根据修改意见做了认真修改,形成了修改稿。王文圣在修改稿基础上进行统稿,最后形成本书。

本书的撰写和出版既是集体智慧的结晶,又是各方关心、支持和帮助的结果。衷心感谢中国水利水电科学研究院秦大庸研究员、严登华教授的热心帮助和鼎力支持,衷心感谢中国科学院地理科学与资源研究所夏军教授、北京理工大学魏一鸣教授、西北农林科技大学宋松柏教授、北京师范大学杨晓华教授、合肥工业大学汪明武教授、李如忠教授的宝贵建议。感谢四川大学水利水电学院有关领导和水文水资源工程系诸多同事的帮助和大力支持,感谢合肥工业大学、武汉大学和中国水利水电科学研究院有关部门的关心和支持。感谢为本书撰写提供计算实例和协助的张明、周玉良、吴成国、周秀平、陈燕飞、陈晶、李东龙、张杨、刘妮娜、阮燕云、程亮、蒋尚明、付娟、荣超、李丹、冉啟香、邓志民等硕士、博士研究生。本书的出版也得到了国家自然科学基金(编号:50779042、50739002、51079037)的部分资助。还要感谢科学出版社的同志们为本书出版所付出的辛勤劳动。

本书的大量资料引自有关高等学校、科研和生产单位以及个人出版的书籍、发表的论文和科技文献资料。在此对相关单位和作者一并致谢。

由于时间紧迫,特别是撰写人水平有限,书中不妥之处在所难免,请读者批评指正*。

作 者

2010年8月31日

* 联系方式:成都四川大学水利水电学院 王文圣,邮编 610065,或 Email: wangws70@sina.com。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水文不确定性	1
1.2 水文不确定性分析方法	3
1.2.1 水文随机分析法	3
1.2.2 水文模糊分析法	4
1.2.3 水文灰色分析法	6
1.2.4 水文集对分析法	6
1.2.5 水文耦合分析途径	7
1.3 本书目的与内容	8
1.3.1 本书目的	8
1.3.2 本书内容	9
参考文献	9
第 2 章 水文随机分析方法	11
2.1 概述	11
2.2 随机分析的哲学基础	11
2.3 水文频率分析计算	13
2.3.1 频率分布线型的选择	14
2.3.2 频率分布线型参数估计	23
2.3.3 特殊样本系列下的统计参数估计	41
2.3.4 水文频率计算的合理性分析	49
2.4 水文相关分析计算	52
2.4.1 多元频率分析计算	53
2.4.2 多变量的相关和回归分析计算	65
2.4.3 多变量函数的频率分析和计算	89
2.5 水文过程随机分析	91
2.5.1 随机过程的基本理论	91
2.5.2 水文序列分析方法和随机模拟技术	100
2.5.3 随机模型	120
2.5.4 随机模型的应用	144

参考文献	153
第3章 水文模糊分析方法	157
3.1 概述	157
3.2 模糊分析的哲学基础	157
3.3 模糊分析方法的理论基础	160
3.3.1 模糊集	160
3.3.2 模糊关系	162
3.3.3 模糊集的运算	164
3.3.4 模糊集的建立方法	168
3.3.5 模糊分析方法体系	169
3.4 水文模糊模式识别方法	170
3.4.1 基于最大隶属原则的模糊模式识别方法	170
3.4.2 基于最大贴近原则的模糊模式识别方法	171
3.4.3 基于模糊相似选择的模糊模式识别方法	172
3.4.4 基于最优化方法的模糊模式识别方法	176
3.5 水文模糊聚类方法	181
3.5.1 基于模糊等价关系的传递闭包方法	182
3.5.2 基于最优化方法的模糊聚类方法	183
3.6 水文模糊综合评价方法	188
3.6.1 综合评价的基本框架	188
3.6.2 评价方法	190
3.7 水文模糊决策分析方法	202
3.7.1 模糊线性加权平均法	202
3.7.2 模糊优选决策模型	207
3.7.3 动态多指标决策投影寻踪模型	210
3.7.4 模糊层次分析法	214
3.8 水文模糊预测方法	223
3.9 水文模糊推理方法	230
3.9.1 模糊推理	230
3.9.2 推理方法	233
参考文献	240
第4章 水文灰色分析方法	243
4.1 概述	243
4.2 灰色分析的哲学基础	243
4.3 灰色分析的基本概念与方法	244

4.3.1 灰数、灰数白化与灰度	244
4.3.2 灰关联分析	251
4.3.3 灰色系统模型	255
4.4 灰色分析法在水文分析计算中的应用	262
4.4.1 灰关联分析在相似流域选择中的应用	263
4.4.2 灰聚类在洪水等级识别中的应用	265
4.5 灰色分析法在水文评价中的应用	269
4.5.1 灰关联分析在自然灾害灾情评价中的应用	269
4.5.2 灰色聚类在地表水水质评价中的应用	271
4.6 灰色分析法在水文预测中的应用	273
4.6.1 GM(1,1)模型在年径流预测中的应用	274
4.6.2 GM(1,2)模型在月径流预测中的应用	276
4.6.3 灰参数模型在中长期水文预测中的应用	277
4.6.4 灰关联模式识别在中长期径流预测中的应用	280
4.6.5 水文灰色系统微分动态模型与实时灰色预测	283
4.6.6 自记忆水文灰色系统微分动态模型在洪水预报中的应用	285
4.6.7 讨论	288
参考文献	289
第5章 水文集对分析方法	291
5.1 概述	291
5.2 集对分析的哲学基础	292
5.3 集对分析方法的基本原理	292
5.3.1 集对的基本概念	293
5.3.2 联系度与联系数	293
5.3.3 联系度的确定	297
5.3.4 联系数的确定	305
5.3.5 水文集对分析的主要内容	311
5.4 水文集对计算方法	311
5.4.1 基于 SPA 的水文相关分析方法	311
5.4.2 基于 SPA 的水文分类方法	315
5.4.3 基于 SPA 的水文相似性选择方法	323
5.4.4 基于 SPA 的水文变化特性分析方法	328
5.4.5 基于 SPA 的水文频率曲线拟合评估	330
5.5 水文集对评价方法	333
5.5.1 集对评价法	333

5.5.2 模糊集对评价法	339
5.5.3 模糊集对聚类评价法	343
5.5.4 集对分析-可变模糊集耦合评价法	347
5.6 水文集对预测方法	350
5.6.1 基于 SPA 的相似预测模型	351
5.6.2 基于 SPA 的秩次预测模型	359
5.6.3 基于 SPA 的年径流状态预测模型	362
5.6.4 基于 SPA 的组合预测模型	368
参考文献	372
第 6 章 水文不确定性耦合分析方法	374
6.1 概述	374
6.2 随机和模糊分析的耦合途径	375
6.2.1 模糊优化适线方法	375
6.2.2 随机模拟和三角模糊数的耦合模型	379
6.3 随机和灰色分析的耦合途径	384
6.3.1 灰色先验分布的基本概念	384
6.3.2 具有灰色先验分布的贝叶斯公式	386
6.3.3 灰色-随机风险率的概念及表达形式	387
6.3.4 灰色-随机风险率的计算方法	389
6.4 随机分析和集对分析的耦合途径	391
6.5 随机分析和未确知数学的耦合途径	391
6.5.1 基于蒙特卡罗模拟的未确知数运算	391
6.5.2 实例分析	393
6.6 模糊和灰色分析的耦合途径	397
6.6.1 灰色-模糊耦合方法在参证流域选择中的应用	397
6.6.2 灰色-模糊综合评价方法在水库正常蓄水位方案优选中的应用	398
6.7 模糊与信息熵的耦合途径	401
6.7.1 信息熵与改进模糊层次分析法的耦合评价模型	401
6.7.2 实例分析	404
6.8 模糊分析和联想记忆网络的耦合途径	408
6.8.1 模糊 Hebb 学习律	408
6.8.2 FAM 的结构	409
6.8.3 实例分析	411
6.9 混沌和小波网络分析的耦合途径	414
6.9.1 水文系统的混沌性	414

6.9.2 混沌小波网络模型	414
6.9.3 模型参数估计	415
6.9.4 实例分析	416
6.10 灰色模糊贝叶斯分析的耦合途径	418
6.10.1 灰色模糊贝叶斯分析耦合途径	418
6.10.2 实例分析	422
6.10.3 小结	423
参考文献	424
第7章 结语	426
7.1 四种不确定性分析法的基本特点	426
7.2 四种不确定性分析法的主要优缺点	427
7.3 选用四种不确定性分析法时必须注意的问题	427
7.4 不确定性分析方法发展的方向	428
附录	429
附表1 皮尔逊Ⅲ型分布的离均系数 Φ_P 值表	429
附表2 相关系数检验表	435

第 1 章 绪 论

1.1 水文不确定性

水文科学是研究地球上水的起源、存在、分布、循环等变化规律和运用这些规律为人类服务的知识体系^[1]。随着人类对水变化的认识日益加深,以及对水资源的开发利用规模不断扩大和范围的不拓宽,水文科学的研究领域日渐扩大和延伸并且为适应迫切需求形成了独特的分支学科,其中作为水资源合理开发、可持续利用、先进管理和全面保护的科学基础而兴起的水资源水文学,引起高度关注。水资源水文学从总体上讲就是把地球上的一切水资源看作是一个整体系统进行研究,为水资源的开发、利用、管理和保护提供科学依据^[1]。水文科学及其分支科学水资源水文学在本质上无明显的差异,只是前者的领域更宽,后者侧重于水资源问题而已。最近若干年来,一个新的名词频繁出现,这就是水文水资源,它的确切含义是什么?和人文有何区别?和自然资源水文差异在哪里?至今没有一个准确且为大家所接受的答案。本书为便于论述,依据涉及对象的特点,有时选用“水文”,有时选用“水文水资源”。使用前者时侧重于广义的水文,而使用后者则侧重于与水文紧密联系的水资源。在笔者看来,二者的实质性区别并不存在。所以本书对“水文”和“水文水资源”不作严格区分,常常互用。

作为水文学主要研究对象的水文现象,既受流域的水文气象、自然地理、植被覆盖等因素影响,又受控于人类活动,其变化十分复杂。水文现象变化明显地具有确定性规律,如暴雨会产生洪水、月径流具有年周期性、河流上下游径流具有较强的相关性、水具有自净能力等。探索、揭示水文现象的变化特性时不能不考虑其确定性规律。确定性水文学就是研究水文现象确定性规律而建立起来的,目前已取得了丰硕的成果^[2,3]。而另一面,水文现象的变化特性并不完全表现为确定的,例如,相同的暴雨产生的洪水大小却不同,各年的最大洪峰流量相差较大;汛期与非汛期的时间分割点是不明确的,大洪水与小洪水之间不存在明确的分界点,水质优劣的概念难以界定;水文信息的不充分导致模型结构、功能和参数不确定;水文现象间的关系不是确定的,可能是这样的关系,也可能是那样的关系;水文现象的局部在某一方面(形态、结构、功能、信息、能量、时间)表现出与整体不同但却有自相似性;水文系统具有涨落不可逆性,具有永不重复的非周期运动,可能存在“蝴蝶效应”,等等。也就是说,水文现象还具有广泛的不确定性变化特性。这种不确定性

变化特性是由不确定性影响因素(现象)所致。大量的研究表明,水文现象的不确定性变化特征主要表现为随机性、模糊性、灰色性、未确知性、分形和混沌性等方面。

影响水文现象的一些因素偶然发生变化,使得其结果发生与否不定或大小有异,也就是说,是否发生或发生的大小不能事先知道,这就是随机性。水文现象的随机性无处不在并早已被人们所接受,如,给定相同的降雨强度和降雨历时,在同一块场地上进行多次人工降雨实验,每次所得径流彼此不同;河流某控制断面的月平均流量过程各年不同;水系的演变导致流域汇流特性各年有所差异,表现为汇流参数具有随机性;径流、洪水的随机性导致水利水电工程的兴利效益和安全程度显示出随机性;等等。水文现象的随机性如何度量和应用可以称为水文水资源随机性问题。水文水资源随机性问题常通过概率统计方法^[4]、随机过程理论和时间序列分析技术^[5,6]来解决,形成了水文统计和随机水文学分支,这在水文学中逐渐形成了一条统计分析途径。经过多年的探索和实践,已成为一条技术成熟、应用广泛的分析途径。

水文学中研究对象繁多,其中有些对象的概念客观上难以给出确定性的描述,这是因为这些概念没有明确的界限,这种概念的外延的不确定性称为模糊性(fuzzy)。例如,汛期与非汛期难以用某一个时刻来划分,年径流的“丰、中、枯”、洪水的“大、中、小”、水体质量的“清洁”与“污染”找不到明确的划分标准,湿润地区、半干旱地区与干旱地区没有明确分界线,等等。事物或现象模糊性的本质是由于从差异的一方到差异的另一方,中间经历一个从量变到质变的连续过渡过程,即概念具有差异的中介过渡性。由中介过渡性而产生划分上的不确定性即为模糊性^[7]。事实上,模糊性是排中律的一种破缺,在那里,概念本身没有明确的外延,一个对象是否符合这个概念难以确定,不是“非此即彼”,而是“亦此亦彼”。水文现象的模糊性作为一种不确定性已被人们普遍接受并在水文学科中得到了深入的研究和广泛的应用^[8~10]。水文现象模糊性如何度量和应用可以称为水文模糊性问题。水文模糊性问题用模糊分析方法进行探讨,形成了模糊水文学,其体系包括模糊识别方法、模糊综合评价方法、模糊决策分析、模糊预测和模糊推理方法等内容。

人类认识能力的不足、测试手段的限制、观测资料的短缺加之水文水资源系统极其复杂,导致水文现象的影响因素不完全清楚,系统结构不完全知道,运行机制和状态不完全了解,因素间的关系不完全明白。从信息论观点看,水文水资源系统的部分信息已知、部分信息未知,是一个灰色系统^[11]。这种部分已知、部分未知的信息称为灰色(grey)信息,由灰色信息导致的不确定性称为灰色性。水文水资源系统中的灰色性无处不在,如水文变量由于信息不充分表现为灰变量,变量间的关系表现为灰色关联性,水文模型结构表现为灰结构,模型参数表现为灰数。水文现象灰色性如何度量和应用可以称为水文水资源灰色性问题。从灰色性出发研究水

文水资源系统的变化特性形成了灰色水文学^[12],其内容包括灰色信息度量方法、灰色关联分析方法、灰色预测模型、灰色评价和决策方法等。

水文现象中除了随机性、模糊性和灰色性外,还存在其他的不确定性,如分形性(fractal)、混沌性(choas)、未确知性等。分形性、混沌性在水文学研究中得到了足够的重视并获得了一定的研究进展^[13,14],但在水文学中的应用还处在探索阶段。“未确知性”是一个新概念,它是纯主观上、认识上的不确定性。未确知性不同于随机性、模糊性、灰色性,纯粹是由于条件的限制对已经发生的问题认识不清而产生的不确定性。研究未确知性而产生了未确知数学^[15]。目前,未确知性作为一种特殊的不确定性,值得在水文学领域广泛探索和深入研究。

1.2 水文不确定性分析方法

水文学不仅是一门地球科学,也兼有技术科学的特点,因此它涉及的水文现象具有复杂性。要完整地分析、描述水文现象的变化规律,不仅需考虑其确定性,而且还要考虑其多种不确定性。随着科学技术的进步,各种不确定性问题日益成为国内外水文水资源界的研究热点和重点,得到了迅速发展,出现了许多基于不确定性分析为核心的水文系统分析方法,如考虑水文随机性建立了随机分析法,考虑水文现象的模糊性建立了模糊分析法,考虑水文灰色性建立了灰色分析法,考虑水文分形性和混沌性建立了分形混沌分析法,考虑水文未确知性建立了未确知数学分析法,考虑水文综合不确定性建立了集对分析法。为了提高水文分析计算、预测和评价与决策的可靠性,各种不确定性分析方法相互有机耦合,取长补短,出现了各种各样的耦合分析途径^[16]。限于篇幅,本书重点对应用较为广泛的水文随机分析法、水文模糊分析法、水文灰色分析法、水文集对分析法及其耦合途径进行较系统地论述。

1.2.1 水文随机分析法

水文随机分析法是研究水文现象(单变量、多变量、随机过程)随机变化特性的系统方法,主要包括概率论及数理统计、随机过程理论和时间序列分析技术。随机分析法在水文学中的应用已取得了丰硕的成果,内容非常丰富。本书选择下列三方面进行重点论述。

1.2.1.1 水文频率分析计算

水文频率分析计算^[17,18]主要是利用概率论及数理统计研究单一水文变量的概率分布型式、统计参数估计、经验频率计算和水文设计值合理确定等问题。水文频率分析计算是水文随机分析计算的核心内容,占有非常重要的地位。

1.2.1.2 水文相关分析计算

水文水资源系统是一个多变量相关的复杂系统,各种水文变量之间存在一定的关系,其随机变化特性的客观描述需要采用多变量相关分析途径。多变量水文相关分析计算包括多元频率分析计算、多变量相关分析和回归计算及多变量函数频率分析计算等内容。多元频率分析计算和多变量回归分析计算是重点,前者已有一定的研究成果,如正态变换法、经验频率分析法、多元分布转化为一元分布法^[19]等,后者被广泛应用于水文学研究和生产实际中,但由于多元联合概率分布难以确定,使得多元频率分析计算进展缓慢,不过近年来出现的 Copula 函数联结法为此提供了一条新的研究途径^[20]。

1.2.1.3 水文过程随机分析

在水文系统中,水文工作者还会经常遇到大量的水文过程(又称水文时间序列),如年平均流量过程、月平均流量过程、日降雨量过程、洪水过程等。对于这样的水文过程,其统计特性和随机变化规律需要用随机过程理论和时间序列分析技术进行探讨,因此形成了水文过程随机分析途径^[5,6]。水文过程随机分析途径包括水文过程随机变化特性分析和随机水文模型建立及其应用两方面的内容。水文过程随机变化分析途径已基本成熟,其核心是建立随机水文模型。

就目前成熟、应用较多的随机水文模型而言,可归纳为 3 类^[6]:①回归类模型。这类模型结构简单,概念清晰,参数不多,易于实现。其代表为单、多变量平稳和非平稳 ARMA(p, q)模型。②解集类模型。解集模型的特点是能同时保持总量和分量的统计特性和协方差结构,且分量之和等于总量。③具有物理基础类模型。所谓物理基础,是指在建模时,将统计上的推论与水文形成物理机制的合理分析有机结合起来,使得模型结构和模型参数具有一定物理意义。为了探索更合适的随机模型,水文水资源工作者近 20 多年来展开了大量的研究工作,提出了多种随机模型^[6],如非参数随机模型、非线性随机模型(门限自回归模型、人工神经网络模型等)、基于小波变换的组合随机模型、基于 Copula 函数的随机模型^[21,22]等。

1.2.2 水文模糊分析法

模糊分析法是探讨对象模糊性的系统方法。1965 年美国著名教授 Zadeh 首次提出了模糊数学和模糊控制的概念,并给出了模糊集(fuzzy sets)、模糊算法(fuzzy algorithm)、模糊控制(fuzzy control)等相关理论。将模糊数学应用水文水资源领域的分析计算、预测预报、评价决策和推理中,经过 20 年来的深入探索,取得了显著的进展和成功的应用,已初步形成了水文模糊分析方法^[8~10],主要包括以下几个方面的内容。

1.2.2.1 水文模糊聚类与识别

水文模糊聚类分析就是根据水文现象的模糊性,在没有已知分类标准情况下对研究对象进行分类。这类应用研究较多,例如,用水文模糊聚类分析对历史洪水资料进行分类,然后建立分类洪水预测模型;基于模糊等价关系的传递闭包法将全国29个省、市和自治区的水资源分为7类;将模糊聚类与随机模拟法相结合用于模拟多站月径流序列;提出模糊 c -值聚类算法并用于水文预报;建议模糊粗糙聚类法并对水文过程的遍历性特征进行研究;基于模糊聚类、主成分分析提出水文分区方法,等等。水文模糊聚类与识别就是根据水文现象的模糊性,合理测度待识别样本对各标准模式的接近程度。水文模糊聚类与识别在水文学中的应用广泛,其代表作可参见文献[8]~[10]。

1.2.2.2 水文模糊综合评价与决策分析

水文模糊综合评价就是在已知评价标准下根据评价对象的模糊性进行的综合评价分析。水文模糊综合评价的应用研究十分丰富,例如,提出了区域水资源开发利用的信息熵-模糊物元综合评价模型,建立水资源综合价值的模糊-灰色关联分析评价模型,建立基于集对分析-模糊集合论的水体富营养化评价二级模型,提出基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型,等等。

水文模糊决策分析是研究在模糊决策环境下或在模糊系统中从水文水资源决策论域(如可行方案)中选择最优对象的数学理论和方法。水文模糊决策分析也取得了显著进展,例如,提出了分层模糊优选模型并用于流域综合开发方案的优选中,建议了具有模糊偏好信息的冲突分析方法并用于水库防洪库容选择中,建立了基于模糊集理论和灰色关联分析的模糊加权关联度模型,尝试了直觉模糊集下的理想点法模型并用于解决供水工程的方案选择问题,探讨了防洪系统调度的模糊决策法,等等。

1.2.2.3 水文模糊预测与推理

水文模糊预测或推理就是根据水文现象的模糊性建立模型进行水文预测或推断。模糊预测模型大体有以下几类:①模糊聚类预测模型。②模糊模式预测模型。③以模糊分析为框架的组合模型,如模糊带权马尔可夫链模型、模糊神经网络模型、模糊小波网络模型、模糊贝叶斯组合模型。④模糊推理预测模型。模糊推理预测模型包括以下几种模式:①单因子模糊推理模式,即利用水文要素自身的前期 m 个资料作为多输入,将第 $m+1$ 个资料作为单输出,建立模糊推理模式。②多因子模糊推理模式,即将水文变量的多个影响因子作为模型输入,要预测的水文变量作为模型输出构建的模糊推理模式。③基于可变模糊集理论的水文变量预报单要素

近似推理模式。这些模型在水文水资源学中已得到了初步研究和应用。

1.2.3 水文灰色分析法

水文灰色分析法是利用灰色理论探讨水文现象灰色性的系统方法。灰色理论是 20 世纪 80 年代由中国学者邓聚龙首次提出的^[11],包括灰元素、灰集合、灰参数、灰结构、灰模型、灰关系、灰拓扑空间等内容。随后将之引入到水文学中并开展了一系列的探索和应用,初步形成了水文灰色分析法^[12]。水文灰色分析法的研究和应用包括以下几方面的内容。

1.2.3.1 灰色关联分析

灰色关联分析是水文灰色分析法的一个重要内容,它用灰色关联度来表征灰色水文量间关系的程度。灰色关联分析在水文系统的分析计算、预测和评价中得到了大量的应用,如通过灰色关联度的大小来选择相似流域、识别水文变量的主要影响因子,由灰色关联度构造灰关联模式识别方法进行水文水资源评价,通过灰色关联度建立灰关联模式预测模型进行水文水资源预测,等等。

1.2.3.2 灰色聚类分析

灰色聚类就是根据研究对象的灰色性利用灰色白化权函数对研究对象进行的分类评价方法,即判断所属灰类。灰色聚类的关键在于白化权函数的确定。灰色聚类法已成熟且在水文分析、评价和决策中得到了普遍的应用。

1.2.3.3 GM 预测模型

GM 模型是水文灰色分析法的另一个重要内容,包括 $GM(1,1)$ 、 $GM(1,N)$ 、 $DHGM(2,2)$ 模型和灰色自记忆模型,它们目前已成功地用于水文预测中。

1.2.3.4 灰色信息熵法

根据水文现象的灰色性提出了差异信息的灰色信息熵量度方法。该法认为,某一水文序列各分量值的差异性越大,序列所包含的信息量就越大;无差异时,其信息量为零。灰色信息熵法可以量度水文变量(降雨量、流量、水位、水质、蒸发等)信息量的多少和变异特性,在水文分析计算中有一定的应用。

1.2.4 水文集对分析法

1989 年在内蒙古包头召开的全国系统理论与区域规划会议上,中国学者赵克勤基于哲学中的对立统一和普遍联系的观点,提出了一种新颖的不确定性分析途径——集对分析法。集对分析法的核心思想是对不确定性系统的两个有关联的集

合构建集对,再对集对的特性做同一性、差异性和对立性分析,然后建立集对的同异反联系度,其突出优势是能从整体和局部上分析研究对象间内在的“关系”。集对分析法可以同时考虑多种不确定性,本书暂称之为综合不确定性。目前,集对分析在信息科学、管理科学、地理科学、教育、医学等众多领域得到了广泛应用,取得了不少研究成果^[24]。近年来,集对分析在水文水资源学中的应用也取得了一些研究成果和进展,主要表现在以下几个方面^[25]。

1.2.4.1 基于集对分析的水文分析计算

将集对分析应用于水文分析计算中,建立了水文集对分析计算方法,例如:提出用集对分析刻画水文变量之间微观上的相关结构并探讨了基于集对分析的因变量主要影响因子的识别方法;建立了基于集对分析原理的水文频率曲线拟合优劣评判方法;建立了基于集对分析的径流丰枯分类、流域汛期分期和水文系统相似性选择的方法;运用集对分析研究了径流丰枯空间和时序变化特性,提出了基于集对分析的洪灾系统风险分析方法,等等。

1.2.4.2 基于集对分析的水文评价和决策分析

基于集对分析原理建立了水文水资源评价方法体系,如一般集对分析评价法、模糊集对评价法、模糊聚类集对评价法。这些方法在水文水资源系统评价或决策中得到了一定的应用,如用于水体富营养化评价、水环境承载能力评价、区域水资源开发利用程度评价、生态环境脆弱性评价、流域水资源安全评价、梯级水库的补偿效益方案优选决策、灌区改造工程方案优选决策,等等。

1.2.4.3 基于集对分析的水文预测

基于集对分析建立了水文集对预测模型,例如,基于联系度的水文径流量状态预测方法、集对最近邻抽样预测模型、秩次集对预测模型、集对分析聚类预测方法。这些模型(方法)在水文预测预报中得到了初步的应用。

1.2.5 水文耦合分析途径

除了上述单一不确定性分析途径外,近20多年出现一些不确定性耦合分析途径。所谓耦合途径指将两种或两种以上的单一途径按需要有机地结合以妥善地解决不确定性问题。这种耦合途径可充分发挥各单一途径的优势,弥补其缺陷,产生好的效果。当前耦合途径获得广泛关注,日益受到重视。本书特设专章论述。耦合方式众多,限于篇幅,本书重点介绍几种主要的耦合方式,如随机和模糊分析法的耦合、随机和灰色分析法的耦合、模糊和灰色分析法的耦合、灰色、随机和模糊分析法的耦合、随机和集对分析法的耦合、集对和模糊分析法的耦合等。需要指出,

就狭义而言,耦合途径通常指单一分析途径之间的相互耦合,但就广义而言,还包括单一途径和新的分析技术之间的耦合,如随机和小波分析技术的耦合、模糊和联想记忆网络技术的耦合、混沌和小波分析技术的耦合等。本书在广义情况下论述各种耦合途径。这些耦合方式在水文水资源分析计算、预测、评价及决策中均获得了较为广泛的研究和应用。

1.3 本书目的与内容

1.3.1 本书目的

水文水资源不确定性分析研究和应用历来受到人们的关心和重视。近 20 年来,水文水资源不确定性分析研究和应用获得了异常迅速发展,就其原因大致归纳为三个方面:①水文水资源所面临的问题越来越复杂,水资源系统不断扩大,各因素相互作用的影响多样化,不确定性的成分增多并且显示出主导地位,迫使人们在处理水文水资源的许多问题时不能回避不确定性分析和计算问题。②随着经济社会的迅速发展,人类对提高环境质量和保障安全的基本要求不断提高,特别是对水环境、供水保证和防洪安全等的要求日益提高。为科学处理这些问题,必须引入可靠性的概念,加强风险意识。显然,当涉及可靠、风险问题时就很自然地要分析研究系统中的各种不确定性。③近 20 多年,新的理论、技术和方法不断地引入水文水资源学科。例如,随机过程理论、时间序列分析技术、模糊集理论、灰色理论、分维分形分析技术、混沌理论、人工神经网络分析技术、小波分析等逐一引入,促进了水文水资源的不确定性分析和研究。特别是计算机技术的不断发展和日益普及,使极其复杂的计算得以实现,这大大加速了不确定性分析技术和方法在水文水资源系统中的研究和应用,推动了不确定性分析研究的快速发展。

当前不确定性分析方法已成为复杂性科学中最重要的方法之一,水文学不确定性分析方法在水文水资源学中具有重要地位。为了进一步加强不确定性分析方法的科学性和提升实用性以及适应水文水资源分析计算的更多、更高要求,从科学方法论的高度,在现有各种分析方法的基础上对当前不确定性方法做综合、归纳、总结,无疑是十分必要的。本书正是基于上述需求和在科技基础性工作专项项目资助下撰写的,具有以下特色。

1. 综合性

本书从方法论角度,将现有应用较为广泛的几种不确定性方法有机地综合在一本书中,既阐述各种方法,又注重相互联系。更为突出的是在水文不确定性分析法的总体框架下,论述几种主要不确定性分析方法的地位、作用和特点,让读者全面、深刻地理解水文水资源不确定性分析法的实质及其各种方法之间的共同点和