

Water Resources



季 冰 林上炎 著

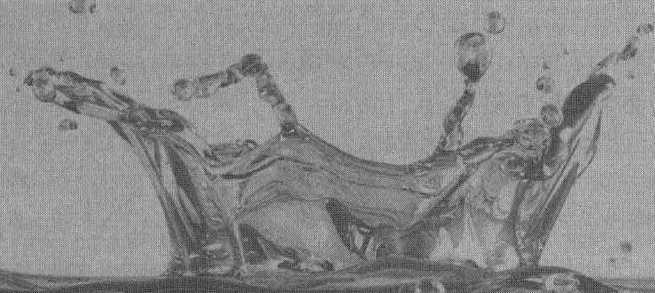
南方滨海区 **水资源** 优化配置研究



暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

季 冰 林上炎 著

南方滨海区
水资源 优化配置研究



暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

中国·广州

图书在版编目 (CIP) 数据

南方滨海区水资源优化配置研究 / 季冰, 林上炎著. —广州: 暨南大学出版社, 2015. 3

ISBN 978 - 7 - 5668 - 1256 - 8

I. ①南… II. ①季…②林… III. ①海滨—水资源管理—资源配置—优化配置—研究—东莞市 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 252066 号

出版发行: 暨南大学出版社

地 址: 中国广州暨南大学

电 话: 总编室 (8620) 85221601

营销部 (8620) 85225284 85228291 85228292 (邮购)

传 真: (8620) 85221583 (办公室) 85223774 (营销部)

邮 编: 510630

网 址: <http://www.jnupress.com> <http://press.jnu.edu.cn>

排 版: 广州良弓广告有限公司

印 刷: 佛山市浩文彩色印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 7.25

字 数: 135 千

版 次: 2015 年 3 月第 1 版

印 次: 2015 年 3 月第 1 次

定 价: 23.00 元

(暨大版图书如有印装质量问题, 请与出版社总编室联系调换)

前 言

水资源是保障人类经济社会发展不可或缺、不可替代的基础性的自然资源 and 战略性的经济资源。随着经济社会的不断发展,淡水资源的需求量大幅度增加,同时产生用水浪费严重以及水环境污染等问题,使淡水资源的供需矛盾日益突出。水资源短缺制约着社会经济的发展,破坏了生态系统的稳定,甚至引起地区间的冲突。解决水资源短缺必不可少的途径,就是遵循合理、公平和可持续发展原则,优化配置有限的水资源。水资源优化配置是指在一个特定流域或区域内工程与非工程措施并举,对有限的不同形式的水资源进行科学合理的分配,其目的是实现水资源的可持续利用,保证社会经济、资源、生态环境的协调发展,使有限的水资源得到合理充分的利用,为区域生产、生活、生态等提供可靠的水源,以获得最好的综合效益,包括经济效益、生态环境效益和社会效益等多种目标。

目前我国水资源优化配置研究的理论与实践主要集中在北方水资源极度匮乏、缺水普遍且严重的流域或区域,要解决的是河流断流、沙漠化等极度的水资源危机问题,其经典结论和思维模式带有浓厚的区域特征。而我国南方滨海地区降雨丰沛,极易出现洪涝灾害,因此对于水资源充沛的南方地区来说,其防洪方面的研究较多,水资源优化配置的研究成果则相对较少。但是在水量充沛的地区,往往存在因水资源的不合理利用而造成的水环境污染破坏和水资源严重浪费的现象,因此必须予以高度重视。随着社会经济的发展和对水资源开发利用范围与深度的不断强化,很有必要构建具有南方滨海区特色水资源配置的理论与方法,着力研究和解决新时期南方城市水资源的开发、利用、配置、节约、保护与治理等问题。

水资源优化配置是一个经济效益、生态环境效益和社会效益等多目标优化问题。由于水资源优化配置的多目标性,运用传统的规划方法难以解决好这类问题,而智能算法中的遗传算法(GA)具有处理目标函数的间断性及多峰型性等复杂问题的能力,这增强了遗传算法在多目标搜索和优化问题方面潜在的有效性。遗传算法作用于整个种群,同时又强调个体的整合,因此遗

传算法是解决多目标优化的有效方法。

本书以南方滨海区典型区域——东江流域下游东莞市为研究区域,探究南方滨海区水资源优化配置的思路与对策、建立适用于该区域的水资源优化配置模型,探求区域水资源系统多目标优化配置模型求解方法,并通过建立该区域多水源、多用户、多目标水资源优化配置模型,以实现优化配置区域的水资源。针对区域水资源优化配置模型大系统多目标优化的问题,本书将多目标遗传算法引入到水资源优化配置中,通过对算法编码、遗传算子、惩罚函数等的改进,使算法适应复杂的水资源优化配置系统。研究成果主要包括:强化节水,构建多水源联合调度系统的南方滨海区水资源优化配置思路与对策;在区域水资源系统分析的基础上建立了适用于南方滨海区的多水源性、多用户性、多目标性、多层次性、多时段性特征的多目标、多约束的水资源优化配置模型;提出基于权重系数的多目标遗传算法,为区域水资源优化配置提供了一种新方法。

本书研究以东莞市规划水平年 2020 年的不同来水保证率($P=50\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=95\%$)的供需水情况为依据,拟定模型参数,运行已编制的微机程序,求得东莞市水资源优化配置成果,并对成果进行了缺水量分析、目标分析、适用性分析。有关综合分析表明:其模型与方法是有效的、可行的,成果是合理的。优化配置模型与研究成果,可为东莞市水资源开发、利用、保护与管理提供决策依据,而且对促进南方滨海地区的水资源优化配置也具有一定的指导意义。

本书研究过程中得到了东莞市水务局、中水珠江规划勘测设计有限公司(原水利部珠江水利委员会勘测设计研究院)、中山大学等单位领导和专家的大力支持和帮助,同时得到范锦春教授、陶谨博士以及江涛博士等专家的指导,笔者在此一并表示衷心的感谢。

受时间和水平所限,笔者对水资源优化配置和遗传算法的认知有待深入,书中不当之处,敬请读者赐教指正。

编 者

2014 年 12 月

目 录

前 言	/ 1
-----	-----

第一章 绪 论	/ 1
---------	-----

- 一、问题的提出 / 1
- 二、国内外水资源配置研究进展 / 4
- 三、水资源优化配置研究的特点及展望 / 16
- 四、主要研究内容和技术路线 / 19
- 五、主要创新点 / 21

第二章 南方滨海区水资源优化配置思路与对策	/ 22
-----------------------	------

- 一、水资源优化配置的理论 / 23
- 二、东江流域滨海区概况 / 28
- 三、东莞市水资源优化配置思路与对策 / 34
- 四、东莞市水资源优化配置特点分析 / 40

第三章 水资源优化配置模型研究	/ 42
-----------------	------

- 一、水资源系统分析 / 42
- 二、南方滨海区水资源优化配置模型研究 / 49

第四章 模型的解法研究——遗传算法	/ 58
-------------------	------

- 一、多目标优化基本概念及方法 / 58
- 二、遗传算法及其改进研究 / 61
- 三、多目标遗传算法 / 84
- 四、多目标遗传算法求解水资源优化配置模型 / 88

第五章 东莞市水资源优化配置 / 90

一、水资源系统概化 / 90

二、规划水平年需水量及供水规模 / 94

三、东莞市水资源优化配置 / 98

第六章 总结与展望 / 110

一、主要研究成果 / 110

二、展 望 / 111

第一章 绪 论

一、问题的提出

（一）水资源的定义和内涵

“水资源”一词由来已久，随着时代的进步其内涵也在不断地丰富和发展，但由于人们对水资源的认识程度和角度的不同，水资源的确切定义至今未有统一论。

1894年，美国地质调查局采用“水资源”这一概念，并设立了水资源处，开展对江河径流和地下水的观测。此后随着时代的发展，水资源的研究范围得以不断拓展，水资源的概念及内涵也在不断地丰富。

英国《不列颠简明百科全书》对水资源的定义是“地球上各种形态（气态、液态或固态）的自然水”，这一定义中的“水资源”具有十分广泛的含义，其本质特性体现在“可利用性”上。1963年，英国通过了《水资源法》，该法对水资源的定义是“具有足够数量的可用水”，这一定义强调了水资源在数量上的可利用性，比《不列颠简明百科全书》的定义更为明确。

联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）对水资源的定义为：“作为资源的水应当是可供利用或有可能被利用，具有足够数量和可用质量，并可适合对某地为对水的需求而能长期供应的水源。”这一定义比英国《水资源法》中水资源的定义具有更为明确的含义，不仅考虑水的数量，同时强调水资源必须具备质量的可利用性。

国内对水资源的定义也有不同的表述。1988年，《中华人民共和国水法》中水资源被定义为“地表水和地下水”；1992年出版的《中国大百科全书》的水利卷中，水资源被认为是“自然界各种形态（气态、固态或液态）的天然水，并将可供人类利用的水资源作为供评价的水资源”。2002年《中华人民共和国水法》对水资源的表述是“本法所称水资源，是指地表水和地下水”。

导致对水资源的定义和内涵产生不一致的认识和理解的主要原因在于：水资源的定义既简单又复杂。而其复杂的内涵通常表现在：水的类型繁多，

具有运动性,各种水体具有相互转化的特性;水的用途广泛,各种用途对其量和质均有不同的要求;水资源所包含的“量”和“质”在一定条件下可以改变;更为重要的是,水资源的开发利用受经济技术、社会和环境条件的制约。因此,人们从不同角度认识水资源,造成对水资源一词理解的不一致及认识的差异性。目前,关于水资源普遍认可的概念可以理解为:水资源是人类在长期生存、生活和生产活动中所需要的具有数量要求和质量前提的水量,包括使用价值和经济价值。一般认为水资源概念具有广义和狭义之分。广义的水资源是指自然界一切形态的可为人类所利用的天然水;狭义的水资源是指在一定经济技术条件和生态环境约束下,可供人类直接或间接利用和维持生态系统健康的水。

综上所述,可以得出对水资源内涵的几点认识:

- (1) 作为资源的水应具有数量和质量的一致性;
- (2) 作为资源的水应具有满足某区域经济社会发展和生态环境对其需求的一定保证程度;
- (3) 作为资源的水具有不可替代性;
- (4) 作为资源的水仅仅包含可以被人们利用的自然界的部分水体;
- (5) 水资源很容易被污染,水环境具有脆弱性。

(二) 水资源优化配置问题的提出

水是生命之源,是人类赖以生存和发展的重要资源,孕育和维持着地球上的生命;水也是保障人类经济社会发展不可或缺、不可替代的基础性的自然资源和战略性的经济资源。正如《二十一世纪议程》中指出:“水不仅为维持地球和一切生命所必须,而且对一切社会经济部门都具有生死攸关的重要意义。”^①而如今,水资源问题已成为全世界面临的重大问题。

20世纪50年代以来,随着人口的急剧增长和经济的飞速发展,水资源的需求量大幅度增加。与此同时,用水严重浪费、水资源开发利用不合理以及水环境污染等问题,使世界有限的淡水资源的供需矛盾更为突出,淡水资源受到的压力也越来越大。据联合国公布的数据,全球用水量在20世纪增加了6倍,其增长速度是人口增速的2倍。联合国教科文组织认为,目前地球上淡水资源总体充足,但分布不均,约65%的淡水资源集中在不到10个国家和地区,而约占世界人口总数40%的80个国家和地区严重缺水,全球约有1/5的人无法获得安全的饮用水。《国际人口行动》中采用水紧缺指标(Water - Stress Index,人均水资源低于1700立方米为用水紧张国家),对全球用水紧

^① 郑通汉. 中国水危机 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

张或缺水国家及人口数做了统计和预测：1990 年为 28 个国家，3.35 亿人口；2025 年 46~52 个国家，27.8 亿~32.9 亿^①。水资源缺乏的同时地球的水环境也在恶化。世界水资源委员会发表的报告指出，全世界有一半以上的大河已被污染，目前世界上只有两条大河（亚马逊河和刚果河）可以被归入健康河流之列。不仅地表水，地下水也受到十分严重的污染，而地下水的污染通常是不可逆转的。

在 2006 年世界水日上，联合国教科文组织公布《世界水资源开发报告》。该报告对全球水资源问题敲响了警钟，并指出问题主要包括：水资源管理、制度建设、基础设施建设不足；大部分地区水质下降，水质差导致生活贫困；90% 的灾害与水有关；农业、城市用水供需紧张；水资源浪费严重。

水资源的一系列问题以及由此引起的地区间的水资源争夺和国家冲突、自然生态系统受到破坏、人类生存环境恶化等危机，已经引起全球的广泛关注。在 1988 年，世界环境与发展委员会（WCED）的一份报告就指出：“水资源正在取代石油而成为全世界引起危机的主要问题。”^② 1998 年，联合国教科文组织召开“水与可持续发展”国际会议，围绕全球水资源问题，提出了应对计划和策略；2000 年的第二届水论坛部长级会议推进了水资源使用的和平合作，并承诺在 2015 年前使无法得到洁净水的人口减少一半。可见，国际社会高度关注全球水资源问题并采取了行动和措施，致力于解决人类面临的水资源问题和促进水资源可持续发展。

我国作为世界上人口最多的发展中国家，水资源问题尤为突出。我国降水时空变化大，水资源分布与区域发展极不匹配^③，而且水资源的开发、利用、管理和保护领域存在着许多误区，造成了水资源更加短缺、生态环境日益恶化，水资源问题成为我国社会经济可持续发展的重要制约因素。我国水资源问题的特征总体上可以概括为：时空分布差异大、水资源总量丰富但人均占有量少、水质恶化和水污染问题、水资源浪费严重，具体表现为：

1. 水资源紧缺

我国的水资源短缺问题在 20 世纪 80 年代尚不明显，但进入 20 世纪 90 年代后迅速加剧。据《中国水资源公报》统计数据分析，我国城市用水从 1993 年的 1 143 亿立方米增加到 2002 年的 1 785.3 亿立方米，10 年期间用水总量

① 王腊春等. 中国水问题 [M]. 南京：东南大学出版社，2007.

② WCED. Sustainable development and water: Statement on the WCED report “Our Common Future” [J]. *Water International*, 1989, 14 (3): 151–152.

③ 王顺久，张欣莉，倪长键等. 水资源优化配置原理及方法 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2007.

增长了 56.1%，而农业用水也是大幅度增加。快速增长的用水需求加剧了紧张的水资源供求关系，水资源短缺问题越来越严重。据统计，“十五”期间，我国每年缺水量约 400 亿立方米，全国 661 座城市中有 400 座缺水，其中 110 座严重缺水，干旱造成的年均粮食减产达 350 亿千克。我国人均水资源量有逐渐减少的趋势，1997 年我国人均水资源量为 2 220 立方米，预测到 2050 年，人均水资源量将下降到 1 760 立方米，接近用水紧张国家人均水资源量少于 1 700 立方米的限值。

2. 水环境污染严重

水污染问题发展之快和影响之深比水资源紧缺问题更令人担忧和震惊。据统计，2005 年，我国向江河排放污水达 717 亿吨，水质为Ⅵ类和劣于Ⅵ类的江河为 5.67 万千米，占总评价河长的 39.1%，其中Ⅴ类和劣Ⅴ类水质河长占总评价河长的 20.3%，全国 2/3 的湖泊和 1/3 的水库呈富营养化状态。全国约 90% 的城市河段的水不适宜作为饮用水源，50% 以上城市地下水受污染。日趋严重的水污染不仅降低了水体的使用功能，而且进一步加剧了水资源紧缺的矛盾，形成了很多水质型缺水城市。

3. 水资源浪费巨大

水资源用水效益低、水资源浪费严重是我国水资源开发利用中的主要特征。我国农业灌溉多以粗放式灌溉为主，灌溉效率普遍低于 50%，农田灌溉水量超过作物需水量的 1/3 甚至一倍以上。我国大部分企业生产工艺较为落后，单位产品耗水量居高不下，高于先进国家的几倍、几十倍不等，工厂的水重复利用率仅在 60% 甚至更低，远未达到先进国家的 90%。由于节水观念淡薄，水价偏低，输水管道老化导致水资源损失量大，城镇生活用水浪费问题也相当突出^①。

针对我国的水资源问题，我国提出了新时期的水资源战略理念，要从传统水利过渡到现代水利、可持续发展水利，以水资源的可持续发展利用支持经济社会的可持续发展。而水资源优化配置则是解决我国水资源供水与需求、开源与节流、用水与防污等水资源问题，最终实现水资源可持续利用的重要手段和方法。因此，如何优化配置水资源，充分地利用有限的水资源，使其在促进生态环境与社会经济和谐发展中发挥最大效益，是一项迫切的任务和意义重大的工作。

二、国内外水资源配置研究进展

人口的急剧增长、社会经济的不断发展以及水污染问题的日益凸显使水

^① 李广贺等，水资源利用与保护 [M]，北京：中国建筑工业出版社，2002。

资源的开发利用比以往更受人类社会关注,水资源的优化配置也受到越来越多人的重视。

水资源配置是实现水资源在不同区域和用水户之间的有效公平分配,从而达到水资源可持续利用的重要手段。通过水资源配置可以实现对流域水循环及受其影响的自然与社会诸因素进行整体调控。水资源配置最初主要是针对水资源短缺地区的用水竞争性问题而提出,以后随着可持续发展观念的深入,其含义不仅仅针对水资源短缺地区,对于水资源丰富的地区也应该考虑水资源优化配置问题^①。从最初的水量分配到目前协调考虑流域和区域经济、环境和生态各方面需求进行有效的水量调控,水资源配置研究日益受到重视。目前,水资源开发利用和人类活动结合日趋紧密,影响因素逐渐增多,导致其结构更趋复杂,这就要求在水资源天然循环和供用耗排人工侧支循环的统一框架下完成水资源配置。对于水资源优化配置的含义,不同阶段有不同学者提出自己的解释。综合逐渐深入的认识,一般认为水资源配置是指在流域或特定的区域范围内,遵循有效性、公平性和可持续性的原则,利用各种工程与非工程措施,按照市场经济的规律和资源配置准则,通过合理抑制需求、保障有效供给、维护和改善生态环境质量等手段和措施,对多种可利用水资源在区域间和各用水部门间进行的调配^②。因此可以看出当前的水资源配置问题,不是简单的用户间水量分配,而是从流域和区域整体出发,在分析区域水资源条件和水资源供需特点,综合统筹不同情况和需求,确定各类可利用的水资源在供水设施、运行管理等各类约束条件下对不同区域各类用水户的有效合理分配。水资源配置中必须考虑水量的需求与供给、水环境的污染与治理、水与生态这三重平衡关系。

(一) 国外水资源配置研究进展

国外在水资源配置方面的研究起步较早。美国是最早将系统分析方法应用于水资源规划和管理中的国家,研究成果非常丰富。在内容上,从水库优化调度,到流域水资源综合规划及管理,旱涝灾害应对与防治、区域水资源开发利用设计、流域水环境管理等;在分析方法上,从简单水资源系统到复杂大规模水系统,从单目标、确定型问题到多目标、随机型和风险型问题;在技术手段上,从单纯借助于数学模型到计算机数字化管理、信息控制理论、人工智能技术与数学模型的结合运用,这些都为世界上其他国家的水资源开发利用提供了典范。

① 王浩.我国水资源合理配置的现状和未来[J].水利水电技术,2006,37(2):7~14.

② 水利部水利水电规划设计总院.全国水资源综合规划技术大纲[R].北京:水利部水利水电规划设计总院,2002.

国外水资源规划配置模型的研究过程大致分为以下四个阶段:

1. 模型理论探索阶段 (20 世纪 40—60 年代)

国外水资源优化配置的研究最早要追溯到 20 世纪 40 年代 Masse 提出的水库优化调度问题^①。到了 20 世纪 50—60 年代,一些学者针对水资源问题进行了一些研究^{②③④⑤}。1960 年,美国科罗拉多州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^⑥,体现了水资源优化配置的思想。

但这些研究基本停留在设想阶段,实际应用研究从 20 世纪 60 年代之后才开始。1961 年,Moore 提出了在一定时间内最优水量分配问题^⑦。1963 年,Buras 针对包含一个地表水库、地下水库和两个独立灌区的假定系统,建立了动态规划模型,以确定地下水库、人工回灌工程的规模,各灌区的灌溉面积以及地表水库、地下水库的供水策略^⑧。1965 年,UNESCO 成立了国际水文十年(IHD)机构,对水量平衡、洪涝灾旱、地下水、人类活动对水循环的影响,特别是农业灌溉和都市化对水资源的影响等方面进行了大量的研究,并取得了成绩^⑨。1967 年,Flinn 等论证了动态规划方法应用于灌溉季节最优水量分配的可行性,并建立了相应的确定性动态规划模型,该模型含有一个描述系统任意阶段的状态变量,即在灌溉季节内的可分配水量^⑩。1968 年,Hall 和 Butcher 提出了一个包含二维状态变量的确定性动态规划模型,把可分配的水量和土壤含水水平作为状态变量,确定系统任意阶段的初始状态,模型采用相乘模型,结果表明相乘模型较相加模型计算更为方便^⑪。

① 龙祥瑜,谢新民,孙仕军等.我国水资源配置模型研究现状与展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2004,2(2):131~140.

② 柳长顺,陈献等.国外流域水资源配置模型研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(5):522~524.

③ 李雪萍.国内外水资源配置研究概述[J].海河水利,2002(5):13~15.

④ 彭祥,胡和平.水资源配置博弈论[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

⑤ 柳长顺,刘昌明,杨红.流域水资源合理配置与管理研究[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

⑥ N. Buras. *Scientific Allocation of Water Resources* [M]. New York: American Elsevier Publication Co., 1972.

⑦ N. J. Dudley, D. T. Howell, W. F. Musgrave. Optimal intraseasonal irrigation water allocation [J]. *Water Resources Research*, 1971, 7(4): 770~788.

⑧ 吴玉柏.国外地表水和地下水联合运用优化方法的研究[J].灌溉排水,1987,6(2):41~45.

⑨ 叶锦昭,卢如秀.世界水资源概论[M].北京:科学出版社,1993.

⑩ J. C. Flinn, W. F. Musgrave. Development and analysis of input-output relations for irrigation water [J]. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 1967, 11(1): 1~19.

⑪ W. A. Hall, W. S. Butcher. Optimal timing of irrigation [J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1968, 94(2): 267~278.

2. 模型理论发展及成熟阶段 (20 世纪 70 年代)

进入 20 世纪 70 年代, 伴随着计算机技术、数学规划和模拟技术的发展及其在水资源领域的应用, 对水资源管理系统模型及水资源优化配置的科研成果不断增多^①。Wattenbarger (1970) 通过有限差分模拟, 应用响应矩阵法建立了含水层—河流系统的管理模型, 实现了对地下水和地表水的宏观调控; 1972 年美国 N. Buras 所著的《水资源科学分配》是最早系统地研究水资源分配理论和方法的著作; Maddock 于 1972 年提出了响应函数概念, 且在 1974 年利用响应矩阵法研究开发了一个河流—含水层系统的联合配置模型, 使得地表水和地下水联合配置研究有了较大进展。

20 世纪 70 年代早期建立的模型, 主要考虑的是地下水含水层本身的特性以及与地表水的转换关系, 很少考虑社会效益、经济效益和环境效益, 规划模型的目标函数多是单目标, 在此期间出现的模型中, 有较典型的物理模型与数学模型相结合的网络模型; 70 年代后期, 出现了多目标管理模型, 较全面地考虑了水资源系统的特征和社会、经济、环境等因素的联合优化问题。例如 1975 年, Y. Y. Haimes 等对大型复杂地下水资源的管理, 就是采用大系统、多级、多目标的建模方法进行研究^②, 这使水资源配置研究领域和模拟技术均得到了进一步发展; 1979 年, 美国麻省理工学院运用多目标规划理论和水资源规划的数学模型, 完成了阿根廷 Río Colorado (科罗拉多河) 流域的水资源开发规划^③, 这是当时水资源开发利用最成功和最有影响的例子^④。

3. 模型推广应用阶段 (20 世纪 80 年代)

到了 20 世纪 80 年代, 水资源分配的研究范围不断扩大, 深度不断加深。20 世纪 80 年代初, Loucks 等在其专著《水资源系统规划与分析》中着重阐述了如何运用系统分析方法指导水资源工程规划、设计和运行管理, 并认为, 人类对时空分布恰当、数量质量合适的水资源需求的不断增长, 已促使水资源工程师和规划者们必须运用更为复杂的水资源系统规划方法解决水资源问题^⑤。1982 年, Pearson 等利用多个水库的控制线, 以产值最大为目标, 输送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的 Nawwa 区域的

① 吴泽宁, 索丽生. 水资源优化配置研究进展 [J]. 灌溉排水学报, 2004, 23 (2): 1~5.

② Y. Y. Haimes, W. A. Hall, H. T. Freedman. *Multiobjective Optimization in Water Resources Systems: The Surrogate Worth Trade-off Method* [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 3-8.

③ 武靖源. 天津市城市水资源大系统供水规划和优化调度的协调模型 [D]. 天津大学硕士学位论文, 1996.

④ 赵勇. 广义水资源合理配置研究 [D]. 中国水利水电科学研究院博士学位论文, 2006.

⑤ D. P. Loucks, J. R. Stedinger, D. A. Haith. *Water Resource Systems Planning and Analysis* [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1981.

用水分配问题进行了研究^①；同年，荷兰学者 Romijn 与 Tamminga 考虑了水的多功能性和多种效益的关系，强调决策者和科技人员间的合作，建立了 Gelderland 省与 Drenthe 省的水资源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^②；Tamminga 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，建立了水资源量分配的多层次模型，体现了水资源配置问题的多目标和层次结构的特点^③。1984 年，Krzysztofowicz 和 Sage 探讨了水资源多目标分析中的群决策问题^④。1985 年，Yeh 对系统分析方法在水库调度和管理中的研究和应用作了全面综述，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^⑤。1987 年，Willis 等使用线性规划方法求解了一个地表水库与四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 法求解了一个水库与地下水含水层的联合管理问题^⑥。

4. 模型实用性研究阶段（20 世纪 90 年代以后）

进入 20 世纪 90 年代，由于水污染和水危机的加剧，传统的以供水量和经济效益最大为水资源优化配置目标的模式已不能满足需要，国外开始在水资源优化配置中注重水质约束、水资源环境效益以及水资源可持续利用研究，尤其是决策支持技术、模拟优化的模型技术和资源价值的定量方法等的应用，使得水资源量与质管理方法的研究产生了更大的活力^{⑦⑧}。由联合国出版的《水与可持续发展准则：原理与政策方案》充分分析了水资源与经济社会发展的

① D. Pearson, P. D. Walsh. The derivation and use of control curves for the regional allocation of water resources [J]. *Optimal Allocation of Water Resources*, 1982 (7): 907-912.

② E. Romijn, M. Tamminga. Allocation of water resources in the eastern part of the Netherlands [J]. *Allocation of Water Resources (Proceedings of the Exeter Symposium)*, IAHS Publ, 1982 (135): 137-153.

③ E. Romijn, M. Tamminga. Multi-objective optimal allocation of water resources [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1982, 108 (2): 217-229.

④ W. F. L. Peter, W. G. Willian, M. Yeh, et al. Multi-objective water resources management planning [J]. *Water Resources Planning and Management*, 1984, 110 (1): 39-56.

⑤ M. Yeh, W. G. Willian. Reservoir management and operations models: A State-of-the-art review [J]. *Water Resources Research*, 1985, 21 (12): 1797-1818.

⑥ R. Willis, W. G. Willian, M. Yeh. *Groundwater System: Planning and Management* [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1987.

⑦ J. M. Antle, S. M. Capalbo. Physical and economic model integration for measurement of the environmental impacts of agricultural chemical use [J]. *Northeastern Journal of Agricultural and Resources Economics*, 1991, 20 (1): 68-82.

⑧ M. B. Bayer. A modeling method for evaluating water quality policies in non-serial river system [J]. *Water Resources Bulletin*, 1997, 33 (6): 1141-1151.

关系以及在亚太地区所取得的成功实例,确定了水资源开发在可持续发展中的基本准则和地位,明确指出:水资源与经济社会发展紧密相连,其多行业属性和多用途特性使在可持续发展过程中的水资源工程规划与实施变得极其复杂。

1992年,Afzal和Javaid等针对巴基斯坦某个地区的灌溉系统建立了线性规划模型,对不同水质的水量使用问题进行了优化。在劣质地下水和有限运河水可供使用的条件下,模型能得到一定时期内最优的作物耕种面积和地下水开采量等成果,这在一定程度上体现了水质—水量联合优化配置的思想^①;Carios和Gideon以经济效益最大为目标,建立了以色列南部Eilat地区的污水、地表水、地下水等多种水源的管理模型,模型中同时考虑了不同用水部门对水质的不同要求^②。1999年,Arun Kumar等建立了污水排放模糊优化模型,提出了流域水质管理的经济技术方面的可行方案^③;Braden和Ierland同年综合考虑了区域供水、污水处理、农田灌溉以及流域管理等因素的影响,应用多判据分析以及多目标规划等方法构建了水资源优化配置模型^④。2001年,Tewei等建立了流域整体的水量水质网络模型^⑤。

这一期间,随机概念和不确定研究也被引入到水资源优化配置研究之中。如1995年,Watkins等介绍了一种伴随风险和不确定性的可持续水资源规划模型框架,建立了有代表性的联合调度模型^⑥。此模型是一个两阶段扩展模型,第一阶段可得到投资决策变量,第二阶段可得到运行决策变量,运用分解聚合法求解最终的非线性混合整数规划模型。美国学者Norman J. Dudley将作物生成模型和具有二维状态变量的随机动态规划相结合,对季节性灌溉用水分配进行了研究^⑦。Higgins等为解决澳大利亚东南部的水资源问题,在Queensland地区建立了多目标多阶段的随机非线性模型。

① Afzal, Javaid, David H. Noble. Optimization model for alternative use of different quality irrigation waters [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1992, 118 (2): 218-228.

② Carios Perreia, Gideon Oron. Optimal operation of regional system with diverse water quality sources [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1997, 203 (5): 230-237.

③ Arun Kumar, Vijay K. Minocha. Fuzzy optimization model for water quality management of a river system [J]. *Journal of Water Model or Resources Water Quality Planning Management*, 1999, 125 (3): 179-180.

④ J. B. Braden, E. C. Ierland. Balancing: The economic approach to sustainable water management [J]. *Water Science Technology*, 1999, 39 (5): 17-23.

⑤ Tewei Dat, John W. Labadie. River basin network model for integrated water quantity/quality management [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2001, 127 (5): 295-305.

⑥ Watkins David, W. Jr McKinney, Daene C. Robust. Optimization for incorporation risk and uncertainty in sustainable water resources planning [J]. *International Association of Hydrological Sciences*, 1995, 231 (13): 225-232.

⑦ Norman J. Dudley. Optimal interseasonal irrigation water allocation [J]. *Water Resources*, 1997, 7 (4).

这一阶段的水资源配置除了考虑水质要求外,为了更好地解决水资源系统的系统性、不确定性和复杂性问题,一些新的优化算法或技术也应用到水资源配置中,如遗传算法^①、模拟退火^②、粒子群法等。

进入 21 世纪以后,国外主要从水资源产权界定组织安排和经济机理对配置效益影响的角度出发,对水资源配置机制进行了研究,重视政府的宏观调控和行政管理与市场机制、法律手段相结合,认为纯粹的市场或纯粹的政府都难以满足优化配置的要求,制度和经济是医治市场和制度失灵的良方,有效的流域水资源管理政策和体制是解决配置冲突的根本途径^③。

(二) 国内水资源配置研究进展

随着我国经济的发展与人口的增长,水资源问题不断加重,水资源优化配置受到高度重视。随着实践的深化,水资源优化配置的概念逐步明确,内涵日益丰富。“六五”、“七五”国家重点科技攻关项目以京、津、唐地区为研究对象,建立了相应的水资源优化配置模型和软件,对大系统水资源优化配置进行了有益的探索,开创了以区域为单元研究水资源优化配置的先河^④;在“八五”国家重点科技攻关项目“黄河治理与水资源开发利用”专题“华北地区宏观经济水资源规划管理的研究”中,该项目实现了宏观经济研究与水资源研究的系统结合,提出了基于宏观经济的水资源优化配置理论和多层次、多目标、群决策优化配置方法^⑤;在“九五”攻关项目“西北地区水资源合理开发利用及生态环境保护研究”中,生态用水被纳入到水资源优化配置体系中,水资源优化配置的范畴拓展到社会经济—水资源—生态环境的大系统中,配置对象同时考虑国民经济用水和生态环境用水,提出了面向生态的水资源生态经济系统优化配置方法,形成了目前国内水资源优化配置方法的最新成果,奠定了水资源优化配置理论和方法的基础^{⑥⑦}。具体来说,根据

① B. S. Minsker, B. Padera, J. B. Smalley. *Efficient Methods for Including Uncertainty and Multiple Objectives in Water Resources Management Models Using Genetic Algorithms* [C]. Alberta: International Conference on computational Methods in Water Resources, Calgary, 2000, 25 - 29.

② M. Wang, C. Zheng. Ground water management optimization using genetic algorithms and simulated annealing [J]. *Formulation and Comparison Journal of the American Water Resources Association*, 1998.

③ 袁洪州. 区域水资源优化配置的大系统分解协调模型研究 [D]. 河海大学硕士学位论文, 2005.

④ 华士乾等. 水资源系统分析指南 [M]. 水利电力出版社, 1988.

⑤ 常炳炎, 薛松贵等. 黄河流域水资源合理分配和优化调度 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.

⑥ 许新宜, 王浩, 甘泓等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.

⑦ 王浩, 王建华, 秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向 [J]. 水科学进展, 2004, 15 (1): 123 - 128.