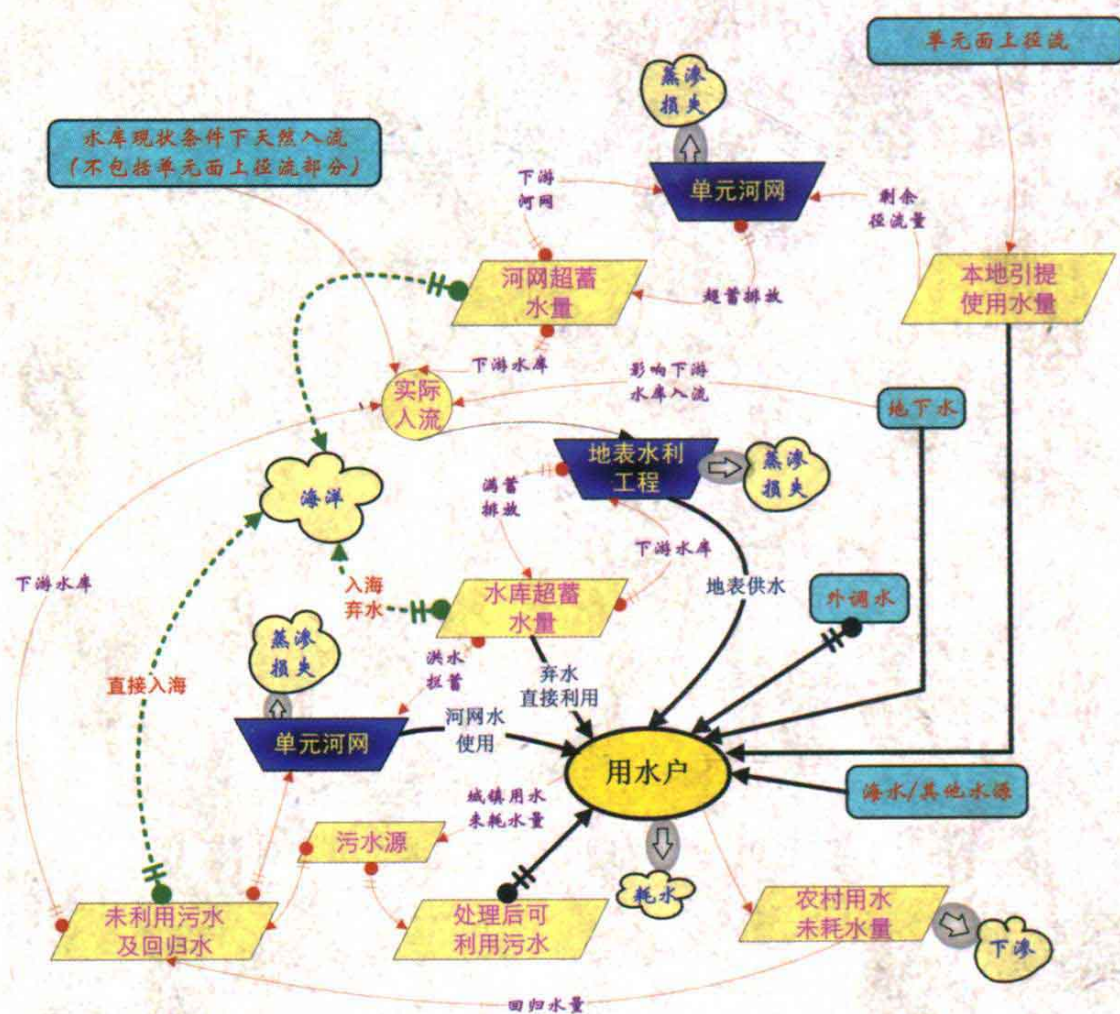


水资源系统模拟技术与方法

● 游进军 甘 泓 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水资源系统模拟技术与方法

© 游进军 甘 泓 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是在作者多年研究与实践的基础上,总结全国多个流域与区域水资源规划与水资源配置工作的经验与成果后编写。通过分析系统模拟的一般性概念及水资源系统的特征,提出了多层网络的数学模拟技术,采用基于规则的计算方法构建了水资源系统运行调度和水量平衡的数学模拟模型,反映了水资源系统模拟领域的最新研究成果。

本书内容包括水资源系统模拟基本概念、水量配置方案构建与评价、水利工程运行调度、模拟计算方法与计算技术等,可供水文水资源、水利规划及相关领域的科技工作者、规划管理人员参考使用,也可供大专院校有关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水资源系统模拟技术与方法 / 游进军, 甘泓著. --
北京: 中国水利水电出版社, 2013.1
ISBN 978-7-5170-0652-7

I. ①水… II. ①游… ②甘… III. ①水资源管理—
系统仿真 IV. ①TV213.4-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第027182号

审图号: GS(2012)1592号

书 名	水资源系统模拟技术与方法
作 者	游进军 甘泓 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	北京市密东印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 300千字 5插页
版 次	2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	56.00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

水在二元水循环模式下的运动和转换是一个复杂的系统行为。人们在社会进步过程中,为了更好地认识和了解水在汲取、传输、供给、使用、消耗、排放各个环节中的特性,以正确指导水资源的开发、利用、节约、保护、配置与管理,需要通过有效的手段,在流域或区域间调配的宏观层面、在行业间交换的中观层面和在用户内使用的微观层面,对每一滴水的来源与去向、流动与转换、效益与危害进行深入探究,水资源系统模拟技术为这一目的提供了有效的途径。

对水资源系统的模拟分析是水资源规划管理中的基础性技术工作,也是实现流域水资源统一调度,提高水资源管理水平、缓解水资源供需矛盾,最终实现水资源可持续利用的重要内容。快速跟踪和合理应用各种先进的数学算法、信息技术和相关专业的理论与方法,构建水资源系统分析决策和评价的综合平台,是水资源领域的研究者刻不容缓的职责。

《水资源系统模拟技术与方法》一书系统总结了国内外有关水资源系统分析与模拟的相关研究历程与进展,结合全国数十个不同流域或区域的实践经验,系统阐述了“概念化水资源系统”理论技术框架,提出了“分层水资源网络”为主体的模拟技术及实现方法,形成了较完备的流域及区域水资源系统模拟技术体系。本书内容是作者长期从事水资源规划与水资源配置工作的经验方法集成,相信对今后相关的研究工作及未来的发展不无裨益。

水利建设发展方兴未艾,水资源规划管理的研究任重道远。水资源系统模拟技术始终是支撑水资源管理决策的重要基础,有待更多的有志之士在本领域继续不懈努力,取得更多成果。希望本书的出版能对相关研究和技术工作提供有益的参考,推动水文水资源学科的进一步发展。

中国工程院院士 水利部科技委委员



2012年12月

前言

随着社会发展进步，人类活动对水循环的影响越来越显著，经济社会系统与水资源系统的关系日趋紧密。同时，可持续发展和生态文明理念逐步深入人心，生态环境保护与水循环的稳定健康也逐步受到了重视。因此，水资源规划管理目标逐渐从以水利工程建设缓解水供需矛盾的单一目标为主转向经济社会发展与生态环境保护的多目标并重，水利建设和水资源管理不仅是保障防洪安全、供水安全、粮食安全的核心，而且关系到经济安全、生态安全、国家安全。

与水相关的经济社会和自然因素众多，他们与水循环的关联程度和方式也不尽相同。综合多方面影响因素对水资源问题进行系统分析，无论过去、现在还是未来都是水资源规划管理的主要内容，实现以水资源可持续利用为目的、协调各类要素和规划目标的分析工具是水资源领域的重要研究方向。

科学系统的规划是水资源开发、利用、节约、保护、配置、管理等项工作的依据。为了使水资源相关决策科学化，需要在规划理论、决策方法和定量手段上实现一系列的突破。对于水利规划中所包括的水资源及其开发利用评价、水资源需求预测、节约用水、水资源保护、供水预测等专项工作，已经形成比较完善的规范标准与技术方法。而从全局出发综合各类影响的水资源配置工作，由于其复杂性，仍具有一定的技术难度，尚未形成较为统一和规范的技术工具，使得对水资源系统进行整体决策分析还存在一定困难。一方面，现有水资源配置方法集中在水资源供需平衡层面，以多水源、多用户、多时段过程的水量合理分配为重点，缺乏以水循环过程为基础、反映经济社会和生态环境整体目标的决策分析工具。另一方面，构建系统分析工具需要对水资源系统进行简化处理，还存在一些容易混淆的概念，缺乏规范的定义和描述。因此，提出规范的水资源系统模拟方法是提升水资源规划管理水平的一项重要基础性工作，也必将为我国水权制度建设提供有效的分析工具。

针对上述客观需求，本书提出了系统模拟及其模型构建作为水资源系统分析工具的技术方法。系统模拟作为剖析复杂问题的有效手段，可以通过对各类物理元素的归类与概化，对水的繁杂无序转换过程的规则化、秩序化，

将水资源系统及其与外部系统之间庞大而复杂的关系简单化、程式化,通过构建合理的数学模型并应用可行的求解技术得到满足预定需求的结果,再通过评价分析使最终决策能平衡协调各种有形和无形的利益。

全书共分10章,基于以往在水资源配置和水库调度中模拟技术和优化技术的相关研究成果,以水资源系统过程和系统模拟相关理论为基础,提出了模拟模型基本框架和实现途径。第1章至第3章探讨水资源系统模拟的基本概念和基本技术问题,分析了水资源决策分析的总体需求和系统模拟的必要性,明确了水资源系统的特征和水资源系统模拟的目标、对象、功能和作用,阐述了水资源系统概化、模拟系统要素分类和系统网络图的绘制等基础性技术工作,辨识了基于优化和基于规则的模拟方法的特点;第4章至第6章在对基本元素和水量过程的分类、定义基础上提出了水资源系统概念化处理的技术方法,应用水资源分层网络方法描述系统各功能模块水量传输、分配、利用的详细过程和基于规则的模拟分析流程;第7章和第8章介绍了以面向对象设计的水资源系统模拟程序设计和软件系统开发构架实现过程,探讨了模型校验、参数率定、合理性检验和方案设置等模型应用技巧;第9章以不同流域和区域实例验证了水资源系统模拟模型针对不同需求的应用效果;第10章对水资源系统模拟技术、模型特点以及模拟误差进行了总结,展望了本领域的进一步研究方向。

本书是作者近二十年来在全国不同流域或区域水资源规划及相关工作基础上总结而成,研究过程立足于基础理论的科学性、技术方法的可行性和基础信息的可获取性,突出了计算方法与实际需求和经验的有机结合。本项研究的开展得益于中国水利水电科学研究院水资源研究所多年来大量的专题研究和生产实践的积累,得益于作者所在单位良好的科研环境和学术氛围,得益于有众多关心、支持本项研究的全国有关单位专家、学者的鼎力支持。本项研究自始至终都是在王浩院士亲自关怀下完成,在技术方法上有幸得到了黄守信教授、汪林教授的悉心指点,水资源所的同事贾仰文、谢新民、汪党献、王研、韩素华、蒋云钟、赵红莉、尹明万、魏传江等给予了大量无私的帮助和鼓励,来自国内不同单位的专家、学者李原园教高、曹寅白教高、何杉教高、张建中教高、许新宜教授、翁文斌教授、王忠静教授、朱振家教高、李和跃教高、沈宏教高等提供了许多切实可行的指导意见。通过与他们长期的密切合作,以及对各项研究内容的认真探讨,使本研究成果理论基础更坚实,计算方法更合理,数据结果更可信。另外,牛存稳、贾玲、宋秋波、梁团豪、李传科、魏娜、朱启林、薛小妮、季海萍、杜思思、吕彩霞等对研究

方法和模型运行做了大量的应用工作,使得研究内容不断得到改进更新,具备了更强的适应性。李根、季海萍参与了本书的编辑工作,使本书得以最终能够成稿。在此,对大家的鼎力支持和热心帮助表示由衷的感谢。

作者有幸能将本书的研究工作与大量科研课题和生产项目相结合,广泛汲取本领域前辈和合作者的丰富经验,使得研究内容能够处于理论研究和实际需求的最前沿,也使研究成果得到实际应用的检验。在此感谢对本书成稿给予特别支持的水利部水利水电规划设计总院、水利部海河水利委员会、水利部松辽水利委员会、海南省水务厅、中水淮河规划设计研究有限公司等单位,感谢他们为开展本研究工作提供的实践机会和经费支持,在此一并表示衷心感谢。

本书写作和出版得到中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室的大力支持,得到了国家自然科学基金创新群体项目“流域水循环模拟与调控”(51021066)、水利部公益性行业科研专项经费项目“基于三生用水安全的海河流域水资源调控技术”(201101016)的资助。研究工作得到了多个课题的支持和应用推广,包括全国水资源综合规划专题研究“流域及区域通用化水资源供需分析及配置模型分析系统”、海河流域水资源综合规划专题“海河流域水资源配置模型研究”、松辽流域水资源综合规划专题“松辽流域水资源配置模型研究”、国家重点基础研究发展计划(973 发展计划)项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”(2006CB403400)、国家科技重大专项“基于水环境风险防控的松花江水文过程调控技术及示范”(2012ZX07201-006)、水利部公益性行业科研专项经费项目“供水格局变化下海河流域地下水响应研究”(201001018)、国家“十一五”科技支撑项目“环渤海地区水平衡过程研究”(2010BAC69B02-02)、国家自然科学基金重点基金项目“‘自然-社会’二元水循环耦合规律研究——以渭河流域为例”(51021066)、国家自然科学基金“基于二层结构的水量水质联合模拟调控模型研究”(51279210)、中意环保合作项目“可持续水资源综合管理(SWIM)”等,在此一并致谢。

水资源决策是一门复杂的学科,水资源系统模拟的技术方法也日新月异,作者所提出的方法如沧海一粟,未来必将有更多更新的成果丰富本领域的研究。本书的出版旨在抛砖引玉,为相关技术人员和研究人员提供参考。受作者水平所限,书中难免存在错误纰漏之处,敬请读者批评指正。

作者

2012 年 12 月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪言	1
1.1 资源危机与水资源问题	1
1.2 解决水资源问题的决策需求	3
1.3 水资源系统模拟的作用	5
第 2 章 水资源系统模拟概要	7
2.1 系统的概念和特征	7
2.2 系统模拟的意义与方法	10
2.3 水资源系统的特征	14
2.4 水资源系统模拟	20
第 3 章 水资源系统模拟的技术基础	23
3.1 水资源系统概化	23
3.2 模拟模型	25
3.3 模拟的计算技术	28
3.4 系统模拟的尺度与偏差	31
第 4 章 系统水量过程与概化方法	34
4.1 水资源系统的主要过程分析	34
4.2 水资源概化系统元素及其关系	39
4.3 概化框架下水源运动关系	42
第 5 章 水资源系统分层网络方法	45
5.1 水资源网络分层划分与关系	45
5.2 分层网络系统水量平衡分析	52
5.3 分层网络计算实例	56
第 6 章 基于规则的模拟分析计算方法	60
6.1 基本原则	60
6.2 非常规水源利用	63

6.3	本地径流及河网水子系统	64
6.4	地下水子系统	71
6.5	地表水子系统	75
6.6	外调水子系统	91
6.7	污水退水计算子系统	97
6.8	河渠道水量传播过程模拟	101
第7章	模型构建与实现手段	104
7.1	面向对象的系统设计	104
7.2	算法实现	108
7.3	数据库设计和数据组织	111
第8章	模拟模型的结果与应用	118
8.1	模型参数率定	118
8.2	模型结果与应用方式	119
8.3	模型合理性检验	121
8.4	计算方案设置	122
第9章	应用实践	125
9.1	海河流域水资源系统模拟	125
9.2	松花江流域水资源决策综合分析	133
9.3	南水北调东线受水区水量配置与效果评价	143
9.4	海南省水资源配置研究	157
第10章	总结与展望	171
10.1	基于规则模拟技术的主要特点	171
10.2	进一步研究方向的展望	173
参考文献		179

附图

- 附图1 海河流域系统网络图（总图）
- 附图2 松花江流域水资源系统网络图
- 附图3 南水北调东线水资源系统网络图
- 附图4 海南省水资源系统网络图

第 1 章 绪 言

【摘要】 针对水资源问题的严峻性，分析了水资源问题的主要解决途径和系统决策的总体需求，指出以水资源系统模拟为核心的系统分析决策方法的必要性，简述了水资源系统模拟的作用和影响因素。

1.1 资源危机与水资源问题

1.1.1 资源危机的产生

资源危机是全球发展面临的一大挑战。目前世界发展的目标是提高人的生活水平和质量，人均拥有更多的产品，是一种以人均资源和能源的消耗增加为代价的发展（罗马俱乐部，1988）。人类社会的发展都是通过对自然的改造换取人口的增长和文明的进步。随着科学技术的提高，人类对自然干扰和破坏的程度呈加速趋势。当资源耗竭和破坏作用累积到一定程度时，受损资源系统的部分或整体功能将难以维持人类经济生活的正常需要，甚至可能直接威胁到人类生存与发展的状态。

进入工业化社会后，对自然的破坏进入了规模化的时代，对资源的利用和环境的破坏远远超过了过去人类发展历程的总和。整个 20 世纪，人类消耗了 1420 亿 t 石油、2650 亿 t 煤、380 亿 t 铁、7.6 亿 t 铝、4.8 亿 t 铜，其中占世界人口 15% 的工业发达国家，消费了世界 56% 的石油和 60% 以上的天然气、50% 以上的重要矿产资源，全球各国各民族间出现严重的不平衡（潘岳，2007）。按照目前的矿产开采水平和全球矿产储量，大多数矿产已证实储量的资源可供利用 20~40 年，其中煤、铁矿石、铝土矿、钾盐等矿产可利用 100 年以上，天然气、铀、锰等矿产可以利用 50~100 年，石油和铜矿分别可利用 40 年和 30 年。

自然资源的形成需要一个漫长的过程，当开发利用速度超过资源形成和更新的速度时，资源就会出现减少直至衰竭，从而失去对社会发展的支撑作用，这也是资源危机形成的本质。解决不同类型的资源危机是当前世界面临的共同矛盾，也是实现可持续发展的核心。

1.1.2 水资源危机

水是自然资源的一种，是人类生存和活动所依赖的基本元素，更是人类社会发展的主要物质资源。地球的水圈是构成生物活动的基本环境，也是保障人类生存和发展、维持生态环境系统的基本条件，各种生态系统和生物链关系无不与其区域的水循环密切相关。随着经济社会的发展，人口的增长和人们生活水平的日益提高，对水资源的需求也越来越大。根据统计，在过去的 50 多年里，全世界淡水使用量增加了将近 4 倍，其中亚洲国家



的用水量增长最快。许多国家水污染导致的水环境的恶化使得用水紧张状况进一步加剧,全球高达 1/10 的河流受到了不同程度的污染。以水资源短缺和水生态环境恶化为特征的水危机成为制约当代经济社会发展的瓶颈(郑通汉, 2006)。围绕国际河流的水资源开发争端往往引发国家之间政治外交关系的紧张,成为影响区域地缘政治环境的不稳定因素。如中亚、中东等缺水地区的水资源分配问题已经成为诱发国际冲突的潜在威胁。

由于人口增长带来的不断增长的水需求、用水严重浪费与不合理利用,以及日益扩大的全球性污染,全世界淡水资源受到了越来越巨大的压力(斯德哥尔摩环境研究所, 1997)。根据联合国在 2012 年世界论坛发布的《世界水资源发展报告》(第四版),世界淡水利用的 70% 用于灌溉和粮食生产,在部分发展中国家达到 90% 以上;随着人口增长,到 2030 年的粮食需求预计将增加 50%, 2050 年增加 70%。由于耕地面积还在逐渐减少,新增的粮食产量只能通过增加灌溉农田获取,考虑粮食运输、存储的消耗和生活水平的提高,粮食产量还必须高于人口增加速度才能保证全球粮食安全。而用水增加与能源消耗增加也密切相关,据霍夫曼研究所(Hoffman, 2011)调查结果显示,全球能源消耗量的 7%~8% 用于地下水开采、输水,以及污水处理等与水相关的活动,在发达国家这个数字上升到 40%。而由气候原因与不合理的水资源开发利用导致的与水相关的灾害损失也大幅增加。根据世界银行调查结果,1990—2000 年期间几个主要发展中国家水灾害损失占 GDP 的 2%~15% (世界银行, 2004; WWAP, 2009)。因此,水资源危机的三点严重后果:①威胁粮食安全;②水短缺容易引发地区间水冲突;③水问题导致环境和生态难民增加。

尽管水资源被认为是可更新的,但是当经济社会的用水消耗量超过当地水资源更新能力时,将和其他不可更新资源消耗一样,产生水资源的耗减。水资源分布与气候条件、经济发展程度、贫富差别,以及对水资源利用与保护的认识,都是造成人均水资源利用指标差异的原因。2006 年 8 月在瑞典斯德哥尔摩召开的“世界水周”会议指出:“世界并不缺水,而缺乏对水资源的有效管理,造成缺水问题的原因中 98% 是人为原因,2% 是自然原因。”因此,规范人类活动,加强对水资源的规划管理是解决水危机的根本出路。

1.1.3 我国水资源问题的严峻性

中国作为一个发展中国家,水资源问题尤为突出。一方面水资源短缺问题严重,不仅人均水资源量远远低于世界平均水平,而且时空分布极为不均;另一方面,中国持续快速增长的经济水平和人们不断提高的生活水平对水资源的数量和质量都提出了越来越高的要求。社会发展对水的需求快速增长,水污染和水资源短缺又引起生态环境状况恶化。而国内对水资源节约保护的整体意识和管理水平还比较低,对水资源与人类的紧密关系意识淡薄、水管理水平和效率低下、社会公众参与程度不足,这些都加剧了水资源问题。根据全国水资源综合规划评价结果,我国近期水资源开发利用程度为 19%,已开发水资源量占可利用总量的 70%。同时相关研究成果显示,2005 年全国水资源耗减量为 270 亿 m^3 ,若持续累积,将对水资源可持续利用带来极大的影响。

近 20 年来,由于全球气候变化和人类活动影响导致的下垫面条件变化,使得降雨及地表地下产流关系发生变化,导致水资源情势发生显著的变化,北方地区尤为突出,大部分地区水资源数量呈现减少趋势。由于干旱缺水,地表植被荒芜,地下水超采导致水位持



续下降、地面沉降，生态系统严重退化，生物多样性降低，沙尘天气增多。随着经济发展，人类活动对水循环的干扰和破坏也越来越突出，导致水质恶化水污染事件频发。

近年来，我国南方地区出现的水污染和干旱造成了极大的经济损失和社会影响，再次为人们敲响了警钟。水资源问题不仅是水资源短缺地区面临的问题，一般意义上的丰水地区同样会因自然因素遭受水资源短缺危机，水污染更会导致严重的水质性缺水和生态环境恶化。随着经济发展，同等程度的水资源紧缺和水污染的危害和破坏必将加大。缺水、水污染往往是非突发性灾害，形成危害之前不容易被重视，一旦形成灾害则又难以恢复。未雨绸缪，科学决策，做好水资源的规划管理工作，是实现水资源可持续利用的必然选择。

1.2 解决水资源问题的决策需求

1.2.1 主要任务

水资源同时具有自然、社会、经济和生态属性，这一点已经得到广泛共识（陈家琦，1996）。随着经济社会水平的提高和科学技术水平的增强，天然水循环系统与人工利用侧支循环系统的相互关系日趋紧密，人类活动对整个系统中各个元素产生的影响日趋增大。水资源系统是指天然水循环在人类活动影响下形成的水与经济社会和环境要素相互作用、相互依存的有机整体。随着社会发展，水资源系统日趋复杂，对水问题决策的要求不断提高，需要提出相应的综合性方案，包括水资源的节约与保护、合理配置等任务。

节约用水是以避免浪费、减少排污、提高水资源利用效率为目的，采取包括工程、技术、经济和管理等各项综合措施的行为。水资源保护是为了满足水资源可持续利用的需要，采取经济的、法律的、行政的、科学的手段，合理地安排水资源的开发利用，以维持水资源的经济使用功能和生态功能。水污染防治是水资源保护的手段之一，通过水污染防治工作，分析河流有效纳污能力，合理规划入河排污口和污水处理厂。

水资源配置是在流域或特定的区域范围内，遵循高效、公平和可持续的原则，在考虑市场经济的规律和资源配置准则下，通过合理抑制需求、有效增加供水、积极保护生态环境等各种工程与非工程措施和手段，对多种可利用的水源在区域间和各用水部门间进行的调配^①。水资源合理配置是水资源决策管理的核心工作，水量合理配置的决策包括对水资源供给、需求和保障手段三方面的协调。通过对水资源量需求和分布的分析，合理安排水利工程建设和运行调度，实现对区域经济增长和生态环境保护的用水需求保障。

1.2.2 决策需求

（1）协调区域经济社会发展、生态环境保护与水资源条件。从全局而言，水资源规划管理属于区域总体规划中的一个组成部分。考虑水资源对经济社会发展的重要支撑作用和自身的特殊性，对其的开发利用和治理需要服从于社会发展的总体目标，同时社会经济发展需要考虑水资源条件的制约。包括经济、生态和人口等各项因素在内的区域总体发展目标和水资源规划管理的目标既相互制约，又互相反馈。协调社会发展模式和水资源开

① 水利部水利水电规划设计总院。全国水资源综合规划大纲，2002。



发利用方式是实现可持续发展的基本要求,需要对水资源系统的构成、特性、制约条件,以及可能的变化趋势,进行深入了解、分析和利用。平衡协调经济发展和环境保护的关系是不同领域所必须思考的问题。发展经济和保护生态环境在水资源需求上的冲突已经成为社会发展的一个重要制约因素,对于缺水地区更是如此。

(2) 处理好生活、生产与生态的用水关系。对于不同区域,由于自然条件和经济社会状况以及水资源开发利用的差别,这三者的需求不尽相同。正确处理生活用水、经济生产用水和生态用水的关系,是维持流域水循环再生能力的基础,也是水资源系统模拟的重要目标。必须在研究现状和未来状况下区域内经济、环境和社会等多方面的协调性与水资源的适应性的前提下,提出合理的水资源决策方案。在明确区域经济发展和生态保护的总体目标后,应当充分调用工程能力,在实现水资源合理配置的基础上满足各方面需求。当水资源状况和经济社会发展之间出现不可调和的矛盾时,需要从水资源承载能力的角度出发对经济发展和生态保护提出决策建议。

(3) 提高水资源开发利用的合理性和高效性。从经济角度分析水资源开发、节约、保护治理之间的合理组合方式,通过对边际成本和效益的分析,寻求不同水资源开发治理措施的合理搭配,实现经济效益的最优化。水资源开发利用的合理性和高效性还表现为优化的水源用户配置关系。同一流域或区域存在多类用水户和不同水源,存在多种可能的供水方式。水资源宏观决策的一个重要目标就是要实现不同水源到用户的合理配置,使得水源得到有效充分的利用。对于大多数地区需要进行地表水和地下水的联合利用,调整地表水与地下水利用的关系,严格控制地下水利用数量,涵养地下水源。同时优先利用当地水资源,只有在用水负荷超过当地水资源承载能力时,才考虑实施跨流域调水弥补当地水资源的不足。对于水资源缺乏地区应当充分挖掘非常规水源,如雨洪水、海水以及微咸水的利用,并根据技术水平的发展充分调整策略。通过对各种工程的有效利用,实现地表水、地下水、污水处理再利用,以及其他非常规水源的科学调配。在存在外调水的情况下协调当地水与外调水的使用,使供水效率和经济效益最高。

(4) 统筹不同区域、行业 and 用户间用水。流域和区域作为整体,其经济发展具有不平衡性,水文特性和水资源分布也不相同。水资源规划管理应以流域或区域系统为基本对象,通过工程与非工程措施,协调水与社会、经济、环境之间的关系,提高水资源与其他自然资源,尤其是土地资源的匹配程度,保持不同区域人与自然的和谐关系,不断调整经济发展布局和水资源供求关系,协调兼顾除害与兴利、局部与全局的目标。

协调不同行业 and 用户间用水的一个重要内容就是协调城市用水和农村用水。随着城市化和工业化进程的推进,需水量不断增加,形成了流域城乡用水竞争的格局。由于城市用水具有经济价值高、支付能力强的特点,造成城市用水挤占了农村用水的格局。而城乡用水竞争的最终结果往往是城市 and 农村都挤占生态用水满足经济用水需求。所以水资源决策既要遵循经济规律,又要保障广大农村地区生活用水的基本需求和生产用水。

(5) 加强水资源保护和水污染防治。国民经济用水不仅有数量要求,更有质量要求。缺乏水资源保护与污染防治措施形成水质性缺水,成为目前突出的水资源问题之一。部分人口密集、经济发达的地区,同时受到资源性缺水和水质性缺水的双重困扰,使得水资源问题成为制约区域发展的瓶颈因素。加强水资源保护和水污染防治不仅是保障民生、改善



区域环境条件的需要，也是增加有效水资源量和维护环境质量的必然选择。所以必须在决策中考虑水资源开发利用对水环境和水生态的影响，提出相应的措施。

(6) 实现系统科学调度、缓解特枯水年供水不足。由于水文的随机特性，平水年和枯水年的可供水资源量变幅较大。而经济用水需求也具有不确定性，一方面受行业发展规划和用水效率影响；另一方面与水资源丰沛程度也密切关联。生活和工业需水相对比较稳定，基本不受水文条件变化的影响；在枯水年农业灌溉用水和生态环境用水需求反而增大。因此，协调平水年和枯水年的供水关系是水资源配置要解决的重要问题。实现水资源系统的科学管理和调度，科学合理调度不同水源，提高区域抵抗各类水资源短缺的能力。

1.3 水资源系统模拟的作用

水问题决策的不同目标已得到共识，但对各种目标之间的相互协调关系则存在分歧。要进行合理的决策，就必须构建具备整体分析功能的工具，通过对不同决策条件下的系统响应分析提出综合协调的方案。因此，通过对水资源系统进行模拟是决策辅助的有效手段，通过系统模拟可以将诸多问题集成分析考虑，从而为决策提供技术支撑。

综合性的模拟系统需要能将涉及水资源过程各个环节的影响因素纳入整体考虑，构建既满足经济社会发展，又能支撑良好生态环境的人水和谐的经济社会系统。图 1.1 给出了水资源系统模拟的主要内容和相关的各类影响因素，其中虚线框部分为系统模拟的主要环节。

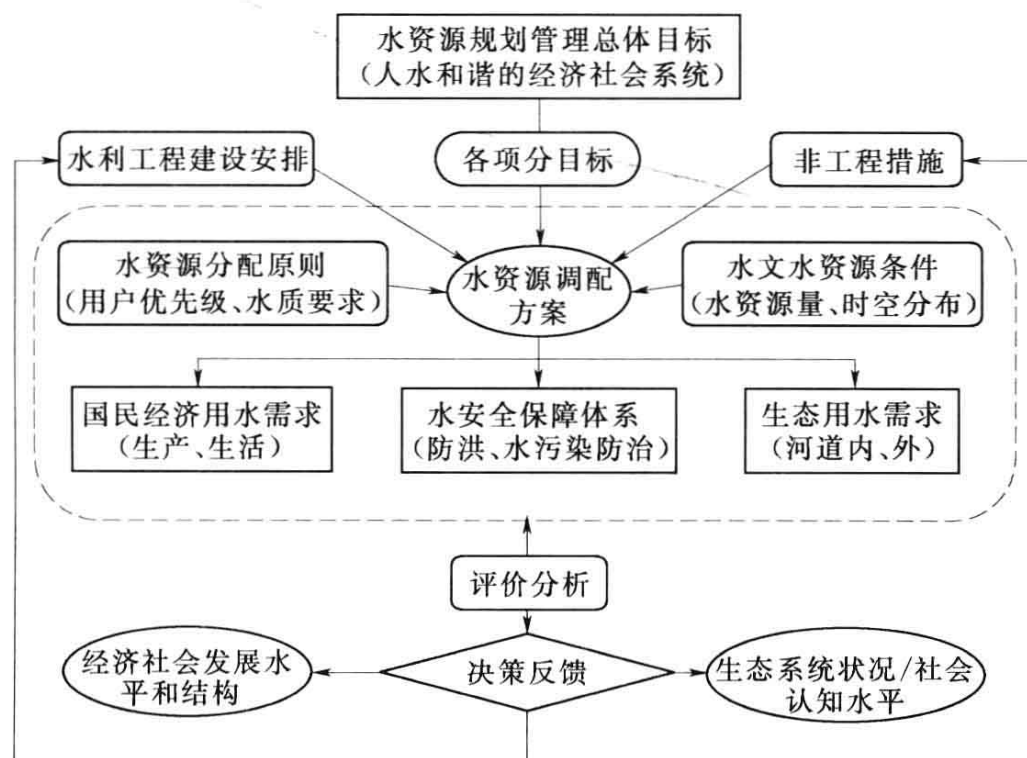


图 1.1 水资源系统模拟涉及因素与决策支持过程

由图 1.1 可以看出，通过对社会发展水平和用水效率的评估和预测，可以推求未来的生产和生活用水需求。而区域的生态系统状况和社会对生态环境保护的认识水平决定了生态用水需求，经济和生态系统对水资源利用的要求，以及未来规划工程方案和管理调度等非工程措施诸多因素构成了系统模拟的外部条件。根据这些设定的条件，通过工程调度运



行、用水户用水和形成的耗水、排水进行整体性结合，最终得到合理满足各类需水要求后的各种供需平衡、系统水量平衡和工程运行等结果，以及以这些结果为基础的统计分析成果，如供水能力、供水保证率等。

对模拟结果的评价分析是决策支持中不可或缺的一个环节。水资源的时间和空间分布具有不均衡性，通常不是所有需求都能同时得到满足。在这种条件下，需要对某些需求和工程运行方式进行调整。供水对生产生活的满足产生经济价值，对生态环境需求的满足产生社会和环境效益，而不同的需求和方案的调整都意味着水投资和产生的经济和社会效益的变化。水投资和效益之间具有复杂的转化传递关系，而效益特别是社会效益具有多样性和复杂性，难以直接衡量，通常具有不确定性，对这些效益的评估需要综合分析。通过对模拟系统的反复调用以及对模拟结果的科学分析和合理评价，得出预设的各种情景模拟结果优劣，进而反馈调整决策方案，为最终决策提供总体方向和建议。

水资源系统模拟是一个复杂的过程，需要给出不同水资源条件下的工程运行和用户用耗排水量的详细过程。通过对这些区域性和过程性结果的累积得到各种宏观结果。所以系统模拟是建立在合理的微观基础上的宏观模拟。值得注意的是，尽管模拟系统可以给出各种详细结果，但由于受决策信息条件精细程度的限制，且并非直接对各单个工程或用水户的运行提供详细的设计和运行方案，因而应当更关注总体结果。在最终决策确立的框架基础上，可以进一步分析各类工程和用水户之间的矛盾，制定其相应的、详细的设计或运行管理措施。

水资源系统模拟对于解决宏观规划决策具有指导作用，对不同发展模式下的未来系统状况作出情景分析和效果评价，决策者可以从模拟结果中分析得到合理决策的总体方向，而不是将模拟的具体过程作为准确的预报预测。

有关水问题的决策，其总体目标具有一致性，如构建人水和谐的社会，实现水资源的可持续利用和支撑经济社会持续发展。但由于不同区域和不同时期，以及不同的发展目标，其需要处理的问题具有不同的侧重，相应的分项目标各有不同，需要的手段和措施也不尽相同，从而强调和体现当地的主要发展需求。

第 2 章 水资源系统模拟概要

【摘要】 本章探讨了水资源系统模拟的相关基础性概念。基于一般性的系统概念和特征，对系统模拟的作用和意义以及不同行业系统模拟的应用进行了总结，根据水资源与社会经济和生态环境的关系总结了复合水资源系统的特征，分析了水资源系统模拟的目标、对象和作用。

2.1 系统的概念和特征

2.1.1 系统概念的起源与发展

“系统”（System）一词源于古希腊，原意有组合、整体和有序的涵义，指由元素组成的彼此相互作用的有机整体《中国大百科全书（简明版）》。随着现代科学的发展，系统概念包容了越来越丰富的内涵，但都包含了“由相互联系、相互作用的要素（部分）组成的具有一定结构和功能的有机整体”的认识，如开放式的维基百科对系统的定义为：由一组相互影响、相互依赖的真实的或抽象的实体所形成的整体。本书不尝试在系统或相关概念和定义上作深入探讨，只是希望说明系统概念存在的共识和不同学科专业对采用系统理论和方法分析复杂问题的探索。

19 世纪，法国物理学家尼古拉·莱昂纳尔·萨迪·卡诺（Nicolas Léonard Sadi Carnot）通过研究热力学首先在自然科学领域中提出“系统”的概念。1850 年，德国物理学家鲁道夫·克劳修斯（Rudolf Clausius）总结了这种描述包括环境的概念，并开始在涉及系统时使用“工作群体”。出于不同学科的认识和要求需要，在学术范畴内存在多种对系统一词的定义。例如以数学模型来描述客观事实，认为系统是用来表述动态现象模型的数学抽象，或者通过“元素”“关系”“联系”“整体”这些概念定义系统是客体及它们属性之间关系的集合，或以“黑箱理论”通过所谓“输入”“输出”“信息加工和管理”这样的术语反映系统所包含的因素和作用。

具有严格概念和定义的系统理论出现于 20 世纪 30 年代。贝塔朗菲（L. V. Bertalanffy）提出了一般系统论，掀起了系统理论思潮，并研究了三种系统理论：机体系统理论、开放系统理论和动态系统理论。诺伯特·维纳（Norbert Wiener）和罗斯·阿什比（Ross Ashby）进一步推动了系统理论的研究方法，他们都是提出应用数学方法研究系统的先驱者。

随着对系统概念理论研究的深入，不同学者基于对系统不同的认识提出了各种不同的新系统理论，并掀起了对系统理论研究和应用的热潮。如麻省理工学院（MIT）的 Jay W. Forrester 教授创立系统动力学研究动态复杂性系统，20 世纪 80 年代由圣达菲学院的



约翰·H·霍兰 (John H. Holland), 兰默里·盖尔曼 (Murray Gell-Mann) 等人创立了复杂适应性系统理论。国内对于系统的研究也逐渐深入, 泛系统理论被提出描述和分析广义系统、广义关系或它们的种种复合 (吴学谋, 1976), 钱学森等归纳自然界和人类社会中一些极其复杂的事物, 采用系统学的观点提出开放的复杂巨系统 (钱学森, 1989), 提出解决这类问题的方法是从定性到定量的综合集成研讨厅体系 (Hall for WorkShop of Metasynthetic Engineering, HWSME)。而针对系统的不确定性, 国内学者提出了不确定系统理论 (刘宝碇, 1999), 并作了深入的理论和应用研究。此外还存在很多其他系统理论, 如投入-产出法 (Input-Output)、系统分析法 (Systematic Analysis)、耗散结构理论 (Dissipative Structure)、混沌边缘 (Edge of Chaos)、人工生命 (Artificial Life) 和系统进化理论 (Evolution of System) 也是系统科学研究的不同表现方式。

在社会科学和哲学范畴内也可以找出相当数量的有关系统理论的研究。如巴克莱 (Buckley, 1967) 从社会学角度阐述了系统、边界、输入、输出、反馈等概念, 并强调这些概念在社会学研究中的重要性。由于系统理论与其应用的一般性和复杂性, 系统科学已成为独立的科学体系, 并成为现代科学技术九大部类体系之一。加拿大哲学家邦格 (Bunge, 1979) 的系统主义也是系统科学界关注的一种理论, 论述了对社会本质认识的三种基本观点: 个体主义、整体主义与系统主义, 并认为系统主义抛弃了个体主义与整体主义。

从系统理论的基础研究到系统科学在各个领域中的应用, 可以将系统科学划分为系统

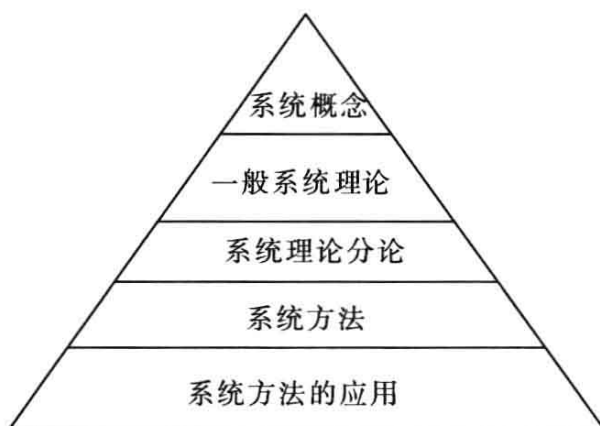


图 2.1 系统科学结构体系

概念 (关于系统的一般思想和理论)、一般系统理论 (用数学的形式描述和确定系统的结构和行为的纯数学理论)、系统理论分论 (为了解决各种特点的系统结构和行为的一些专门学科)、系统方法 (为了对系统对象进行分析、计划、设计和运用时所采用的具体应用理论及技术的方法步骤)、系统方法的应用 (系统科学的思想和方法应用到各个具体领域) 五个层次, 如图 2.1 所示。

以系统理论为指导的系统工程 (System Engineering) 方法以运筹学、控制论、信息论、大系统理论等为基础科学, 大大促进了以系统工程方法研究现实世界的发展和运用。以系统方法研究问题具有普适性, 其研究对象主要是复杂的大系统, 同时也广泛应用于各种系统的局部问题。

2.1.2 系统的特征和分类

系统包含的对象广泛, 包括人类社会、生态环境、自然现象和组织管理等各类客观现象。系统理论形成了一套处理复杂问题的理论、方法和手段, 使人们在处理问题时, 有系统和整体的观点, 其本质是具有普遍意义的系统哲学。由于涉及不同领域, 诞生了跨学科的系统工程理论研究, 往往是自然科学和社会科学的交叉。归纳不同领域中所提出的系统的共性, 可以得出系统存在以下几个特点。

(1) 整体性。由系统定义可知, 系统是由相互依赖的若干部分组成, 各部分之间存在