

第 1 章

水资源系统分析理论与方法概述

本章对模型研究的背景进行了概括性的论述。首先分析水资源系统的宏观特性,以及研究的整体技术路线;然后对目前国内外水资源系统分析相关的研究进行综述;根据目前的研究现状,分析当前研究的发展方向和主要难题,并提出解决的途径。

1.1 水资源系统的宏观特性分析

1.1.1 概述

目前,世界上的许多国家和地区,都面临着维持水资源在数量和质量上满足需求不断增长的挑战。随着社会经济的不断发展,人类对水资源的需求不断增加;同时,开发新的水资源的费用日益昂贵,限制了新水源的开发潜力。在世界上大多数发展中国家占用了绝大部分的灌溉用水,而不得被削减,用以满足城市需水和工业生产,同时还要保持基本的农业增长动力。涝灾、缺水、地下水超采和水污染使得水资源问题日益突出。

在大多数水资源问题突出的国家和地区,用户可以通过低廉的价格甚至免费得到水。这样不论是用户还是管理者都没有节水的动力,在这种情况下,水资源必然不会被当作稀缺资源来对待,过度使用和浪费也成为一种普遍存在的现象。这和水资源整体上的短缺现象形成了强烈的反差。

根据科学的分析制定新的水资源利用和管理策略对于改变水资源匮乏的国家和地区的现状是十分必要的。这些地方的水资源缺乏往往由于家庭和工业用水增加而导致农业用水减少、环境破坏和与水相关的其他问题。在对水资源系统的运行和演化机理进行深入的重新认识和科学分析的基础上,通过用水政策和管理体制的改革,使得流域的水资源得到科学合理的配置和利用,同时促进用户节水,从而形成一个可持续的水资源配置和管理机

制,是解决这些问题的基础和前提。

本书提到的“水资源系统”,是指包括自然水文过程、水利工程条件、水资源管理制度、水用户系统和生态环境系统在内的,与整个水资源的开发、管理、使用过程相关的所有元素构成的整体。模型是联系水资源系统分析理论和管理实践的桥梁,是进行水资源系统分析的基本工具,而从宏观上对水资源系统的一些基本特性进行分析和把握,是建立水资源系统分析模型并进行政策分析的前提。

进化性是水资源系统的一个基本特性。人类对水资源的利用和对水资源系统的认识是一个不断变化的过程,也可以说是一个不断进步的过程。分析这个过程的演化历史,有利于把握水资源利用的模式和经济社会发展之间存在的必然联系,从中进一步分析系统中元素之间的作用机理,这对建立科学合理的分析模型至关重要。

复杂性是水资源系统的另一个基本特性。众多的元素及其之间多种多样的相互作用关系,使得水资源系统具有高度的复杂性。由于水资源系统固有的复杂性,对流域进行水资源系统分析和可持续发展决策分析需要科学的和高效的综合分析工具。

1.1.2 水资源系统的进化性分析

人类对水资源的利用是与人类社会的发展相生相伴的。从人类对水资源系统的认识和水资源的利用模式来讲,大致可以分为以下几个阶段:

(1) 循水而居阶段

人类文明的起源都是从大的流域开始的,这是人类利用水资源的开始。四大流域养育了四大文明,这绝对不是历史的巧合。水作为生命存在的必要条件,必然会在人类社会的发展和演化中扮演重要的角色,甚至对人类的文明和社会制度的形成产生重要的影响,许多历史学家都对这些影响进行了分析^[1]。

(2) 工程水利阶段

在人类同自然不断斗争的过程中,水利工程逐渐成为人类利用水资源的重要工具。从几千年前开始,世界各地的人们用各种水利工程改造天然的水资源系统,使其更加有利于人类的生产和生活,从此开始了水资源利用的一个新的阶段。直到 20 世纪中期,水利工程一直被认为是人类征服自然和改造水资源系统的重要工具。

(3) 资源水利阶段

20 世纪,随着经济社会的迅速发展,人类对各种包括水资源在内的自

然资源的需求急剧增加,同时伴随着这种需求增长而来的是人们对于人与自然关系认识和人类对资源利用模式的变化。可持续发展理念的提出,标志着人与自然的关系进入了一个新的阶段,人类从征服与改造自然的误区中走出,认识到人与自然和谐共处的重要性。这种认识对于人类对水资源的利用模式也产生了重要影响。资源水利作为一种重要的概念被人们广泛接受,并越来越受到管理和决策部门的重视。

2000年4月,水利部汪恕诚部长在“中国水资源论坛”中正式在中国提出资源水利的概念。这是我国在水资源利用观念和思维方式方面的重要变革。就资源水利的内涵来讲,它应当包括广义和狭义两个层次。从广义上讲,水与各种资源(包括人口、耕地和矿产等各种资源)都有一个优化配置的问题;从狭义上讲,主要是水资源自身的有效利用和优化配置、水的多功能与综合利用和水资源区域性的优化配置等问题。因此,从工程型水利转变为资源型水利是不同发展阶段的产物,是社会发展的必然。

与人类利用水资源的模式一样,水资源系统的科学研究也经历了不同的阶段。水资源系统的科学研究产生于工程水利时代。在传统的工程方法中,水资源系统分析被认为是使工程具有安全性、实用性、持久性和经济性等的设计,而工程包含短期行为(如现有工程的管理、运行和维护行为)和长期行为(如投资兴建新的工程)。但是,到了20世纪中期,非工程方法开始在水资源管理者和研究者中变得活跃。水文学家研究了水文系统的优化运行原则,经济学家开始研究优化水资源配置的方法,社会学家检验水资源管理决策的社会行为和过程,这种与经济相关的制度行为和水文系统运行规则的研究,极大地修正了传统的工程方法。目前,几乎所有的水资源系统分析研究都将可持续发展作为基本原则,生态环境问题和可再生利用作为同经济效益同样重要的目标被纳入到研究和模型的构建体系中。

从整个历史来看,人类社会对水资源系统的利用效率不断提高、利用方式逐渐改进。这其中的作用机理是什么,系统中的管理制度、水用户和天然水文系统的作用和反馈机制是什么?对于这些问题的研究和理论解答,对于我们深入地认识水资源系统具有重要的意义。这也是本书致力于探讨的理论问题之一。

1.1.3 水资源系统的复杂性分析

复杂性是水资源系统的另外一个重要的基本特征。水资源系统的复杂性表现在以下几个方面:

(1) 系统组成要素的多层次和大规模。水资源系统涉及气象、水文、地理、生态、社会、经济等众多子系统,其中的任何一个子系统又都包含众多要素和下一级子系统。如此逐层分解,形成了规模庞大的多层次结构。

(2) 水资源系统各要素之间或各子系统之间的关联形式多种多样。这种关联的复杂性表现在结构上是各种各样的非线性关系,表现在内容上是物质、能量和信息的交换。

(3) 水资源系统的开放性导致系统演化的复杂性。作为开放的系统,系统环境的不断变化将导致系统的不断演化,这种演化一方面表现为系统从一种相对平衡状态向另一种相对平衡状态转移的过程,另一方面表现为系统功能、结构和目的的变化。系统在演化的过程中,会出现复杂系统演化特有的许多现象。

(4) 水资源系统的空间结构具有复杂性。系统涉及的各个子系统都具有空间结构的复杂性,均衡水量分配的空间差异是水资源优化配置的重要目的之一,因此各子系统的空间结构复杂性决定了系统结构、功能和目的的复杂性。

(5) 水资源系统的复杂性与人类社会的复杂性紧密相关。水资源是人类社会发展不可或缺的资源,水资源利用的最终目的是为人类社会的可持续发展服务。人类社会本身是一个极其复杂的系统,这是水资源系统复杂性的根本原因之一。

(6) 以上几个方面因素的综合作用,最终形成了水资源系统的复杂性。

水资源系统的复杂性决定了必须用解决复杂问题的理论和方法进行分析研究。本书根据系统科学领域关于复杂系统问题研究的最新进展,尝试对水资源系统的复杂性进行新的阐释和数学解析,以求为建立科学合理的定量分析模型奠定基础。

1.1.4 水资源系统研究遵循的整体技术路线

水资源系统的基本特性决定了其研究的基本理论方法是系统科学理论和系统分析方法。而定性分析与定量分析相结合的整体研究思路是分析这种具有复杂结构的庞大系统的基本技术路线。

钱学森等中国科学家在 20 世纪 80 年代提炼与总结出“开放的复杂巨系统”概念,并提出处理开放的复杂巨系统的方法论是“从定性到定量的综合集成方法”,90 年代后又发展成为“从定性到定量综合集成研讨厅体系”的实践形式。这套方法是研究开放的复杂巨系统的整体方案,为解决这类

问题提供了科学有效的方法,是我国系统工程和系统科学研究及应用的重要里程碑,在国际上也具有前瞻性的成果^[2]。相关的概念如下:

巨系统:巨系统没有严格的定义,一般来讲系统的组分(元素)数目多到巨型规模,使得系统的整体行为相对于简单系统来讲可能涌现出不同的性质,系统通常可以有宏观和微观的层次划分,不同层次上的行为特性有性质上的不同,可以称为巨系统。

复杂巨系统:在巨系统中,如果组分的种类繁多,并且有层次结构,它们之间的关联方式又很复杂,如有非线性、不确定性、动态性、模糊性等特点,就可以称为复杂巨系统。

开放的复杂巨系统:这里的“开放”不仅仅是指系统外界环境之间具有物质、能量和信息的交换,而且包含了对系统的个体或者子系统的学习能力和适应性的描述。

显然,水资源系统符合开放的复杂巨系统的概念,属于这种系统的范畴。因此,适用于开放的复杂巨系统的研究方法——“从定性到定量综合集成研讨厅体系”,是研究水资源系统科学有效的总体技术路线。

这种基本方法从20世纪80年代末期开始,已经在全世界的水资源系统问题的研究中得到应用。在我国也是这样,从“七五”攻关开始至今,在计算机决策支持系统的基本框架下,将水资源系统的数学模型与长期积累的专业知识和专家经验相结合,采用半结构化的、半经验半理论的研究方法,分析和解决水资源系统分析中的问题并提出解决方案,已经成功地应用于生产实践当中,如华北地区宏观经济水资源规划、西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究、黄河流域水资源规划决策支持系统研究等科研和生产项目,都是这种方法应用的成功范例。事实上,在其他很多研究领域,在基于决策支持系统的复杂系统问题分析研究中都有意识或者无意识地应用了这种总体技术路线。

在遵循上述总体技术路线的基础上,本书希望能够在近几年复杂系统理论研究和非线性数学理论研究进展的基础上,从水资源系统元素之间的作用机理出发,应用新的数学模型方法定量地分析更多的系统信息,为水资源管理中重要问题的科学决策提供更多的数据支持。

在进行理论分析和数学建模分析之前,需要对目前国际国内关于水资源系统分析研究的现状进行回顾,以求了解当前的发展现状、趋势以及存在的难题。

1.2 水资源优化配置模型研究综述

1.2.1 概述

长期以来,流域一直是进行宏观水资源配置与管理分析的基本的单元。流域级的水资源分析决策和经济与环境问题直接相关,其结果可以被应用在流域的水资源利用政策的分析和设计中,以此来增加经济效益和环境效益。“在物理和社会经济条件的约束下,发展交互式的综合数据库、预测模型、经济规划模型和水资源规划管理模型,用以优化水资源配置,是流域级水资源系统分析研究的基本方法”^[3]。“水资源发展和管理必须在可持续发展原则的指导下,整合技术、经济、环境和社会各方面的因素,建立一个统一的整体分析模型框架。模型应该包括各方面用户的需求,同时减少和避免水资源利用中的风险,并且作为社会经济发展规划的一部分”^[4]。目标函数是反映水资源管理模型框架的规则、原则和约束的基本工具,在多数情况下,应考虑包括经济效益、社会福利、环境可持续等多个目标。US Water Resources Council^[5]和 OECD^[6]建立了一些关于水资源管理宽泛的普适性的概念。

由于水资源系统固有的复杂性,对流域进行水资源系统分析和可持续发展决策分析需要高效的综合分析工具。通过建立包括经济、水文、环境、制度等子系统的整体模型研究需水部门间用水竞争问题,同时为制定宏观决策提供必要的分析和支持,是近几年经济和水文领域研究的重点之一,也是本书的目标之一。但是,由于水资源系统涉及的要素众多,建立这样的整体模型需要众多局部的、子系统级的研究成果作为基础和前提,下面对在建立整体模型中用到的相关研究内容进行简要的回顾。

1.2.2 水质水量综合管理研究

过去经常使用的单目标、单工具解决水资源系统分析问题的方法,已经逐渐被多目标、多工具的方法所代替。现在水质和环境的影响同经济一样,被更加综合地考虑。水质和水量目标更多地被整合在一个统一的分析框架中,这个框架包括水和其他要素的物理关系、社会经济联系和环境政策等。

水质和水量管理被应用于水库运行、地下水利用、地表水和地下水联合

调度、灌溉与排水管理以及流域尺度的系统运行等方面。

数学模型被广泛地应用于水质和水量管理的分析和决策过程中。这些模型包括模拟模型、优化模型和优化与模拟的组合模型。

从土壤剖面到田间的作物,再到整个灌区这个范围的有代表性的水文过程,是流域尺度分析的前提。但是,水资源系统分析决策在流域尺度有广泛的经济内涵,因此政策和制度对水资源系统分析的影响需要在流域尺度的分析中进行考虑和设计。

1.2.2.1 子系统级的模型

(1) 水库运行管理

从20世纪80年代中期开始,对于水库运行和调度的研究就从未间断过,这些模型的优化原则一般既包括水量也包括水质。例如:Orlob, Simonovic^[7]; Kojiri^[8]; Harboe^[9]; Ko, Fontane, Labadie^[10]等人的研究都是很好的代表。

(2) 地下水管理

综合水质和水量的地下水管理研究对于那些以地下水灌溉为主的地区尤为重要,这些模型的研究包括:Willis^[11]; Gorelick^[12]; Shafike, Duckstein, Maddock III^[13]和黄国如、胡和平^[14]等。

(3) 地表水地下水联合调度

地表水地下水联合调度问题也是一个非常重要的研究方向,因为联合调度可以增加供水的效益、可靠性和效益-费用比^[15]。Willis和Yeh^[16]对综合水量和水质的地表水地下水联合调度模型进行了回顾。这方面最近的研究参见文献[17~19]等。

(4) 灌溉与排水管理

由于缺水 and 盐碱化等问题,水量和水质综合管理的灌溉与排水研究从20世纪70年代开始不断发展,主要集中研究以下几个方面的问题:(1)高盐分的排水问题;(2)土壤盐分的长期积累问题;(3)由盐分问题引发的其他环境负效益问题。研究的方法可以分为:短系列法、长系列法和扩展长系列法。短系列法参见文献[20、21];长系列法参见文献[22、23];扩展长系列法参见文献[24、25]。

1.2.2.2 流域级的模型

流域尺度的分析包括两个类型的模型：根据预先设定的管理水资源系统分析和基础设施操作的规则(实际上是水文规则)对流域的水资源行为进行模拟的模型；根据目标函数(经济的或者综合的)和约束对水资源系统分析和基础设施进行优化和选择的模型。图 1-1 给出了流域尺度模型应用的示意图。模拟模型用来评估系统的运行；优化模型是用来改进系统的运行。流域尺度的模型可以同时具有模拟和优化能力。

(1) 模拟模型

模拟模型是评估一般情况下系统反应的首选方法,包括极端的和不平衡的状态、系统组成部分最薄弱的环节,及评估系统在和可能跨越数十年的可持续发展准则集合相联系的情况下的运行情况。具体地讲,模拟模型扮演了一个评判者的角色,用来评估水资源系统在全球气候变化、干旱和用水优先权不断改变(如城市用水不断增长)等情况下的系统运行状态。模拟模型包括：

- 流域径流模拟模型,如 AQUATOOL 模型。
- 流域水质模拟模型,如美国环境保护中心(EPA)的改进的河道水质模型 Enhanced Stream Water Quality Model (QUAL2E)。
- 流域水权模拟模型,如德克萨斯 A&M 大学水权分析包 Texas A&M University Water Rights Analysis Package (TAMUWRAP)模型模拟了美国西部的立法水权情况下,水文径流、水库操作和盐分转移等。
- 综合流域模拟模型,如交互式河流-地下水含水层模拟模型 Interactive River-Aquifer Simulation (IRAS),田纳西流域管理局环境与河流资源辅助模型 Tennessee Valley Authority's (TVA) Environment and River Resource Aid (TERRA),水权益模型 WaterWare model,欧洲水文系统模型 European Hydrological System (SHE),丹麦水力研究所综合水文系统模型 MIKE SHE。

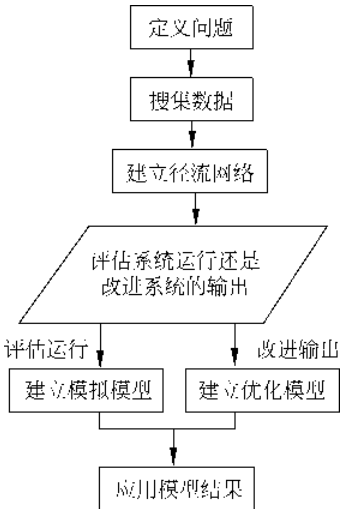


图 1-1 模型建立及应用示意图

(2) 优化模型

由目标函数和约束组成的优化模型必须有模拟部分,模拟部分的目的只是计算总体的水量平衡。优化模型的特点是可以在水资源系统中考虑社会价值问题。优化模型有两种基本类型:一种是水文优化模型,模型的目标是在水文规范的要求下优化配置部门内部的水资源;另外一种经济优化模型,通过水资源的系统分析,优化部门间的水资源配置,一些准则如公平性和环境质量等也应该在模型中考虑到。

在水库调度模型的基础上,扩展一些状态变量发展起来的水文优化模型,主要用于部门内的水资源系统分析。如 Vedula, Mujumdar^[26] 和 Vedula, Kumar^[27] 建立了简化的动态随机规划模型来最小化干旱条件下的粮食减产。Ponnambalam, Adams^[28] 用多级准优化动态模型来优化多个水库的调度。

Babu, Nivas 和 Traxler^[29] 提出了严格经济优化方法的数学方程。McKinney, Cai^[30] 和 McKinney, Karimov, Cai^[31], 用 GAMS 和 ArcView GIS 作为工具建立了水文的政策分析工具并应用于流域尺度的水资源系统分析。这种方法最近被扩展应用于种植决策和灌溉排水系统的改进。

(3) 模拟和优化综合模型

EUREKA-ENVINET INFOSYST 是 1992 年欧洲发起的基于决策支持的一个综合流域管理系统。这个系统从方法论上将所有的可利用的淡水作为水产业的一部分来对待(Fedra, Weigkricht 和 Winkelbauer 1993^[32]), 包括 GIS、数据管理系统、模型、优化技术和专家系统。

Lee 和 Howitt^[33] 建立了科罗拉多河流域的水盐平衡模型,用于优化区域的农业和市政工业用水的净回报。Tejada-Guibert, Johnson 和 Stedinger^[34] 建立了一个重点考虑在不确定的径流和需求面前使水力发电最大化的优化模型,并应用于美国加利福尼亚州的 the Shasta-Trinity System。Faisal, Young, Warner^[35] 把综合的水资源系统模拟优化模型应用到地下水流域。

翁文斌、蔡喜明、王浩等人^[36] 将区域水资源规划纳入宏观经济范畴,阐述了基于宏观经济的区域水资源系统的概念,并以此为基础,建立了区域水资源规划多目标集成系统。该系统以宏观经济子模型及其他子模型为基础,并在多目标分析模型中集系统要素为一体,形成系统的总控模型。该系统具有预测、模拟、优化及决策分析等功能,是一个完善的区域水资源规划

分析工具。

水资源紧缺流域的模拟和优化模型是研究水资源紧缺的竞争关系和评估水资源系统的重要研究工具。图 1-2 显示了模拟和优化综合模型的应用流程。

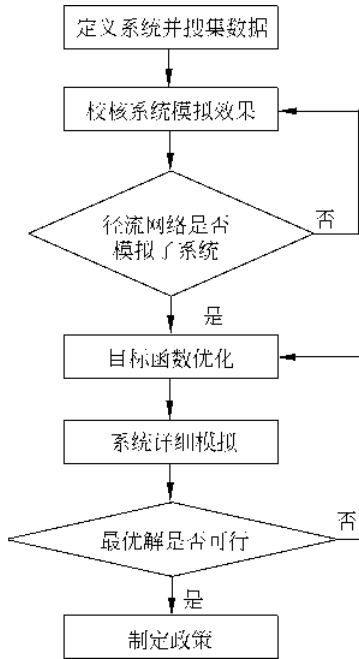


图 1-2 模拟和优化综合模型的应用流程

1.2.3 水资源系统中的经济估算

随着水资源的日益紧张和部门间对水资源竞争的加剧,流域水资源配置的经济后果显得越来越重要。因此,流域水资源系统分析模型需要将农业、工业、市政生活用水的效益统一考虑,同时对流域其他类型的用水,如环境、水质、娱乐和水力发电等,也要进行详细的描述。

1.2.3.1 农业用水价值评估

(1) 水的作物生产函数

作物需水和用水价值评估的基本组成部分是以水和其他因素为输入的作物水分生产函数。一个理想的作物水分生产函数可以解决作物级、