

水资源系统动力学特征 及合理配置的理论与实践

SHUIZIYUAN XITONG
DONGLIXUE TEZHENG
JI HELI PEIZHI DE
LILUN YU SHIJIAN

陈南祥 徐建新 黄强 著



黄河水利出版社

水资源系统动力学特征及 合理配置的理论与实践

陈南祥 徐建新 黄 强 著

黄 河 水 利 出 版 社

内 容 提 要

本书论述了水资源系统动力学特征和水资源合理配置的理论与实践。主要包括:水资源系统动力学特征分析方法研究;南水北调中线工程河南受水区水资源系统动力学特征分析;水文水资源要素预测模型;水资源合理配置理论体系研究;水资源系统多目标优化配置模型及求解南水北调中线工程河南受水区水资源合理配置;典型城市(郑州市)水资源配置方案研究。全书以理论与实例相结合,内容翔实,层次分明,具有较强的实用性。可供水资源规划管理、地质、地理和有关专业的科技工作者及管理人员参阅,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水资源系统动力学特征及合理配置的理论与实践/
陈南祥,徐建新,黄强著. —郑州:黄河水利出版社,2007.6
ISBN 978-7-80734-211-3

I. 水… II. ①陈…②徐…③黄… III. ①水资源—系统
动力学—研究②水资源—配置—研究—中国 IV. TV211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 081630 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真:0371-66022620

E-mail: hhsclbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:890 mm×1 240 mm 1/32

印张:6.625

字数:191 千字

印数:1—2000

版次:2007 年 6 月第 1 版

印次:2007 年 6 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-80734-211-3/TV·504

定价:20.00 元

前 言

水是自然生态的生命源泉,万物赖以生存的环境因子,更是人类社会发展的物质资源。人口增长、经济发展、水资源供需紧张、水旱灾害频繁和生态环境日益恶化的局面,已经引起世界各国政府的迫切关注和不安。如何研究解决水资源的最佳开发、治理、保护、利用,使其在促进生态环境与社会经济协调良性发展中发挥最大的经济效益,已经变得非常重要和迫切。

水资源时空分配不均使人类在饱受洪涝灾害之苦的同时,面临着越来越严重的缺水问题,并且越是经济发达地区,缺水情况越严重,水资源保护以及防灾减灾面临的问题和矛盾就越尖锐。这些复杂问题要求水资源工作者应以发展的观点、系统的观点来看待一个区域、一个流域乃至整个地球的水文循环规律和社会经济发展所面临的各种水问题。

本书针对复杂水资源系统水资源合理配置研究中的水资源系统动力学特征分析方法及水资源合理配置理论与方法进行研究。

水资源系统内在机理的研究是认识水资源系统规律的根本途径。地球上的水在太阳辐射和重力的作用下,以蒸发、降水和径流的方式周而复始地循环着。水资源系统与其他系统的不同点,除了具有通过自然界水文循环获得的可再生和更新补充功能外,更由于其在气态和液态时在势能的推动下具有较大的流动性,从而连成一个整体,以致在一个点的扰动会影响周围和其下游,这样又会造成矛盾。因此,在进行水资源规划和配置时,必须综合考虑水资源的自然条件和社会条件,其中对水资源系统的内在属性和动力学特征的认识是非常必要的,它是水文水资源要素模拟预报和水资源保护、规划、配置等工作的基础。

水资源合理配置是人类可持续开发利用水资源的有效措施之一。如何对水资源进行合理配置,为区域内经济社会的可持续发展提供水资源,是摆在我们面前迫切需要解决的问题。水资源合理配置研究,对

缓解水资源供需矛盾、促进经济健康发展、提高环境质量,都具有深远的意义。①促进水资源的合理有效利用。水资源优化配置的目的是,在不增加供水量,也不减少需水量的前提下,使总体效益最大化。②促进人口、资源、环境、经济协调发展。③促进工程水利向资源水利的转变。

本书主要研究水资源系统动力学特征分析方法、复杂水资源系统水文水资源要素预测、复杂水资源系统水资源合理配置理论与方法、复杂水资源系统多目标优化配置模型求解方法等,并以南水北调中线工程河南段受水区为实例,讨论水资源系统动力学特征及系统演化规律,建立水文水资源要素预测模型和基本优化技术与模拟技术耦合的多水源多用户多目标水资源合理配置模型。

本书是结合河南省 2004 年杰出人才创新基金项目“南水北调工程河南段水资源优化利用与管理决策软件研制”进行的,并得到了华北水利水电学院重点学科建设基金的资助。

参加本专题研究的主要人员还有单松波、徐晨光、雷宏军、张海丰、贾明敏、李跃鹏等。本研究得到河南省科技厅的大力支持和帮助,也得到河南省南水北调办公室、河南省水利勘测设计研究有限公司、郑州市供水节水办公室等的大力支持,在此一并表示感谢。

本书中的应用实例所涉及到的十多个地级市的自然、经济、社会等方方面面的数据资料来自于不同部门和不同版本,书中所应用的数据资料难免有出入,加之作者水平所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2006 年 10 月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(4)
1.3 研究存在问题及发展趋势	(13)
1.4 本书主要研究内容	(16)
1.5 拟采用的技术路线	(17)
第 2 章 水资源系统动力学特征分析方法研究	(19)
2.1 水资源系统	(19)
2.2 混沌理论	(22)
2.3 动力学系统混沌特征及测度	(30)
2.4 本章小结	(38)
第 3 章 南水北调中线工程河南受水区水资源系统动力学特征分析	(39)
3.1 系统特征指数计算	(39)
3.2 系统动力学特征分析	(53)
3.3 本章小结	(57)
第 4 章 复杂系统水文水资源要素预测模型	(59)
4.1 相空间重构神经网络预测模型	(59)
4.2 加权一阶局域法一步及多步预测模型	(64)
4.3 偏最小二乘回归神经网络预测模型	(66)
4.4 本章小结	(73)
第 5 章 复杂系统水资源合理配置理论体系研究	(74)
5.1 水资源合理配置的内涵	(74)
5.2 水资源配置的原则及目标	(76)
5.3 水资源合理配置机理	(80)
5.4 本章小结	(90)

第 6 章 复杂水资源系统多目标优化配置模型及求解	(91)
6.1 复杂系统水资源多目标优化配置模型的建立	(91)
6.2 模型求解方法——遗传算法	(95)
6.3 遗传算法求解水资源多目标优化配置模型	(103)
6.4 本章小结	(109)
第 7 章 南水北调中线工程河南受水区水资源合理配置	(111)
7.1 南水北调中线工程河南受水区概况	(111)
7.2 水资源合理配置的基本条件	(119)
7.3 水资源优化配置模型	(123)
7.4 水资源配置模拟模型	(129)
7.5 优化与模拟的耦合	(138)
7.6 配置方案结果比较与推荐方案分析	(140)
7.7 本章小结	(152)
第 8 章 典型城市(郑州市)水资源配置方案研究	(153)
8.1 郑州市水资源利用状况	(153)
8.2 郑州市水资源情势分析	(171)
8.3 水资源配置方案分析	(183)
第 9 章 总结与展望	(195)
9.1 研究成果	(195)
9.2 展 望	(196)
参考文献	(198)

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

水是自然生态的生命源泉,万物赖以生存的环境因子,更是人类社会发展的物质资源。人口增长、经济发展、水资源供需紧张、水旱灾害频繁和生态环境日益恶化的局面,已经引起世界各国政府的迫切关注和不安。如何研究解决水资源的最佳开发、治理、保护、利用,使其在促进生态环境与社会经济协调良性发展中发挥最大的经济效益,已经变得非常重要和迫切。人类为了充分开发和利用水资源,已兴建和正在兴建各种水利工程。实践证明,水利工程对一个国家的国民经济建设具有重要的作用。但是,由于水利工程的兴建,特别是大型水利工程的兴建,引起了河流水文、泥沙、地貌、生态环境等各个方面的变化,对人类的生存环境产生了各种各样的影响,既有有利的影响,也有不利的影响。同时水资源时空分配不均使人类饱受灾害之苦,并且越是经济发达地区,缺水情况越严重,水资源保护以及防灾减灾面临的问题和矛盾就越尖锐。这些问题对水资源工作者提出了挑战,同时也指明了研究方向,要求在做决策时应从系统的观点看待一个区域、一个流域乃至整个地球的水文循环规律和社会经济发展所面临的各种水问题^[1]。

然而,水资源系统复杂性和水资源资料信息的严重不足^[2],在一定程度上限制了水资源科学理论的发展。从系统理论的观点来看,流域、区域和全球的水资源循环是个高度非线性、开放性系统,其边界条件和初始条件都十分复杂。从信息论观点来看^[3],水资源系统存在诸多的未知和不完全知道的问题,其中包括时间、空间水文信息观测不完全。水文时间序列不仅记录了系统过去行为的信息,而且还隐藏着系统未来演化的信息。目前,宏观和中观尺度水资源系统研究主要采用半经验、概念性或随机性理论,而客观世界中的水文过程则是确定性与不确定性各种成分交织的复杂水文现象。尽管目前水资源学的研究取得了

令人鼓舞的成就,但至今本学科仍有许多重大问题需要探讨。换句话说,水资源系统学科的发展和研究并不成熟,因此在充分利用现代科学技术广泛收集水文信息的同时,如何结合中国的实际问题,开展既有中国特色又有国际水资源科学前沿及热点的水文学基础理论与方法应用研究,是一个富有时代特点和挑战性的问题。

水资源系统内在机理的研究是认识水资源系统规律的根本途径。地球上的水在太阳辐射和重力的作用下,以蒸发、降水和径流的方式周而复始地循环着。水资源现象在时间和空间上和其他物理现象一样具有必然性和偶然性,也即确定性和随机性。

水资源系统与其他系统的不同点,除了具有通过自然界水文循环获得的可再生和更新补充功能外,更由于其在气态和液态时在势能的推动下具有较大的流动性,从而连成一个整体,以致在一个点的扰动会影响周围和其下游,这样又会造成矛盾。因此,在进行水资源规划和配置时,不但要统筹兼顾,合理安排,按照当地的自然和社会条件,考虑合理开发的条件,而且还要对水文系统的内在属性和特征有一个充分的认识^[4],特别是水文系统的内在动力学特征。这些将对水文模拟、水文预报和水资源保护、规划、配置等工作奠定坚实基础。

水资源可持续开发利用关系全球发展战略,淡水短缺已经成为 21 世纪人类继全球变暖之后的第二大问题。

我国一方面水资源短缺,另一方面却又存在水资源分配不合理、利用率低及资源浪费严重等不良现象。随着社会经济的高速发展,水资源短缺成为制约各行业发展的关键因素。由于水资源的短缺,农业难以高产,工业难以布设,矿藏难以开发;由于缺水,通讯、交通、文教、卫生事业的发展也受到限制;等等。有关研究表明:我国 30 个省、自治区、直辖市中,北京等 9 个行政区划的区域发展与水资源极不匹配,占全国所有行政区划的 30.0%;内蒙古自治区的区域发展与水资源不匹配,占全国所有行政区划的 3.3%;吉林等 5 个行政区划的区域发展与水资源基本匹配,占全国所有行政区划的 16.7%;上海等 15 个省(市、区)的区域发展与水资源匹配,占全国所有行政区划的 50%。由此可见,在我国实施水资源优化配置尤为重要,特别是在水资源短缺的华北

和西北地区。本书将较为深入辩证地分析各种水资源优化配置问题,探索水资源优化配置理论的创新和完善。

据测算,我国未来 30 年供水量将增加 4 000 亿~4 500 亿 m^3 ,如果在水资源开发利用上没有新的突破,仅靠工程措施开发水资源,在管理上不能适应这种残酷现实,水资源很难满足国民经济发展的需要,水资源危机将成为所有资源问题中最为严重的问题,它将威胁中华民族的腾飞。因此,合理分配有限的水资源,以及提高水资源的利用效率,已成为水资源管理中现实而紧迫的任务。

如何对水资源进行合理配置,为区域内工业、农业发展和人民生活、生态环境提供水资源,使其获得最大的社会、经济、生态环境效益是摆在我们面前迫切需要解决的问题。进行区域内水资源合理配置研究,缓解水资源供需矛盾,这对水资源短缺区域的经济发展与环境质量的提高都具有深远的意义^[4]。概括起来有以下几方面。

1.1.1 促进水资源的合理有效利用

水资源优化配置的目的是:在不增加供水量也不减少需水量的前提下,使总体效益最大化。这是因为水资源配置是以综合效益最大为目标,利用优化和模拟技术,通过产业结构调整,减少水资源单耗量大的用水部门的占有量,使水资源得到合理有效利用。正如汪恕诚部长在“水权和水市场”的讲话中所指出的,通过水资源优化配置提高水资源利用效率,实现水资源可持续利用,这是 21 世纪我国水利工作的首要任务^[5]。

1.1.2 促进人口、资源、环境、经济协调发展

发展是永恒的主题,片面的经济增长并不一定意味着社会和谐发展。经济增长型的水资源配置方式,虽取得了经济的迅速增长,却带来了环境污染和生态破坏,对人类的生存和发展构成了威胁;只有人口、资源、环境、经济相互协调发展,才是最佳的发展模式。这种持续发展的协调型水资源配置方式,是在保护生态环境的同时,促进经济增长和社会繁荣,保证可持续发展顺利进行。

1.1.3 促进工程水利向资源水利的转变

水资源合理配置虽然无法从数量上增加可供水量,但它是减缓水

资源供需矛盾的最经济、最快速的方法,同时它还使科学技术渗透到水资源管理工作中,提高管理者的科学意识和管理水平,促进工程水利向资源水利的转变^[6]。

我国是一个水资源短缺的国家,水资源缺乏且时空分布不均已对中华民族的生存和发展构成重大威胁,南水北调对解决水资源问题将起到重要的作用。1992年,江泽民总书记提出要抓紧南水北调等跨世纪特大工程兴建,南水北调工程的实施被提上国家的议事日程。南水北调中线工程的水源区具有水质好、覆盖面大、自流输水等优点。此项目为举世瞩目的特大型工程,预计工程投资1 170亿元,其中一期工程总引水量为92亿 m^3 ,河南省一期工程预计分得净水资源37.3亿 m^3 ,占总水量的40.5%。受水范围涉及河南省12个市(地区),总面积23 600 km^2 ,占全省范围的14.1%。该工程的建设与运用对改善河南省严重缺水状况,改善生态环境,保证河南省的国民经济持续发展,均具有十分重大的影响。因此,通过引进先进的理论方法、计算机技术,结合工程实际,开展复杂系统水资源合理配置理论与方法的研究,对于优化工程运行管理,实现水资源的合理配置,提高工程管理工作的科技含量和提高水资源的利用效率及利用效益,具有非常重要的作用,并且将产生十分巨大的经济效益、社会效益和环境效益。

本项研究是结合河南省2004年杰出人才创新基金资助项目“南水北调工程河南段水资源优化利用与管理决策软件研制”进行的。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 复杂水资源系统动力学特征及系统要素预测

混沌研究的鼻祖是法国的庞加奈(H. Poincaré, 1854~1912),他在研究能否从数学上证明太阳系的稳定性问题时,发现即使只有三个星体的模型,仍产生明显的随机结果。1902年,庞加奈在《科学验证》一书中提出了庞加奈猜想,把动力学系统和拓扑学有机地结合起来,提出了三星问题在一定范围内求解是随机的,这实际上是一种保守系统中的混沌,后经柯尔莫哥洛夫、洛伦兹、李天岩和约克等人的发展^[7~9],到20世纪80年代,人们重点研究从有序进入新的混沌,以及混沌的性质

和特点。法国数学家曼德布罗特(Mandelbrot)在1950年用计算机绘出了第一张Mandelbrot集的混沌图像。20世纪80年代初期,Takens、Rechard、Farmer等人根据Whitney拓扑嵌入定理,提出了动力学轨道相空间的延迟法,Graciberger、Procaccia首次选用这种相空间重构法,从实验数据时间序列计算出实验系统的奇怪吸引子的统计特征,如分维数、Lyapunov指数和Kolmogorov熵等混沌特征量,从而使得混沌理论进入实际应用阶段^[10,11]。

自20世纪90年代以来,混沌科学与其他科学相互渗透,在数学、物理学、生命科学、地球科学、信息科学、经济学、天文学等领域,均得到了广泛的应用^[12]。林振山用混沌科学和相空间重构理论系统地研究了长期天气预报问题^[13,14],并从动力学的角度出发,以非线性动力学系统的两个最为重要的特征物理量——分维数和Lyapunov指数为指标来区划中国气候等^[15];郝海、高红兵、韩秀文等在石油价格动力学系统、股市趋势、投资和资本市场等,做出了许多开创性工作^[16-18]。

国外,Hense等^[19]于1987年首次提出降雨序列可能存在混沌,利用关联维数法分析Nauru岛1008个月降雨量资料组成的序列,计算出关联维数一般为2.5~4.5,进而指出月降雨量序列可能存在混沌现象,为混沌分析方法在水文学中的应用开辟了先河,后来许多学者相继对此问题进行了积极的探讨。Rodriguez Lturbe等在1989年分析了美国波士顿的一次自记暴雨过程,发现其具有一定的混沌特性,进而讨论了混沌理论在水文学中的应用潜力。Jayawardena等^[20]在1994年分别应用Lyapunov指数法、Kolmogorov熵法、关联维数法以及非线性预测法,研究了香港地区3个雨量站的日降雨量序列和2个水文站的径流量序列的混沌特性,指出香港地区的日降雨径流序列确实存在着混沌现象。Puente等^[21]在1996年利用Kolmogorov熵法、Lyapunov指数法、关联维数法,分析了Boston城的日降雨量序列,从多种途径均得出日降雨量序列存在混沌特征。Porporato等^[22]在1997年以意大利Po河的支流Dora Baltea河流的日径流资料为例,利用关联维数法和非线性预测法来研究由14246个数据组成的日径流量序列,结果表明存在着明显的混沌特征。

S. Bordignon、F. Lisi^[23]分析了意大利 Adige 河流 1955~1981 年的日平均流量时间序列的混沌特性,并利用 Poincare section 方法、Grassberger-Proccaccia 饱和关联维数法、最大 Lyapunov 指数计算法,计算了混沌特征量和嵌入参数,认为系统是带噪声的混沌非线性确定性系统,并采用一阶多项式拟合,以邻域内局域线性化的非线性模型和 1, 2, ..., 15 的步长预测了 850 个数据。与随机 AR 模型比较,混沌时间序列预测明显较好,并且另外采用了降雨和流量的二维时间序列,预测效果明显改善。

Jiri Stehlik^[24]在 2000 年对降雨量和温度每隔 30 分钟采样,分别为 7 500 个和 17 520 个数据,进行混沌时间序列特征值的计算,分析认为这 2 种时间序列是具有混沌可能性的,并将最大 Lyapunov 指数的倒数 48 分钟作为可以预测的长度。

M. N. Islam, B. Sivakumart^[25]于 2002 年采用非线性动力系统理论研究了 1975~1993 年 9 年间的 Lindenberg 日流量时间序列。首先用自相关函数法和傅里叶功率谱法获得序列的基本性质信息,认为系统具有混沌系统应有的特征。采用互信息法计算时间延迟,饱和关联积分法计算嵌入维数,采用局域二阶多项式进行预测,以一天为步长作一步预测,预测一年 365 个数据。通过预测效果的比较认为,由于噪声的影响,随着嵌入维数的增大,预测误差在到达一个最小值以后又趋于上升趋势。

国内,傅军、丁晶等^[26]1996 年对金沙江屏山站 1950~1985 年共 36 年的汛期日径流过程进行混沌分析,认为日流量过程的丰枯变化对揭示洪水变化会造成干扰,故将枯水季节阶段概化为一点,而仅取汛期日径流,共 5 508 天的数据。通过饱和关联维数法、最大 Lyapunov 指数、Kolmogorov 熵,这些混沌特征指数表明汛期日径流数据可能具有混沌特征。

1996 年丁晶等^[27]进一步作了预测研究,对汛期径流序列采用邻近点的多点加权平均和线性回归两种局域预测,预见期为 3 天,数据长度为 1 年。预测结果认为,两种方法合格率均为 90% 以上。赵永龙等^[28]1998 年继续分析了上述汛期日流量序列,用小波基函数网络模型进行

一步预测,按水文常用的合格标准,相对误差不超过实测值的20%~30%,模型合格,且优于多元回归预测。

魏一鸣等^[29]1998年分析了九江1985~1996年降水序列,用饱和关联维法计算了关联维数和Kolmogorov熵,认为符合混沌特征。杨思全等^[30]1999年研究了河冰湖和冰川突发洪水的混沌特征量,对近40年的将近20次突发洪水的洪峰流量序列进行研究,认为该类洪水的洪峰流量时序列具有混沌特征。陈云浩等^[31]2001年对上海市1994~1998年的旬降雨量时间序列进行研究和分析,计算了最大Lyapunov指数、关联维数和Kolmogorov熵,认为符合混沌特征。袁鹏等^[32]2002年对6个水文站的月降雨量数据进行混沌特征分析,指出月降水系统可能存在混沌现象。周寅康等^[33-35]研究了淮河流域洪涝变化动力系统,进行了500年的年洪涝特征序列的研究,计算了关联维数、最大Lyapunov指数和Renyi熵 K_2 ,认为淮河流域洪涝系统是一个混沌动力系统。陈南祥等^[36]用重构一维水文时间序列方法对水文时间序列的可预报时间尺度进行了研究,发现该序列具有混沌特征,同时指出水文要素在一定时段内是可预报的。柳景青^[37]2004年对城市1小时和24小时两种时间间隔的用水量进行连续时间的最大尺度预测,结果表明用水量系统具有混沌特性。

宋宇等^[38]利用相空间重构技术、G-P算法及Wolf提出的从单变量时间序列中提取Lyapunov指数方法,分别计算了太原盆地4组地下水水位时间序列的关联维数和Lyapunov指数。结果揭示在自然状态下,太原盆地某些空隙潜水和空隙承压水水位变化存在明显的混沌特征。这为以后建立地下水数学模型提供了理论依据,也为运用分形理论研究地质参数的时空变异性以及含水层结构的自相似性提供了进一步支持。

虽然近来很多论文和文献的水文混沌时间序列的研究表明水文序列不能排除混沌性质,也作了预测效果检验,但是对于水文时间序列的混沌性质以及混沌时间序列的预测方法现在仍有很多争论。

2002年Daniel Schertzer、Ioulia Tchiguirinskaia^[39]与Bellie Sivakumar、Ronny Berndtsson、Jonas Olsson、Kenji Jinno^[40]在Hydrological Sci-

ence 展开了水文的混沌性质的讨论。B.Sivakumart^[41]认为,当前对于混沌时间序列方法的置疑主要是由于两方面的原因,一是由于混沌时间序列的无噪声序列无限长的前提条件不能满足,二是由于当前的理论条件不能够对混沌的存在提供无可辩驳的证明。文中回顾了近年来水文混沌序列研究的现状,指出混沌理论的前提条件,即无噪声以及时间序列无限长,对于预测和计算的影响。文中认为,时间序列长度的影响并不是像想象中那么严重,数据序列的长度依赖于吸引子的类型和维数。而噪声的影响却比较大,且噪声对于混沌预测的影响大于它对关联维数计算的影响。文中同时提出,混沌时间序列预测的低精度主要是由于噪声导致的,并且提出应该采用多种技术,对不同方法的计算结果进行比较,验证其是否一致,从而更有力地证明混沌存在。

当前水资源系统领域对于混沌方法的置疑,主要是由于一直以来对水资源系统研究是考虑要素的多变量和随机性。当前的研究结果支持看似复杂的水资源系统,可能是由于低维的简单的确定性系统导致的。因此,水资源系统的混沌性假设是合理的,并且为水资源动力系统的描述和模拟提供了一种新的代替方法,必将获得更多的支持。

1.2.2 水资源配置研究

1.2.2.1 以水量配置为主的水资源优化配置研究

国外,以水资源系统分析为手段、水资源合理配置为目的的各类研究工作,首先源于 20 世纪 40 年代 Masse 提出的水库优化调度问题。50 年代以后,随着系统分析理论和优化技术的引入以及 60 年代计算机技术的发展,水资源系统模拟模型技术得以迅速研究和应用,水资源系统模拟模型和优化模型的建立、求解以及应用研究不断得到提高。比较正式的研究始于 60 年代初期,1960 年科罗拉多的几所大学对计划需水量的估算及满足未来需水量的途径进行了研讨,体现了水资源优化配置的思想。N·伯拉斯所著《水资源科学分配》^[42](1983),可以说是较早的系统研究水资源分配理论和方法的专著。该书简要阐述了 20 世纪 60~70 年代发展起来的水资源系统工程学内容,较为全面地论述了水资源开发和计算机技术在水资源工程中的应用。正如作者所说,此书是“数学分析应用在水资源工程中的研究成果及其推广的结

果”。

水资源合理配置研究的发展,是与水资源的持续利用和人类社会协调发展密不可分的。同时,水资源系统优化调度和分配、水资源宏观区域规划、水环境战略保护以及采取全面节水措施、营造节水型社会等方面都有很大的进步。随着水利工程的不断实施,水资源合理配置基础设施建设和管理手段的进一步完善,真正意义上的水资源合理配置已成为可能。

20 世纪 70 年代以来,伴随数学规划和模拟技术的发展及其在水资源领域的应用,水资源优化配置的研究成果不断增多。Pearson 等^[43](1982)利用多个水库的控制曲线,以产值最大为目标,输水能力和预测的需求值作为约束条件,用二次规划方法对英国 Nawwa 区域的用水量优化分配问题进行了研究。同年,英国学者 P.W.Herbertson 等^[44],针对潮汐电站的特点,考虑多部门利益的相互矛盾,利用模拟模型对潮汐海湾的新鲜水量分配进行了模拟计算,展现了模拟技术的优越性;荷兰学者 E.Romjin、M.Taminga^[45]考虑了水的多功能性和多种利益的关系,强调决策者和决策分析者间的合作,建立了 Gelderlandt Doenthe 的水资源量分配问题的多层次模型,体现了水资源配置问题的多目标和层次结构的特点。G. Yeh^[46](1992)对系统分析方法在水库调度和管理中的研究与应用曾作了全面评述,他把系统分析在水资源领域的应用分为线性规划、动态规划、非线性规划和模拟技术等。Willis^[47](1987)应用线性规划方法求解了 1 个地表水库与 4 个地下水含水单元构成的地表水、地下水运行管理问题,地下水运动用基本方程的有限差分式表达,目标为供水费用最小或当供水不足情况下缺水损失最小,同时,用 SUMT 法求解了 1 个水库与地下水含水层的联合管理问题。

国内,水资源配置是以水库(群)调度和地下水管理以及地表水与地下水联合运用管理为先导的。水资源优化配置的理论研究经历了“以需定供”、“以供定需”、“基于宏观经济的水资源配置”三个阶段,以及目前的“可持续发展的水资源配置”第四个阶段。进入 20 世纪 80 年代以后,我国系统地开展了水资源科学分配方面的研究和应用工作,特

别是在水资源优化配置的基本概念、优化目标、基本平衡关系、需求管理、供水管理、水质管理、经济机制、决策机制及各主要模型的数学描述等方面,均有新的研究成果。20 世纪 80 年代初,以华士乾教授为首的课题组对北京地区的水资源利用系统工程方法进行了研究,并在“七五”国家重点科技攻关项目中加以水量的区域分配、水资源利用效率、水利工程建设次序以及水资源开发利用对国民经济发展的作用,成为我国水资源配置研究的雏形。“水资源优化配置”一词在我国正式提出是 1991 年^[48,49]。

流域水资源优化配置方面:黄河水利委员会(1998)进行了“黄河流域水资源合理分配及优化调度研究”,综合分析区域经济发展、生态环境保护与水资源条件,是我国第一个对全流域进行的水资源配置研究,对构建模型软件,实施大流域水资源配置起到了典范作用。王浩、秦大庸等^[50](2001)在黄淮海流域水资源合理配置研究中首次提出水资源“三次平衡”的配置思想,系统地阐述了基于流域水资源可持续利用的系统配置方法,其核心内容是在国民经济用水过程和流域水资源循环转化过程两个层面上分析水量亏缺问题,并在统一的用水竞争模式基础上研究水资源配置问题。王浩、秦大庸等^[51](2002)系统地阐述了在市场经济条件下,水资源总体规划体系应建立以流域系统为对象、以流域水循环为科学基础、以合理配置为中心的系统观,以多层次、多目标、群决策方法作为流域水资源规划的方法论。

区域水资源优化配置方面:“九五”期间,针对西北内陆干旱区的实际情况,提出了内陆干旱区水资源演化的“天然-人工”二元水循环模型,从单纯配置国民经济用水,向同时配置国民经济用水和生态环境用水过渡。吴泽宁等^[52](1997)以跨流域水资源系统的供水量最大为目标,将模拟技术和数学规划方法相结合,建立了具有自优化功能的流域水资源系统模拟规划模型,并以大通河和湟水流域为例对模型进行验证,提出了跨流域调水工程的规模。甘泓、尹明万等^[53](2004)结合新疆的实际情况,研制出可适用于巨型水资源系统的智能型水供需平衡模型,该模型有两个突出特点:一是考虑了生态需水问题;二是考虑水系统结构复杂、要素众多等特点,采用了智能化技术,确保了计算精度