



Intelligent Watershed
Management

智能流域管理研究

刘 永 邹 锐 郭怀成 等 著



科学出版社

智能流域管理研究

刘 永 邹 锐 郭怀成 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

流域管理是有效应对目前全球范围内水资源短缺、水环境污染和水生态退化等问题的可行模式,但在目前的流域管理研究与决策中,存在着一些亟待解决的关键问题,如无效信息收集、模型滥用及决策非最优化等。为此,如何构建一个高效的流域管理决策模式,就成为国内外的研究热点。本书基于仿生学原理,提出了智能流域管理概念,构建了包含“大脑篇——因果关系之机理表达”、“智慧篇——优化之决策”和“感官篇——流域信息的获取、集成与反馈”等在内的关键技术体系,并结合案例展示了模型方法在国内外流域决策中的应用。

本书可供环境科学、生态学、流域科学、湖沼学等学科的科研人员、高等学校师生及政府部门有关人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能流域管理研究 / 刘永等著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033969-0

I. 智… II. 刘… III. 智能模拟 - 应用 - 流域环境 - 环境管理 - 研究 - 中国 IV. X321.202-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 060239 号

责任编辑: 李 敏 刘 超 / 责任校对: 朱光兰

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计

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>

随 主 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 4 月第一次印刷 印张: 20 1/2

字数: 400 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近几十年来,全球范围内的水资源短缺、水环境污染和水生态退化趋势加剧,湖泊富营养化、河口与湖泊低氧、有毒藻类水华暴发等已成为亟待解决的全球性环境问题。在我国,随着20世纪80年代后期快速的工业化、城镇化和农业现代化进程,水环境问题已经从陆域延伸到近海水域与河口、从单一污染发展到复合型污染,常规污染物、有毒有机物、重金属、藻毒素等水污染衍生物相互作用,形成复杂的流域性污染态势,对公众健康与经济社会可持续发展造成巨大障碍。在此背景下,自20世纪80年代开始,在全球范围内开展了大量针对不同尺度流域的综合管理研究与实践。但分析大量的流域综合管理案例后发现,在目前的流域管理研究与决策中,普遍存在着无效信息收集、模型滥用以及决策非最优化的问题;大量的模型开发与构建却无法回答流域管理与决策中的根本问题。在此前提下,究竟如何构建一个流畅高效的流域管理决策模式,成为摆在流域管理研究者与决策者面前的一个共同问题。

自20世纪90年代以来,本研究团队一直在中国与美国从事流域模拟、水质模型及流域管理优化决策等方面的研究,在此过程中也一直在思考与探索合适的流域管理与决策模式。最近几年来,在充分反思现有流域研究的基础上,经过频繁讨论、逐步酝酿,明确提出了智能流域管理(intelligent watershed management, IWM)的概念与思想,并开展了相关的理论构建、关键技术研发与案例应用研究,希望能通过提出的理念与关键技术回答目前流域管理中亟待解决的难点和决策模式问题。2009年11月,在中国武汉召开的第13届世界湖泊大会(The 13th World Lake Conference)上,由邹锐博士代表本团队首次完整地诠释了智能流域管理的提出缘由、理论体系与方法框架。此后,我们开始在中国和美国开展系统的理论完善、集成技术研发及应用推广研究,如“水体污染控制与治理科技重大专项”滇池项目和美国Los Angeles流域非线性模拟-优化研究,均取得了显著成果;在后者的研究过程中所开发的非线性区间数映射重构(NIMS)算法及其在大规模流域模拟-优化方面的成功应用,带来了流域管理智能化领域的重大技术突破。

为系统梳理和展示本团队这些年对智能流域管理科学体系探索的阶段性研究成果,本书第1章首先对智能流域管理(IWM)的概念作了界定;提出智能流域管理是以流域整体为对象,模仿人在决策中由感官至大脑的形成智慧的行为过程,因此,它实际上是仿生学原理在流域管理中的一种延伸。智能流域管理基于仿生学原理、以最优化为目标并以流域中人类活动与水体水质的响应因果关系为

纽带；其主要步骤包括流域信息获取、输入-输出因果关联模拟以及优化与适应性决策。在第1章绪论所介绍的智能流域管理总的框架体系下，本书接下来又分3篇11章逐步展开概念讨论、模型技术与算法以及案例研究等相关内容。

(1) 第一篇界定为“大脑篇——因果关系之机理表达”，主要探讨智能流域管理的因果关联及输入-输出响应、流域层面的因果关联定量表达、水体层面的因果关联定量表达、模型参数估值及不确定性分析、流域-水体因果关系的集成等方面的内容。

(2) 第二篇界定为“智慧篇——优化之决策”，主要分析了形成智慧型最优流域决策的主要步骤，探讨了流域管理的智慧型决策框架、流域智慧型决策之线性规划模型、流域智慧型决策之模拟-优化模型、流域智慧型决策之适应性最优演化模型等方面的内容，并结合案例分析探讨了相关的新算法与模型开发。

(3) 第三篇界定为“感官篇——流域信息的获取、集成与反馈”，主要分析了流域数据信息获取与集成以及流域数据库设计与开发等方面的内容。

尽管智能流域管理是一个探讨性的新尝试，但在最近的研究中却日益发现了其重要的价值。新概念的提出总会存在不足，希望本书的工作能够推动流域管理与决策领域的深入讨论与思考，并促进更多相关问题的提出、发掘、探讨与解决，从而更好地为未来科学流域管理决策提供坚实的支撑。

本书是团队集体智慧的结晶。全书由刘永、邹锐、郭怀成总体设计并主笔，参与本书各章节写作的还有：周璟（第3、6、11章）、董菲菲（第7、9、12章）、张祯祯（第2、5章）、刘年磊（第8章）、颜小品（第4、11章）、盛虎（第1章）、阳平坚（第10章）、朱翔（第4章）、赵磊（第2章）、毛国柱（第8章）。在团队的共同努力下，几经修改并由邹锐、董菲菲、郭怀成、刘永最终定稿。

本书的研究与出版得到了国家水体污染控制与治理科技重大专项（编号：2008ZX07102-001）、国家自然科学基金（41101180）与北京大学“百人计划”专项经费的资助。在本书的写作与相关研究的开展过程中，得到了美国 Tetra Tech 公司的3个研究案例（Lake Maumelle、Lake Clear 流域、River Wissahickon）的支持，在此表示由衷的感谢！本书的部分案例基础数据来自于云南省环境科学研究院的调研与监测，感谢贺彬院长所给予的帮助与支持！

本书是北京大学环境科学与工程学院流域科学实验室（Peking University Watershed Science Lab）的成果之一，敬请访问我们的主页（<http://www.pkuwsl.org/>），以了解更多的内容、本书补充材料及流域科学最新研究进展。由于作者的知识 and 经验有限，加之相关研究尚处于起步阶段，书中难免出现疏漏，殷切希望各位同行能不吝指正。

作 者

2011年8月于燕园

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流域管理的科学问题与决策需求	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 科学问题	3
1.1.3 决策需求	4
1.1.4 研究目的	4
1.2 流域模拟与决策模型研究进展	5
1.2.1 流域模拟模型研究进展	6
1.2.2 流域决策模型研究进展	11
1.3 智能流域管理	15
1.3.1 概念缘由	15
1.3.2 概念界定	16
1.3.3 关键问题	19
1.3.4 模型框架	21
1.3.5 讨论：IWM 的生命周期	23

大脑篇——因果关系之机理表达

第 2 章 智能流域管理的因果关联及输入 - 输出响应	27
2.1 智能流域管理决策的因果关联与响应模拟	27
2.1.1 因果关联的概念及必要性	27
2.1.2 因果关联网络构建与响应模拟	29
2.2 案例研究：云南程海外流域调水工程的水质 - 水生态响应	32
2.2.1 研究背景	32
2.2.2 程海富营养化机制的神经网络模拟及响应情景分析	33
2.2.3 程海水位调控的水质 - 水生态响应预测	43
2.3 本章小结	50

第3章 流域层面的因果关联定量表达——流域污染物输移模拟	52
3.1 流域层面的因果关联界定	52
3.1.1 流域水循环及关联因素	52
3.1.2 流域碳循环及关联因素	54
3.1.3 流域营养物质输移及关联因素	55
3.2 流域污染物输移过程与模拟	56
3.2.1 流域污染物输移过程	56
3.2.2 流域污染物输移模拟	57
3.3 流域污染物输移常用模型	59
3.3.1 模型概览	59
3.3.2 HSPF 模型	60
3.3.3 LSPC 模型	63
3.3.4 SWAT 模型	64
3.4 案例：美国 Maumelle 湖流域非点源模拟研究	64
3.4.1 流域背景	64
3.4.2 HSPF 流域模型	66
3.4.3 HSPF 模型模拟结果与分析	67
3.5 本章小结	83
第4章 水体层面的因果关联定量表达——水质－水生态响应模拟	85
4.1 水体层面的因果关联界定与响应过程	85
4.1.1 水动力－水质过程	86
4.1.2 水质－水生态响应过程	87
4.1.3 水体层面的因果关联网络构建	90
4.2 水动力－水质－水生态响应模拟	92
4.2.1 模拟模型概述	92
4.2.2 常用模型：EFDC	98
4.2.3 常用模型：CE-QUAL-W2 模型	104
4.2.4 常用模型：WASP	107
4.3 案例（I）：浅水湖泊生态系统对人类干扰脆弱性的数值模拟研究	108
4.3.1 湖泊生态系统的干扰脆弱性	108
4.3.2 异龙湖水质－水生态模拟模型构建	108
4.3.3 模拟结果与情景分析	110
4.3.4 主要结论	114
4.4 案例（II）：基于三维水质－水动力模型的滇池富营养化	

控制 TMDL 研究	114
4.4.1 滇池富营养化控制与模型需求	114
4.4.2 滇池三维水质 - 水动力模型开发	115
4.4.3 模型校验和结果讨论	118
4.4.4 TMDL 情景分析	123
4.4.5 主要结论	125
4.5 本章小结	126
第 5 章 模型参数估值及不确定性分析	128
5.1 模型参数估值及不确定性分析方法	128
5.1.1 参数估值方法	128
5.1.2 不确定性分析方法	130
5.2 案例 (I): 基于交替适应度遗传算法的稳健性水质模型方法	131
5.2.1 研究背景	131
5.2.2 稳健性水质模型方法	132
5.2.3 数值案例	136
5.3 案例 (II): 自适应神经网络内嵌遗传算法及应用	141
5.3.1 方法介绍	141
5.3.2 复杂富营养化模型逆向参数估值案例	144
5.4 案例 (III): 基于简单机理模型与贝叶斯推断算法的美国 Chesapeake 湾低氧分析	152
5.4.1 研究背景	152
5.4.2 模型方法	153
5.4.3 参数估值	155
5.4.4 结果	156
5.4.5 讨论: 流域负荷削减决策	159
5.5 本章小结	160
第 6 章 流域 - 水体因果关系的集成——流域污染物输移的水质 - 水生态 响应	162
6.1 流域 - 水体因果关系集成的界定	162
6.2 流域污染物输移的水质 - 水生态响应模拟	164
6.3 案例: 美国加利福尼亚州明湖流域集成因果关联网研究	166
6.3.1 研究背景	166
6.3.2 流域描述	167
6.3.3 数据清单	168

6.3.4 模型选择与方法	169
6.3.5 结果与讨论	180
6.4 本章小结	183

智慧篇——优化之决策

第7章 流域管理的智慧型决策框架	187
7.1 智慧型决策的界定	187
7.2 流域智慧型决策模型框架	188
7.2.1 流域决策的优化模型需求	188
7.2.2 流域决策的不确定性	191
7.3 本章小结	192
第8章 流域智慧型决策之线性规划模型	193
8.1 流域决策的不确定性规划模型	193
8.1.1 概述	193
8.1.2 随机规划和模糊规划	194
8.1.3 区间规划模型	196
8.1.4 模型对比分析	198
8.2 传统区间数线性规划模型	200
8.2.1 模型方程与求解方法	200
8.2.2 传统 ILP 模型的决策有效性探讨	202
8.3 风险显性区间线性规划模型	202
8.3.1 模型推导与求解	203
8.3.2 REILP 模型数值案例与讨论	206
8.3.3 案例：基于 REILP 模型的流域污染负荷削减决策	210
8.4 本章小结	224
第9章 流域智慧型决策之模拟-优化模型	226
9.1 流域智慧型决策与模拟-优化方法	226
9.2 常用的模拟-优化模型算法	227
9.3 模拟-优化的非线性区间映射重构算法	229
9.3.1 非线性区间映射重构	229
9.3.2 REILP 模型和 IMS 过程	231
9.3.3 基于模拟-优化模型的 NIMS 过程	232
9.4 案例：流域污染负荷削减的模拟-优化模型	233

9.4.1 案例背景	233
9.4.2 模型方程	235
9.4.3 遗传算法构建	236
9.4.4 NIMS 过程公式化	237
9.4.5 结果与讨论	239
9.5 本章小结	243
第 10 章 流域智慧型决策之适应性最优演化模型	245
10.1 流域智慧型决策的“时”与“势”	245
10.2 流域决策的适应性管理模式	246
10.3 流域决策的适应性演化模型框架	247
10.3.1 模型框架思路	247
10.3.2 决策实施优选方法	248
10.3.3 流域适应性决策方法	252
10.4 基于风险的流域污染负荷削减最优适应性决策	252
10.4.1 模型方程	252
10.4.2 模型结果	253
10.4.3 决策讨论	255
10.5 本章小结	258

感官篇——流域信息的获取、集成与反馈

第 11 章 流域调查与数据信息	261
11.1 信息获取：起点还是终点	261
11.2 信息需求：目标导向与因果关联	262
11.3 信息获取：基本途径	263
11.3.1 基于 IWM 的数据需求识别	263
11.3.2 流域调查与监测方案制订	264
11.3.3 模型与数据的互动	268
11.4 本章小结	268
第 12 章 流域信息集成与数据库开发	270
12.1 流域信息集成	270
12.1.1 智能流域管理的信息系统	270
12.1.2 信息筛选与整理	272
12.2 流域数据库设计	273

12.2.1 思路 273	273
12.2.2 数据库设计 275	275
12.3 流域数据库开发 278	278
12.3.1 数据库开发与信息存储 278	278
12.3.2 信息集成与决策准备 279	279
12.4 本章小结 281	281
参考文献 282	282
附录 312	312

第1章 绪 论

1.1 流域管理的科学问题与决策需求

1.1.1 研究背景

近几十年来，随着在全球范围内人们对地表水水质恶化及水生态系统退化等问题的认识不断加深，各种综合的污染控制和生态修复措施也不断更新；但湖泊富营养化（eutrophication）、河口与湖泊低氧（hypoxia）以及有毒藻类水华（harmful algal bloom）暴发等问题依旧突出且亟待解决（Diaz and Rosenberg, 2008；孟伟等，2004，2008；Conley et al.，2009）。就我国而言，20 世纪 80 年代以来社会经济的飞速发展在极大地提升了我国综合竞争力的同时也带来了严重的水环境问题，不仅造成了巨大的经济损失，而且给公众健康带来了极大的风险，影响了社会稳定和环境安全，制约了经济社会与环境的协调发展（刘鸿亮和李小平，2007）。根据 2011 年环境保护部发布的《2010 年中国环境状况公报》，在我国 7 大水系 204 条河流的 409 个国控断面中，水质为 I 至Ⅲ类、Ⅳ至Ⅴ类、劣Ⅴ类的断面所占比例分别为 59.9%、23.7% 和 16.4%；湖泊（水库）富营养化问题依然突出，在 26 个被监测营养状态的湖泊（水库）中，有 53.8% 处于富营养化状态。水环境问题已成为经济社会可持续发展的瓶颈，水环境保护工作面临的压力也越来越大，加强水污染控制与治理工作已刻不容缓。

作为水文循环过程和污染物传输的基本单元，流域是开展水污染控制、生态修复和综合管理的最适宜空间尺度（蔡庆华等，1997；魏晓华和孙阁，2009）；在“十一五”之前，我国的流域管理长期采取的是一种分散化、以行政辖区为基础的管理模式，因而割裂了流域内水文与生态系统固有的完整性（钱正英和张光斗，2001；李恒鹏等，2004；杨桂山等，2004）。自“十一五”开始，为有效应对我国严峻的水环境现状，国家对水环境保护和水污染控制与治理工作也提出了新的要求：在国务院《关于落实科学发展观加强环境保护的决定》中，把“以饮水安全和重点流域治理为重点，加强水污染治理”列为我国优先解决的首要突出环境问题；《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020 年）》在

环境优先领域中，也明确提出了“实施区域环境综合治理，开展流域水环境综合治理”的思路；《国家环境保护“十一五”科技发展规划》将“流域（区域）水污染控制”作为重点发展领域与优先主题，并将流域（区域）水污染物总量控制与分配作为关键技术加以研发；2010年1月27日，温家宝总理主持召开国务院常务会议，讨论并原则通过《国家环境保护“十一五”规划中期评估报告》，会议强调“继续抓好治污减排，深入开展重点流域区域污染防治”；2011年，国务院又相继召开对重点流域及长江中下游流域水污染防治“十二五”规划的专题会议，继续强调要解决突出的流域水环境问题，促进流域经济社会可持续发展；2011年7月召开的中央水利工作会议，再次强调了要着力推进水生态保护和生态环境治理，坚持保护优先和自然恢复为主，维护河湖生态系统健康。2011年12月15日，国务院印发《国家环境保护“十二五”规划》，提出要继续深化重点流域水污染防治，并加大对水质较好流域的保护。

与此同时，国家和地方启动了多项涉及水环境保护宏观战略、综合治理规划以及科技支撑研究等战略性、基础性和示范研究。在这些研究中，重点强调以流域为尺度的水环境管理与治理新思路。其中，具有战略和示范效应的重大项目主要有3个。

1. 中国环境宏观战略——水环境保护专题研究

2007年启动的水环境保护专题研究项目，在对我国环境与经济社会可持续发展的瓶颈问题深入剖析的基础上，系统分析和评估了我国环境污染的现状和演化趋势，从全国、区域、流域尺度上判断我国的水环境形势，并围绕经济和环境协调发展这一主题，预测我国未来将面临的重大水环境问题。在分析国内外流域水污染防治的经验和教训的基础上，提出我国水环境保护的六大转变：①从单纯点源治理向流域综合整治和上下游协调管理转变；②从单纯重视末端治理向全过程控制和管理转变；③从单纯的水质目标管理向水质、水生态统筹管理转变；④从水陆并行管理向水陆综合管理转变；⑤从目标总量控制向容量总量控制转变；⑥从单一的管理模式向“分类、分区、分级、分期”综合管理转变。同时，该研究还提出了我国水环境保护的三大战略和十大任务。

2. “全国重点湖泊水库生态安全评估与综合治理方案”项目

2007年无锡太湖蓝藻水华事件暴发以后，党中央、国务院给予了高度重视，温家宝总理先后3次就湖泊污染防治作出重要批示：“对我国几大湖泊的生态安全问题，要逐一进行评价，并提出综合治理措施”。之后，我国在2007年10月启动了包含太湖、巢湖、滇池等在内的“全国重点湖泊水库生态安全评估与综合

治理方案”项目。该项目以湖库所在的流域为基本评估和治理单元，系统分析了湖库及其流域生态安全的现状、变化与发展，提出评估指标体系和评估方法模型，并在此基础上逐一提出了各湖库的综合治理方案。

3. 水体污染控制与治理科技重大专项（简称“水专项”）

作为《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020年）》的重要组成部分，“水专项”于2008年启动。“水专项”以流域为基本的研究和示范尺度，旨在为中国水体污染控制与治理提供强有力的科技支撑，以期有效提高我国流域水污染防治和管理技术水平。“水专项”分三个阶段进行组织实施：第一阶段（“十一五”期间）的目标主要突破水体“控源减排”关键技术；第二阶段（“十二五”期间）主要突破水体“减负修复”关键技术；第三阶段（“十三五”期间）主要突破流域水环境“综合调控”成套关键技术。

1.1.2 科学问题

由前述分析可知，“十一五”以来我国的水环境保护和流域管理已经在保护思路和控制策略上发生了重大的转变，在此前提下，我国水环境保护的科学问题主要包含三个方面。

1. 全面应对流域管理所面临的三大转变

尺度转变：“十一五”期间的水污染防治与管理正从过去以行政区划为实施单元的模式向以流域为尺度的管理和控制转变；过程转变：“十一五”期间的水污染防治已从过去的点源集中治理向全流域“源头-途径-末端-汇”的全过程控制转变；思路转变：“十一五”期间的水污染防治与生态修复已开始从流域系统和水生态系统完整性的角度考虑水质管理（孟伟等，2007）。

2. 持续夯实流域管理的技术与数据基础

流域管理的研究与实践主要包含两个方面的内容（李恒鹏等，2004）：①资源调控，包括流域尺度的资源综合优化调控技术、资源承载力与水质（水生态）恢复关联关系分析与模拟；②水质管理，即在水质管理目标下的流域水文与水污染物迁移转化过程模拟及“污染输入-水体水质”响应模拟、模拟-优化技术、污染削减措施和时空优化分配等。

就目前流域管理领域的研究现状而言，至少需在两个方面强化流域管理的基础：①模型理论框架选择及模型结构繁简度确定，这要求针对不同的管理目标、

系统特征以及数据条件进行系统分析,确定合适的模型框架以及复杂程度;②完善数据共享机制,促进多方研究人员的共同参与,并相互核对研究结果和模型输出,从而降低系统分析的不确定性,增强决策的可靠性与效率。

3. 定量分析流域管理面临的不确定性和风险问题

流域管理是涉及技术和社会经济因素的复杂系统决策问题,而当前实施的流域管理方法一般没有建立在适当的响应模型基础上,因此难以针对水污染防治过程中的不确定性与复杂性作出高效低风险的管理决策(Baresel and Destouni, 2007)。显然,为进一步提高流域管理的效率与可靠性,就需要一方面改进流域系统(如工业污染与产业布局、生活污水、土地利用方式、生态资源、水资源、人口、社会经济等)的动态模拟技术,强化定量表征系统复杂性与不确定性的能力;同时研发基于不确定性与风险分析评估的适应性管理机制,使得所确定的水环境容量和削减分配方案能够最大可能地反映水文过程、污染物迁移转化过程和模型本身的随机性以及社会经济的不确定性(刘永和郭怀成, 2008)。

1.1.3 决策需求

流域管理的决策需求包含两个方面:回答公众与各利益相关者的质询;提供科学与务实的决策方案。以湖泊水质恢复为例,流域管理决策需要回答如下问题:在现有及预期科技水平下,水质最大可能恢复到何种程度?流域的污染源空间和结构分布如何?流域尺度上能否达到社会经济发展与水环境保护的协调?在决策过程中应采用何种恢复方案以尽可能高效地产生水质水生态恢复效果?

1.1.4 研究目的

应该如何回答决策需求的问题以及应该采用什么样的流域管理和决策模式,这是流域管理决策过程中亟待解决的基本问题。为此,本书的研究目的在于:以我国水环境现状问题与预期发展趋势为基本出发点,系统分析我国流域管理的决策需求和科学问题,在此基础上提出能够有效满足我国流域管理决策需求的智能流域管理(intelligent watershed management, IWM)概念与理论方法体系;探索智能流域管理的基本研究方法框架及其组成,构建智能流域管理研究的理论和方法基础,并辅以案例研究,为我国目前的流域管理决策以及水环境改善工作提供科学和系统的支撑。

1.2 流域模拟与决策模型研究进展

流域管理与决策模型体系为流域综合管理提供了科学基础,该模型体系主要包括流域模拟模型与优化决策模型两个主要部分(图 1-1)。流域模拟模型主要解决流域管理中的“*What if*”问题,即通过模拟流域降雨、蒸发、下渗、产流、汇流等水文过程,动态跟踪流域污染物在陆地上和水体中的迁移转化过程,并仿真流域水生生态系统的演化过程;识别引起这些过程发生的重要因素及这些因素与过程之间的关系;提出协调生态环境保护和社会经济发展的备选决策方案,预测这些方案实施后对水质、水生态的影响;评估方案的可行性并选取最优方案以供实施,从而减少流域管理决策的主观盲目性。流域优化决策模型则主要是解决流域管理中的“*What the best*”问题,通过流域优化决策模型的构建与求解,生成在满足流域发展与水质水量约束的条件下,实现流域管理目标的最高效率的污染控制方案,为科学、高效地进行流域管理提供决策支持。

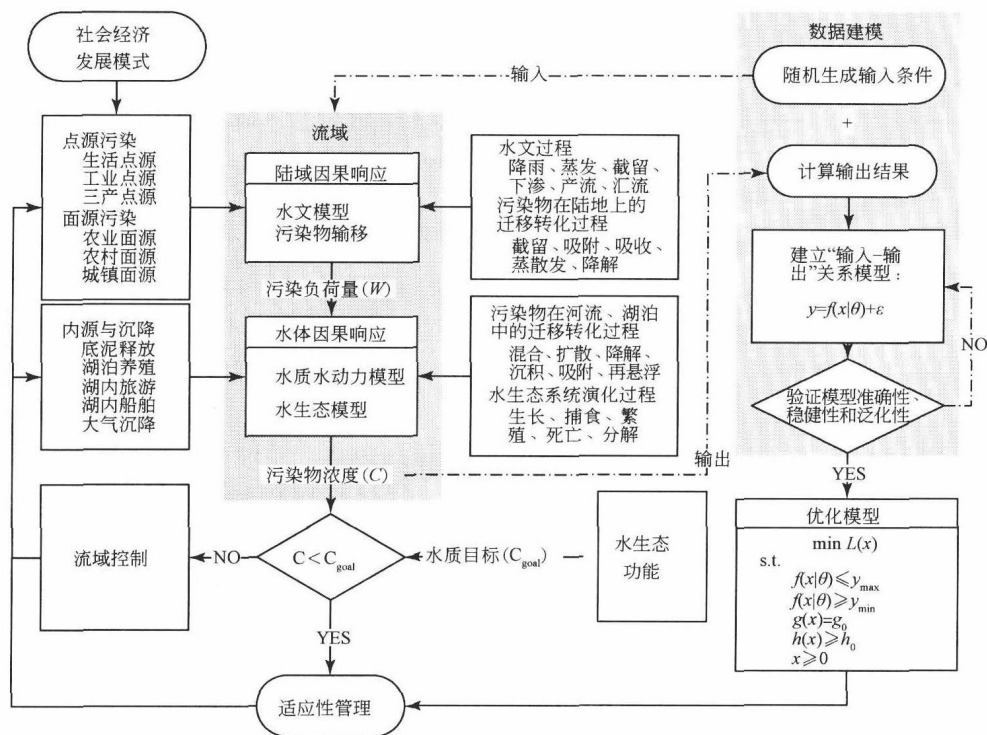


图 1-1 流域管理与决策模型体系

1.2.1 流域模拟模型研究进展

1. 水文模型研究进展

水文模型有着漫长而丰富的发展历程,它起源于19世纪对道路、沟渠、排水系统、大坝、涵洞、桥梁及供水系统等市政工程的设计过程中(Singh and Woolhiser, 2002)。从水文模型的发展阶段上看,大体上可以分为两个主要的阶段:基本模型阶段和流域模型阶段。

1) 基本模型阶段

经典的水文模型是从Mulvaney (1850)建立推理模型(rational method)用以预估小流域设计洪峰流量开始的。随后,Imbeau (1892)建立了单次暴雨事件降雨强度与径流峰值的关系模型。在20世纪初,研究人员提出了等时线的概念,将修正后的合理化方法模型应用于径流对降雨的时间响应关系中,如Sherman (1932)提出用来反映直接径流对降雨的响应关系的单位线(unit hydrograph)概念,开创了降雨径流模型的一个新时代。此后,关于单位线的研究层出不穷:Clark (1945)创立综合单位线(synthesis unit hydrograph)模型,估计无观测资料的流域对降雨的响应;Nash (1957)在线性系统理论的基础上提出了瞬时单位线(instantaneous unit hydrograph)理论;Dooge (1959)提出了广义单位线理论(a general theory of the unit hydrograph);Eagleson等(1966)运用线性规划求解单位线;Amorocho和Brandsteter (1971)利用非线性黑箱模型推求单位线;之后,多投入-单输出模型估计单位线被提出(Natale and Todini, 1977)。

下渗理论的提出则为水文模型的研究提供了重要的理论基础。早在1911年,Green和Ampt (1911)就尝试开发了基于简化物理学原理的下渗理论;此后,Horton (1933, 1939)提出了渗透理论,用于估计降雨径流量并发展了单位线分离技术,提出了坡面漫流的经验公式;Keulegan (1944)对坡面漫流进行理论研究并建议将方程的形式进行简化,同年Izzard (1944)在其基础上进行了实验分析;Horton (1945)提出由坡面漫流主导的侵蚀地貌发展及河川径流产流的概念,与此同时,Lowdermilk (1934)、Hursh和Brater (1944)观测了潮湿地区暴雨径流单位线的地下水组分的运动规律;1943年Hoover和Hursh (1943)报告了由表层流动态变化引起的暴雨径流产流机制;Roessel (1950)观测了河滨地下水量的动态变化;之后Nielsen等(1959)和Remson等(1960)的研究表明,坡地下部不饱和流能够在河滨饱和区域内产生地表径流。

地下水循环的研究是水文模型发展的一个重要部分。Fair和Hatch (1933)研究了土壤渗透率的计算公式;Theis (1935)结合Darcy公式和连续性方程建立