

区域水资源

多目标均衡调度研究与应用

QUYU SHUIZIYUAN DUOMUBIAO JUNHENG DIAODU YANJIU YU YINGYONG

王婷 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

区域水资源

多目标均衡调度研究与应用

王婷 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书针对水生态文明建设中水资源安全保障问题,以水资源调度为核心,系统提出了以“水库入流预报—地下水循环修正—水量宏观决策—水利微观运行—调度效果评价”为具体调控手段的区域水资源多目标均衡调度技术体系,研究地表水、地下水资源量动态变化情况下的水量宏观配置技术,探讨区域水资源宏观配置与微观调度运行的耦合机制,构建区域水资源多目标均衡调度模型并求解,对多目标均衡调度效果进行评价,形成了一整套区域水资源多目标均衡调度技术,可为水生态文明试点建设和水资源安全保障提供强有力的技术支撑和决策参考。

本书可供水资源规划及相关领域的科技工作者、管理人员参考使用,也可供大专院校相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

区域水资源多目标均衡调度研究与应用 / 王婷著

— 北京:中国水利水电出版社,2020.12

ISBN 978-7-5170-9333-6

I. ①区… II. ①王… III. ①区域资源—水资源管理—研究 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第270256号

书 名	区域水资源多目标均衡调度研究与应用 QUYU SHUIZHIYUAN DUOMUBIAO JUNHENG DIAODU YANJIU YU YINGYONG
作 者	王婷 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 (营销中心)
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
刷 印	北京虎彩文化传播有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8.25印张 162千字
版 次	2020年12月第1版 2020年12月第1次印刷
印 数	001—600册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水是基础性的自然资源和战略性的经济资源，随着经济的高速发展和社会的不断进步，水资源短缺已经日趋影响到各国经济的发展及社会的稳定，其重要性已经受到社会各界的关注。近年来，随着国民经济的发展，我国水资源供需矛盾逐渐凸显，加之日常活动带来的水污染问题以及全球气候变化、人类活动加剧等造成的水资源供需不平衡的严峻形势，已成为制约我国社会经济可持续发展的主要因素之一。我国淡水资源总量约为 2.8 万亿 m^3 ，占全球水资源的 6%，仅次于巴西、俄罗斯和加拿大，位列世界第四，但水资源总量丰富的背景下，人均水资源量却严重偏低。面对自然界有限的可利用水资源量，如何实现其高效可持续利用已成为全社会共同关注的重大问题。

21 世纪以来，随着城市规模的不断扩大以及经济条件的不断改善，城市对水资源的需求越来越大，造成很多城市水资源与经济社会发展的供需不平衡。城市水资源系统复杂多变，其水源多样化，各类用水户对水源的数量与质量在时空上要求不一，城市复杂系统的水资源调配问题是一个典型的多水源多目标优化调配问题，实际上是求一个能满足各个目标之间利益的“均衡”解，而非单个目标的最优解。因此，在城市水资源总量控制的基础上，如何更加科学地实现对城市水资源的宏观规划与具体调度运行成为了当今水资源领域的重要研究课题。

为此，本书深入分析区域水资源系统“多目标”“均衡性”的特点与内涵，以水资源调度为核心，系统提出了以“水库入流预报—地下水循环修正—水量宏观决策—水利微观运行—调度效果评价”为具体调控手段的区域水资源多目标均衡调度概念模型与技术体系。同时，深入研究水资源宏观配置与微观调度的耦合方式及模拟模型，并对基于宏观配置的区域水资源多目标均衡调度方案进行效果评价，分

析规划与管理相结合后的水资源运行方式对社会、经济、生态环境等系统内在的协调性与互动性的影响。最后，对山东省济南市水资源系统开展了应用研究。

本书的出版得到了水利部公益性行业科研专项经费项目“水生态文明建设关键技术研究及示范（项目编号：201401003）”的资助。本书是在前期研究成果《济南市水生态文明建设水资源保障技术研究》基础上，对水生态文明建设中区域水资源保障技术进一步研究并凝练而成。本书共分为7章，分别为：绪论、区域水资源多目标均衡调度基本理论、区域水量宏观总控配置研究、区域水资源多目标均衡调度模型构建与求解、区域水资源多目标均衡调度效果评价、应用研究、总结与展望。

在课题研究和本书撰写过程中，得到了山东省水利厅、山东省水利科学研究院、山东省水利设计院、济南市水利局、济南市水文局、济南市水利设计院、河海大学等单位领导和专家的大力支持与帮助。对支持和帮助过本课题研究及本书撰写出版工作的有关单位领导及专家，致以衷心的感谢和崇高的敬意！

由于作者水平所限，加之时间仓促，书中难免错误及疏漏之处，敬请读者批评指正。

作者

2020年10月

于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 主要研究内容与技术路线	14
第 2 章 区域水资源多目标均衡调度基本理论	17
2.1 理论基础	17
2.2 概念及内涵	19
2.3 概念模型	21
2.4 技术体系	22
2.5 本章小结	25
第 3 章 区域水量宏观总控配置研究	26
3.1 区域水量宏观总控配置技术框架	26
3.2 水库入流预测模型	28
3.3 多水源多目标水资源宏观配置模型	34
3.4 地下水均衡模型	37
3.5 本章小结	39
第 4 章 区域水资源多目标均衡调度模型构建与求解	40
4.1 区域水资源配置与调度耦合分析	40
4.2 区域水资源多目标均衡调度模型构建	42
4.3 基于高斯优化混沌粒子群算法 (GCPSO) 的模型求解	47
4.4 本章小结	49
第 5 章 区域水资源多目标均衡调度效果评价	50
5.1 效果评价原则	50
5.2 效果评价方法的选取	51
5.3 水生态足迹理论	51
5.4 效果评价模型	53

5.5	本章小结	54
第 6 章	应用研究	55
6.1	济南市概况	55
6.2	济南市水量宏观总控配置研究	58
6.3	济南市水资源多目标均衡调度模型构建与求解	71
6.4	济南市水资源多目标均衡调度效果评价	102
6.5	本章小结	105
第 7 章	总结与展望	107
7.1	总结	107
7.2	展望	109
附录	主要变量表	111
	参考文献	115

绪 论

1.1 研究背景与意义

水资源是社会经济发展的重要保障之一，其重要性已经受到社会各界的高度关注。近年来，随着社会经济的快速发展，以及受全球气候变化、人类活动加剧、水污染等因素的影响，我国水资源供需矛盾已经逐渐凸显，成为了制约社会经济可持续发展的主要因素之一。因此，有必要按照“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水新思路，围绕国家重点战略发展需求和区域资源环境条件，系统研究能够促进水资源可持续利用的方式方法。

我国先后出台了一系列与水资源管理、利用等有关的政策。2011年，中央1号文件《关于加快水利改革发展的决定》（国发〔2011〕1号）中明确要求实行最严格水资源管理制度，确立水资源开发利用控制红线、用水效率控制红线和水功能区限制纳污红线；2012年，国务院3号文件《关于实行最严格水资源管理制度的意见》（国发〔2012〕3号）进一步对我国未来一段时期在水资源高效利用方面提出了具体要求；2013年，党的十八大在水利宏观布局、水资源高效管理等方面作出了重要部署，同时传达了水生态文明建设重要精神；2016年，中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于全面推行河长制的意见》中明确指出全面推行河长制是落实绿色发展理念、推进生态文明建设的内在要求，也是解决中国复杂水问题、维护河湖健康生命的有效举措。目前，我国对水资源方面的关注，已从以往对水资源的开发利用向水资源的高效配置、节约与保护方向转移^[1]。因此，在水资源总量控制的基础上，提高水资源利用效率、促进人水和谐发展成为了新时期水资源管理工作的重中之重，而加强水资源的管理调控为这项工作提供了重要方向。

随着区域经济的不断发展，水资源管理调配工作已从单一的调配目标逐渐向多目标发展，已从以往单纯注重社会经济利益逐渐向兼顾生态环境利益考虑。同

时, 水资源管理调配系统已不再局限于单一水源调配, 多水源联合调配已逐渐成为国际研究热门话题, 区域复杂系统的水资源调配问题是一个典型的多水源多目标优化调配问题。因此, 研究区域复杂系统的水资源调配问题, 归根结底是在保障水质安全的前提下, 利用不同水利工程, 使得有限的水资源(不同水源的综合)能够尽可能满足不同用水目标在不同时段的水资源需求。为此, 开展水资源多目标均衡调度是适应区域水资源供需特点、合理有效利用水资源的重要途径。

水资源与经济社会发展的不平衡已经成为了我国新时期的典型现象, 这也造成了很多区域水资源供需不平衡, 且未来随着全球气候变暖, 生活、生产及生态用水需求量将会有一定幅度的增长^[2]。为了缓解区域供水紧张的局面, 对水资源进行科学的规划以及合理的调配显得尤为必要。水资源配置和水资源调度是实现水资源合理调配的两个不可分割的步骤, 通过水资源合理配置实现宏观层面的水资源整体规划, 通过水资源调度将配置方案落实到微观调配实践当中, 可以看出, 只有将水资源合理配置方案作为调度方案的总控, 两者相互嵌套, 才能保障水资源调度整体的合理性。水资源合理配置的模拟是根据多年历史来水系列和相应年份的用水资料, 建立合理配置模型进行长系列运行操作求得的, 它反映了在多年来水情况下, 为获得全系统最佳效益所应遵循的调度方式。在通常情况下, 可利用该配置模型制订年调度运行计划, 并可获得相应多年系列的最佳效益。然而, 把该配置模型应用于某个具体调度时段(如旬、日等)进行调度时, 未必能获得最佳效益, 甚至出现较大的偏差, 同时这种模型也无法准确描述系统在具体调度时段的状态, 无法给出某一具体时段的调度过程, 所以需要研究水资源在具体时段的最优调度决策。因此, 如何实现水资源宏观配置与水资源微观调度的紧密耦合是今后在水资源调配研究领域应该着重思考的课题。

为此, 本书基于可持续发展理论、均衡理论及优化调度理论, 将宏观的水资源配置规划与微观的水资源调度管理相结合, 把配置方案的输出结果作为调度模型的用水边界数据。同时, 对基于宏观配置方案的水资源调度方案进行水生态可持续性评价, 分析规划与管理相结合后的水资源运行方式对社会、经济、生态环境等系统内在的协调性与互动性的影响, 以实现未来水资源的宏观规划与运行管理的相协调, 对科学、合理、可持续利用区域水资源及保障区域水资源安全等具有重要的理论与实际意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水资源配置理论与技术研究进展

水资源配置是在统筹考虑流域或区域社会、经济、生态环境等多重目标的

前提下,为解决区域间、代际间、不同用水户间的竞争性用水问题,对流域或区域有限可利用水资源进行重新分配的过程,其研究历程与人类社会、经济、科学技术水平等的发展息息相关。水资源配置在研究尺度上,经历了从20世纪50年代的基于水库、电站等单一水利工程控制单元的宏观配置,到60—70年代之后的流域、区域以及跨流域水资源配置等研究过程;在研究主体上,经历了从单一的水量配置到水质、水量联合调控,从单一的地表水水源配置到地表水、地下水、非传统水源及外调水等多水源联合调控的过程;在研究方法上,经历了由单一数学规划模型到向量优化、模拟技术等多方法并行的过程,且在高速发展的科学技术背景下,水资源配置技术也由原来的单纯简单数学规划逐渐向模拟优化、人工智能、空间技术过渡^[3]。国外关于水资源配置的研究起源于水资源量的宏观配置,且之后更注重对水资源配置各要素的探索,如水量、水质、水权等;而国内对水资源配置的研究,则更注重理论方法体系的挖掘及与实践的结合验证等。

1. 国外水资源配置研究动态

国外水资源配置的萌芽起于1922年美国科罗拉多河流域的7个州共同签订的水资源分配协议,而实际意义上对水资源宏观配置的研究则应源于20世纪40年代美国学者Masse所提出的以水资源宏观配置为目的的水库优化调度问题。

(1) 单纯注重水量的水资源配置阶段。20世纪50—60年代,随着水资源配置理论方法和技术手段的不断提升,复杂水资源系统的配置问题也能够得到很好的解决。Emery等^[4]通过构建水库调度问题的模拟模型解决了尼罗河流域水量宏观配置问题。同年,科罗拉多的几所大学秉持着宏观配置的思想,在对研究区域计划需水量进行合理估算的基础上,同时系统研究了能够满足未来需水量的有效途径。70年代以后,基于之前大量的研究积累,关于水资源配置方面的研究成果逐渐增多,这期间对水资源配置的系统分析方法及模型技术也日益丰硕。其中,在Buras出版的《水资源科学分配》^[5]一书中,系统阐述了动态规划与线性规划在水资源宏观配置中的应用途径。之后,Dudley等^[6]运用动态规划的方法研究了灌区水资源宏观配置问题。Haimes等^[7]综合考虑地表水、地下水的联合调配效益,从多水源多目标角度出发,构建了水资源宏观配置模型对多水源水资源量进行宏观配置。之后,Cohon等^[8]在此基础上,对多目标水资源规划编程技术进行了系统研究。1979年,美国麻省理工学院(MIT)在大规模水资源配置研究过程中,应用模拟模型技术对阿根廷Colorado流域水量的利用进行了系统研究,并提出了基于多目标技术的规划理论。80年代以后,系统分析方法在水资源规划和管理方面的应用更加成熟,同时伴随着计算机技术的日益成熟与地理信息系统的蓬勃发展,水资源配置研究在广度和深度上都得到了不断延伸。其中,Loucks等^[9]发表的《水资源系统规划与分析》及Yeh^[10]发表的《水库管理和经营模式》是该时期较为典型的理论研究成果。前者主要从

运用系统分析方法指导水资源工程规划、设计及运行管理的角度对水资源规划进行全面阐述,后者在全面回顾 20 世纪 60 年代以来水库运行、管理数学模型的基础上,分析其利弊,并将水资源领域的系统分析方法划分为线性与非线性规划、动态规划和模拟技术等^[11]。英国学者 Herbertson 等^[12]采用系统分析与模拟模型技术对潮汐海湾多利益冲突部门之间的水量分配进行了研究。Pearson 等^[13]应用二次规划方法对 Nawwa 地区的水量分配进行了模型研究,模型以地区产值最大为目标,并着重考虑了水库调度曲线及未来水资源需求量的变化。荷兰学者 Romijn^[14]在考虑多用水户之间相对利益关系及水资源各项功能的基础上,建立了多层次水量分配模型对区域水资源量进行多层次分配研究。同年,在美国召开的“水资源多目标分析”会议进一步对多目标决策理论与技术在水资源管理领域的应用进行了系统概述。Willis 等^[15]考虑地表水、地下水联合调控管理因素,以研究区供水费用最小、缺水损失最小为目标,运用线性规划与 SUMT 法构建了水资源配置模型并进行了求解。之后,Willis 等^[16]在之前的研究基础上对水资源配置模型进行优化,将地下水相关方程耦合到模型的约束条件中,并以中国华北平原地区为例构建了地表水-地下水耦合规划模型。在这之后,多用户交互式模型以其能够体现资源分配的公平性被逐渐熟知,最为典型的案例为 Salewicz 等^[17]开发的为帮助协调各用水户之间相互利益的交互式流域协商模拟模型(IRIS),该模型能够提高公众对水资源分配的参与度,体现了水资源配置的公平性。

(2) 考虑水质的水资源配置阶段。20 世纪 90 年代前后,人类社会经济快速发展所带来的对水资源的巨大需求与水资源短缺之间的矛盾愈演愈烈,伴随而来的水污染事件也层出不穷。面对这一现象,国外学者开始将水资源配置研究的侧重点转向水质因素、生态环境效益等方面^[18-19]。学术界对水质的研究可追溯到 1925 年由 Streeter - Phelps 建立的水质模型,可见水质模型研究历史相当久远^[20]。然而,20 世纪 90 年代之前,人们对水质的研究仅限于环境科学领域,尚未将其引入到水资源开发利用领域,这两个领域长期以来交叉互动极少,因此在这之前缺乏将水质因素考虑到水资源宏观配置中的研究成果。随着学科交叉的推动,人们逐渐认识到水质对于水资源合理配置的重要性与必要性,在此时期出现了不少研究成果,很多国家也因此制定了地表水和地下水的水质标准,并建立了河、湖、库等水利工程的各类水质模型^[21-22]。Afzal 等^[23]针对不同水源水质差异问题,通过建立水资源分配线性规划模型,对巴基斯坦某一供水系统内有限的地表水资源量及水质较差的地下水资源量进行合理分配。Percia^[24]在综合考虑不同用水户对供水水质差异的基础上,以经济效益最大化为目标函数构建了多水源联合配置模型。Kumar 等^[25]针对流域水质污染问题,建立了模糊数学优化模型,并从经济与技术两方面给出了可行性建议。随着决策支持系统的不断深入发展,水量水质联合调控也逐渐受到学者们的广泛关注。Loftis 等^[26]

采用水量、水质双重目标下水资源模拟模型与优化模型相结合的方式,确定了研究区湖泊水资源调控管理方法。Pingry 等^[27]在研究科罗拉多流域上游河流水量配置问题上,将污染物处理水平作为变量,建立了水质水量联合调度决策支持系统来研究水资源配置和水污染处理的均衡解。Willey 等^[28]在全面分析水质模型(HEC5Q)发展历程和解析其数学模型的基础上,将水质控制目标加入到模型目标函数中,研究水库下泄水对下游水质的影响。

(3) 考虑水权的水资源配置阶段。21 世纪以来,水权问题在国际上受关注度不断上升,由此而衍生出考虑水权的水资源配置研究热潮。通过在水资源配置阶段,考虑水资源产权界定、水权政策安排和相关经济机制,可以消除先前完全依靠市场或者政府来进行水资源配置的弊端,能够极大地提高水资源配置效率。从政治经济学角度,通过引入博弈论、宏观决策、水权交易等观念,将水资源配置与国家经济建设、社会发展等目标联系起来,同时能够最大限度地发挥水资源配置的公平性。近年来,考虑水权因素的水资源配置研究也取得了一定的成果。Bielsa 等^[29]在研究西班牙东北地区的一个灌溉水电系统的水资源配置问题时,考虑环境、机构及法律的水权优先,通过建立合作博弈模型与非合作博弈模型并求解,最终使得当地水资源及经济方面都取得了不错的效益。Wang 等^[30]利用合作博弈理论构建了二层次水资源配置模型,首先在现有水权分配模式基础上对博弈各方进行初始水权分配,继而通过调水的方式进行水资源的有效再分配研究。Kucukmehmetoglu 等^[31]在研究幼发拉底河和底格里斯河水资源如何在沿岸土耳其、叙利亚和伊朗 3 个受水国家的城市用水和农业灌溉用水间进行合理分配时,基于初始水权理论构建了水资源配置线性规划模型,结果表明该模型所得水资源配置方案能够使得各受水方净收益最大化。Hou 等^[32]基于博弈论思想建立了基于水权分配的资源配置模型,并将水市场、政策管理和水权交易等要素加入到水资源配置具体过程中进行了研究。Zaman 等^[33]基于澳大利亚在进行灌溉用水水权交易时缺乏决策支持工具等现状,提出了一个综合考虑水权交易的经济和生物物理因素的水资源配置经济交易模型。Lumbroso 等^[34]在研究东英吉利地区上乌斯和贝德福德乌斯河流域水资源配置时,提出将取水许可证和水权交易等理论应用其中,从而提高其水资源配置与利用效率。随着计算机技术的日益成熟,一些人工智能算法(如遗传算法、神经网络等)和智能软件(如 MIKEBASIN、GIS 等)也逐渐被引入到考虑水权因素的水资源配置研究中。Minsker 等^[35]采用遗传算法对不确定性条件下研究区的多目标水资源配置问题进行了建模与求解,结果表明遗传算法能更快更优地模拟区域水资源多目标分配问题。Mckinney 等^[36]运用 GIS 系统对流域水资源配置进行了尝试,结果表明将 GIS 系统与水资源管理系统相结合能够更加真实地模拟流域水资源动态分配过程。Abolpour 等^[37]基于改进的自适应神经模糊强化学习

(ANFRL) 模型, 解决了水资源宏观配置模型中的不确定复杂性问题。Davijani 等^[38]采用粒子群算法构建了区域水资源宏观配置模型, 结果表明可通过优化水资源分配方式来取得区域工业、农业就业岗位利益最大化。

2. 国内水资源配置研究动态

国内水资源配置研究起步较晚, 最初是从 20 世纪 60 年代开始, 但基于我国水资源问题的复杂性及特点的鲜明性, 国内对水资源配置的研究发展很快, 且内容更加丰富, 在理论方法体系研究基础上, 也开展了大量的实践应用研究。

(1) 基于水库调度的水资源配置阶段。国内对水资源配置的研究起源于对水库优化调度的研究, 主要集中在 60—80 年代。其中, 吴沧浦^[39]提出的基于年调节水库的最优化运用 DP 模型, 是国内最初的水资源宏观配置的雏形。之后, 对水库的优化调度研究转移到了调度方法上, 分别经历了以常规调度方法为主的经验寻优调度和以运筹学为主的水库群优化调度两个阶段。其中, 较为典型的研究成果有: 施熙灿等^[40]开展的基于马氏决策规划的水电站水库优化调度研究; 董子敖等^[41]开展的基于改变约束法的水电站水库优化调度研究; 叶秉如等^[42]提出的基于空间分解算法的红水河水库群优化调度研究; 胡振鹏等^[43]提出的基于“分解—集结”模型的水库长期运行优化方案研究。我国水资源配置研究的初始阶段, 以满足国民经济需水量为重心。大量水利工程建设存在着对水资源的掠夺式开发利用, 因此也导致了一系列次生地质灾害的发生。至此, 我国水资源配置研究开始迈向第二阶段。

(2) 基于宏观经济的水资源配置阶段。20 世纪 90 年代以后, 国内学者开始研究如何应用系统工程方法来解决区域水资源分配及提高水资源利用效率等问题。其中, 国家“八五”攻关期间, 由黄河水利委员会勘测规划设计研究院和西安理工大学共同完成的“黄河流域水资源合理分配和优化调度研究”专题从开发决策支持系统的角度, 建立了黄河干流多库水量联合调度模型, 这一重大研究取得了当时我国水资源合理配置领域的重大突破。同一时间段 (1991—1993 年), 由中国水利水电科学研究院陈志恺、王浩等承担的联合国开发计划署技术援助项目“华北水资源管理 (UNDP CPR/88/068)”首次站在我国华北宏观经济的角度, 开发出京、津、唐地区宏观经济水资源规划决策支持系统。之后, 许新宜等^[44]在总结“八五”攻关等研究成果的基础上出版了《华北地区宏观经济水资源规划理论与方法》, 该成果系统阐述了基于宏观经济的水资源宏观配置理论体系。谢新民等^[45]结合模糊数学规划理论与响应矩阵法, 建立了济南市地下水资源系统多目标模糊管理模型, 并对其求解方法进行了研究。翁文斌等^[46]统筹考虑区域水资源综合规划和区域宏观经济规划, 系统建立了集合预测、模拟、优化和决策分析为一体的区域水资源规划多目标集成系统。在此研究基础上, 王忠静等^[47]结合实际水资源研究项目, 提出了一种基于多目标优化与方

案动态模拟的决策支持系统。这一研究阶段,我国在水资源配置领域的实践经验也层出不穷。尹明万等^[48]针对大连市大沙河流域水资源实情,构建出国内首个面向小流域规划的水资源配置优化与模拟耦合模型。黄强等^[49]为优化西安市供水水源布局,研究构建了面向西安市的多水源联合供给多目标优化模型。我国水资源配置的这一阶段,过分强调经济的驱动作用,忽略了社会经济发展对生态环境的破坏影响,因此导致了水污染、水短缺等一系列水生态危机。至此,我国水资源配置开始迈向可持续发展研究的阶段。

(3) 基于可持续发展的水资源配置阶段。这一阶段主要集中在 20 世纪末、21 世纪初,在上一阶段相关经验教训的基础上,该阶段更为看重人口、资源、生态环境之间的协调可持续发展。其中,以“九五”攻关项目为契机,中国水利水电科学研究院首次提出将水资源系统与社会经济系统、生态环境系统相联系,构建面向生态的水资源合理配置模型。之后在“十五”攻关时期,中国水利水电科学研究院又首次提出以“模拟—配置—评价—调度”为基本环节的流域水资源调配层次化结构体系,为流域水资源合理调配研究提供了重要的框架。这期间,王浩^[50]及其团队创造性地提出了“自然—人工”二元水循环理论,在传统海陆水循环基础上,加入人工水循环理论进行重大改进,同时首次提出基于流域水资源可持续利用的“三次平衡”的配置思想,为我国水资源理论研究奠定了重要基础。谢新民等^[51]基于“三先三后”配水原则,首次提出基于统筹考虑河道内、外生态用水的动态配置模型。之后,谢新民等^[52]又研究提出基于地下水数值模拟与“四水”转化的二元转化耦合模型。贺北方等^[53]综合考虑区域发展的社会、经济与生态环境三大类目标,构建了面向可持续发展理论的区域水资源宏观配置模型。左其亭等^[54]系统地提出了包括水量—水质—生态耦合系统模型、社会经济系统模型以及可持续发展量化的研究方法。赵丹等^[55]采用系统分析方法,构建了面向生态的灌区水资源宏观配置序列模型以及模拟计算方法,结果表明面向生态的多目标多情景模拟能够最大限度地利用当地水资源。我国水资源配置的这一阶段,已经逐渐形成了水资源系统与社会系统、经济系统、生态环境系统三者的统一协调,但是该时段的配置对象仅仅停留在地表引水、浅层地下水等较方便控制的水源上,尚缺乏对天然生态系统用水量的考虑。至此,我国水资源配置开始迈向第四阶段。

(4) 水资源全要素配置阶段。水资源全要素配置研究起步于“十一五”前后,全要素配置的内涵主要指在进行水资源开发利用过程中,要统筹考虑水量、水质、水位、水面、流量、流速等水资源多种要素。基于“自然—人工”二元水循环理论,赵勇^[56]、裴源生等^[57-58]拓展了水资源的定义,将土壤水、降水等纳入到广义水资源意义中,通过构建水质水量联合调控模型实现流域社会、经济与生态环境的协调发展。同时期,魏传江等^[59-60]根据“自然—人工”二元水

循环、区域需水特点、径流过程等，简述了水资源配置系统分析的主要思路，提出了较为完备的水资源全要素宏观配置理论体系与框架。赵建世等^[61]首次将复杂适应系统理论引入水资源系统，并阐述了其方法与技术。同年，蒋云钟等^[62]以可消耗蒸腾蒸发量（ET）为重要指标，构建了水资源合理配置模型并进行了实例研究。刘贯群等^[63]运用 GAMS 软件系统，模拟并预报了现状灌溉条件与优化种植结构后的灌区地下水水位。随着科学技术的不断发展，水利科技、水利信息化也逐渐吸引了国内众多学者的眼球。王忠静等^[64]首次在水资源领域提出水联网与智慧水利的概念，进一步加快了我国水资源配置迈向高效、科学利用的步伐。陈红光等^[65]针对三江平原地下水超采问题，建立了包含地表水、地下水在内的多水源联合调控模型，用以解决三江平原灌区内农业用水量紧张的难题。吴丹等^[66]利用耦合后的生产曲线模型与自回归聚合滑动平均模型对城市未来需水量进行预测，并在此基础上考虑社会、经济与生态环境效益，建立了城市水资源非线性多目标宏观配置模型。水资源全要素配置研究在一定程度上均衡了水资源系统与社会经济系统、生态环境系统之间的利益关系，对促进水资源和谐可持续利用起到了关键作用。

1.2.2 水资源调度理论与技术研究进展

水资源调度是将宏观的水资源规划、管理决策落实到具体实践当中，借助于水利工程的调控功能而对水资源进行落实到户的运行过程。通常意义下，常用水量调度、水库调度、水利调度等概念来代替水资源调度的含义，然而水资源调度是在广义范围内包含上述几种概念的，其实质是围绕水量及水利工程（主要指水库）两个要素展开的研究。水资源调度分类方法多样，按调度方法，可分为常规调度和优化调度；按调度时间段，可分为年、月、旬、周、日的调度；按调度目标，可分为单一目标调度与多目标综合调度；按调度模式或内容，可分为防洪调度、排涝调度、供水调度、灌溉调度、发电调度、生态调度等。对水资源调度的研究，主要集中在理论技术与模型方法两大方面，其中水资源调度理论技术与水资源配置大同小异，在此不重复介绍。近年来，随着计算机技术的不断进步与数学规划理论的不完善，国内外关于水资源调度的优化技术与方法也日益丰富，至此形成的水资源调度方法主要有两类：常规方法与优化方法。其中，优化方法又可分为数学规划、模拟模型与算法两大类。

1. 常规方法

水资源调度的常规方法是基于水资源调度基本原则，借助于径流调节方法、水库调度图等经验性成果而对水资源采取的调控方式^[67]。其中，水库调度图的绘制对于指导常规水资源调度起到了决定性的作用，是目前采用最为广泛的水资源常规调度方式。黄强等^[68]在求解水库调度模型时，引入确定性优化技术对

水库调度规则进行了优化,从而获得了水库的线性与非线性调度规则。解建仓等^[69]探索出了一种基于并行神经网络、对知识规则能够自动更新的方法用于水电站水库常规调度规则中。田峰巍等^[70]在黄河干流水库调度研究中,对水库调度规则在实施中的误差修正、风险决策等几个关键问题展开了研究。水资源调度常规方法操作简单且有经验可循,但其未能考虑水资源特性,且不能进行预报,因此调度结果未必能达到效益最大化。对此,国内外很多学者也对此展开了研究。例如,Chen^[71]在制定研究区单一水库调度图时,引入遗传算法对其进行改进;Chang等^[72]引入基于实数型编码的基因算法,对基于规则控制洪水的水库调度图进行优化改进;Llich^[73]引入人工神经网络算法优化了印尼某水库的调度线。

2. 优化方法

(1) 数学规划。水资源调度研究中的数学规划法主要包括线性规划、非线性规划、动态规划与多目标优化技术等。线性规划由法国数学家傅里叶于1939年首次提出,但在当时并未引起注意。之后于1947年,由美国数学家Dantzig提出线性规划的概念及其通用解法,线性规划正式进入国内外学者们的视野。之后,Hall等^[74]通过耦合线性规划与动态规划模型,对水库调度问题进行优化研究。非线性规划由于计算过程较为复杂,通常将其转化为线性问题来进行求解。Windsor^[75]利用线性规划理论,将水库调度模型中的非线性关系进行线性化预先处理,并应用单纯形法对模型进行了求解。同时,线性规划也得到了国内很多专家学者的推崇。王厥谋^[76]在考虑河道洪水变性及区间补偿前提下,对丹江口水库调度问题进行了线性规划建模。王栋等^[77]在求解淮河流域混联水库群优化调度模型时,采用线性规划思想使得模型达到了防洪安全保证率最大化。与此同时,动态规划法由于其多阶段求解策略的优越性被广泛应用于水资源调度研究中。董增川等^[78]引入多次动态线性规划理论,研究红水河梯级水电站库群优化调度问题。陈守煜^[79]提出了多阶段多目标决策系统模糊优化理论,并将其应用在复杂水资源调度系统的方案优选中。李文家等^[80]在研究防御水库下游洪水问题时,采用动态规划模型对多水库进行联合调控。Ahmed^[81]在研究多水库系统调度过程中,采用随机动态规划方法对降维模型进行了求解,结果表明动态规划有利于寻求降维模型中影响水库调度效益的主成分因素。史振铜^[82]针对南水北调东线工程中单座年调节水库与补水泵站,提出了水资源优化调度的非线性数学模型,并采用动态规划逐次逼近法对该模型进行了求解。多目标优化技术起源于20世纪70年代中期,以其能够很好地解决多目标间的竞争性与矛盾性而受到国内外学者的广泛关注。Mohan等^[83]针对印度水库群调度存在多目标利益冲突的问题,建立了一个线性多目标模型来求解。吴保生等^[84]为解决河道水流的滞后影响,提出了多阶段逐次优化算法来求解并联防洪系统优化调度模型。彭晶^[85]将多目标动态水资源宏观配置模型与GIS系统进行耦合,形成了基于GIS的水资源宏观配置系统。

(2) 模拟模型与算法。水资源调度研究中的模拟模型与算法主要包括大系统协调分解、模拟模型法与现代启发式智能算法等。大系统协调分解是将复杂的水资源大系统先按照一定规律分解成若干个相对独立子系统, 继而对独立子系统再根据一定方法耦合在一起进行递阶控制的方法, 已经在现代水资源优化调度中得到了广泛应用。张勇传^[86]在研究并联水电站水库的优化调度问题时, 引入大系统协调分解的思想, 对单库最优放水策略进行研究。钟清辉等^[87]将大系统分解协调原理引入到库群优化补偿调节模型中进行数学推导, 提出了一种系统描述跨流域梯级水库群优化补偿调节的数学模型。万俊等^[88]在研究梯级水电站群优化补偿调节模型时, 引入大系统分解协调理论, 开发出了一套梯级水库群优化补偿调节软件。黄志中等^[89]基于大系统分解-协调理论, 研究出一种串联和并联水库群实时防洪调度算法。郝永怀等^[90]在“以水定电”模式下, 结合大系统协调分解原理, 建立了梯级水电站群短期优化调度系统分解协调模型。王莹^[91]在求解三峡、清江梯级水电站联合优化调度问题时, 引入大系统分解协调法, 并通过与其他算法的比较, 得出大系统协调分解法在解决复杂水资源系统优化调度问题时更具优越性的结论。赵璧奎^[92]在研究深圳市原水系统水量水质联合调度问题时, 利用供需平衡动态模拟技术建立了原水系统优化调度模型, 并引入大系统分解协调原理对模型进行了求解。模拟模型法是结合数学关系式来系统表征决策变量和参数之间相互关系的方法, 以其能够很好地融入决策者的经验而受到关注。李会安等^[93]在研究黄河干流上游梯级水量调度时, 采用自优化模拟技术建立了调度自优化模拟模型。随着计算机技术的不断进步, 现代启发式智能算法也逐渐兴起, 且以其能够更好地模拟人类的智能活动, 通过自适应学习达到水资源调度模型全局最优解的优势而逐渐替代了常规优化算法。目前, 在水资源优化调度研究中, 采用的较为广泛的现代启发式智能算法有神经网络 (Artificial Neural Network, ANN)、遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)、模拟退火算法 (Simulation Annealing, SA) 等。Huang 等^[94]耦合了随机动态规划与遗传算法, 并将其应用于求解并联水库群的优化调度问题。陈守煜^[95]在耦合 Kohonen 聚类网络与自适应谐振理论的基础上, 对模糊聚类神经网络进行改进, 并在区域水资源评价应用中取得了良好的效果。方国华等^[96]提出了扰动遗传算法, 弥补了动态规划法及二进制遗传算法在水库优化调度模型求解中的不足。郭卫^[97]、成鹏飞等^[98]分别对人工鱼群算法、人工蜂群算法进行了优化改进, 并将改进后的成果应用于梯级水库优化调度实例中进行研究。赵恩龙^[99]在求解灌区水资源优化调度问题中, 引入遗传算法对多目标决策模型进行了求解。钟平安等^[100]在研究水电站发电优化调度问题时, 对差分进化算法进行改进, 引入了基于均匀设计的初始种群生成方式, 并对三峡水电站发电调度问题进行了实例研究。黄显峰等^[101]在研究水