

水文水资源系列丛书

干旱区水资源优化配置 与应急调配关键技术

GANHANQU SHUIZIZIYUAN YOUHUA PEIZHI
YU YINGJI TIAOPEI GUANJIAN JISHU

李杰友 吾买尔江 吾布力 周海鹰 徐慧 张洛晨 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

水文水资源系列丛书

干旱区水资源优化配置 与应急调配关键技术

李杰友 吾买尔江·吾布力 著
周海鹰 徐 慧 张洛晨

东南大学出版社

• 南 京 •

内 容 摘 要

本书主要针对干旱区流域水资源短缺问题,重点探索塔河流域水资源的合理配置理论及关键技术,紧密结合我国内陆干旱区水资源极端匮乏、干旱频繁发生的实际情况,从研究区的供需现状和缺水形势着手,揭示不同等级的干旱致灾效应,揭示干旱等级与流域来水频率的关联及对区域社会发展的影响。通过增加流域内的地下水开采、发展高效节水工程和渠系防渗工程、改变供给优选等级、改变工农业用水比例等多个开源节流思路,构建在极端旱情下各种工程措施下的水资源调配方案,并建立应急调配方案评价的数学模型;对在不同干旱等级情况下的多个应急方案进行优选,以实现水资源的经济、生态综合效益,为流域社会经济与生态环境保护提供了科学依据,也为流域水资源规划及水资源可持续利用提供了参考。

本书可供水文水资源学科、环境科学、资源科学、农业工程及水利工程等学科的科研人员、大学教师、研究生和本科生,以及从事水资源管理领域、水土保持工程及环境保护的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

干旱区水资源优化配置与应急调配关键技术/李杰
等著. —南京:东南大学出版社,2013. 6

水文水资源系列丛书

ISBN 978-7-5641-4185-1

I. ①干… II. ①李… III. ①干旱区-水资源-资源
配置-研究-中国 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 081353 号

干旱区水资源优化配置与应急调配关键技术

出版发行 东南大学出版社

出 版 人 江建中

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

经 销 江苏省新华书店

印 刷 兴化印刷有限责任公司

开 本 700 mm×1000 mm 1/16

印 张 16 彩插:8

字 数 311 千字

版 次 2013 年 6 月第 1 版

印 次 2013 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-4185-1

印 数 1—1 000

定 价 38.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

前 言

水资源是人类生存和经济社会发展的物质基础,是不可替代的自然资源,合理利用水资源是解决干旱区发展的必由之路。随着当今社会经济的发展,人民生活水平和健康意识的快速提高,相应的对水的数量、质量的要求标准也在不断提升,使得原本有限的可用水资源量急剧减少,与此同时,干旱的发生对原本急缺的水资源和受到威胁的生态环境产生了巨大破坏,导致供需矛盾的加剧。因此,解决极端干旱条件下的水资源短缺问题,已经成为当今需要迫切解决的问题。

塔里木河(以下简称“塔河”)被誉为南疆各族人民的“母亲河”,塔河流域所形成的天然绿洲是阻挡塔克拉玛干沙漠的风沙侵袭、保护人类生存环境的天然屏障。塔河流域水资源开发利用和生态环境保护,不仅关系流域自身的生存和发展,也关系到西部大开发战略的顺利实施,战略地位十分重要。然而,塔河流域地处内陆,三面又受雪山高原的阻挡,气候干旱,降雨稀少,属于我国资源性缺水地区。当地农业发展历史悠久,主要以地面灌溉为主,水资源开发利用程度很高。随着流域经济的发展和上游地区水资源缺乏总体规划的高强度开发,进入下游的水量逐年锐减,可供人类利用的水源日益短缺,致使下游绿洲面积严重萎缩、植被退化,沙漠化和荒漠化趋势加剧,人民生活环境面临严重威胁,严重影响了当地经济的可持续发展和人民生活水平的提高。与此同时,旱灾频次明显加快。旱情旱灾影响范围已远远超出农业,不仅威胁工农业生产,更对生态造成直接影响,波及社会安定。极端干旱事件已经并将给塔河流域社会与经济发展带来更为严重的威胁,这已经引起各级政府和全社会的高度重视。

本书选取塔河干流区、阿克苏河流域和叶尔羌河流域作为研究区域。阿克苏河和叶尔羌河是塔河流域的重要源流区,是塔河流域水资源合理开发利用和生态环境保护建设的重点保证区域,如何有效利用阿克苏河流域和叶尔羌河流域的水资源直接关系到塔河流域近期综合治理规划目标的实现;如何使研究区的水资源利用水平控制在可承受范围内,充分发挥水资源的经济、生态综合效益,成为当前亟需解决的问题。为解决不同干旱年下的塔河流域的水资源短缺问题,探索塔河流域水资源的合理配置理论及关键技术,本书紧密结合我国内陆干旱区水资源极端匮乏、干旱频繁发生的实际情况,从研究区的供需现状和缺水形势着手,揭示不同等级的干旱致灾效应,揭示干旱等级与流域来水频率的关联及对区域社会发展的影响。通过增加流域内的地下水开采、发展高效节水工程和渠系防渗工程、改变供给优选顺序、改变工农业用水比例等多个开源节流思路,构建在极端旱情下各种工程措施下的水资源调配方案,并建立应急调配方案评价的数学模型,对在不同干旱等级情况下的多个应急方案进行优选,实现水资源优化调配,发挥水资源的经

济、生态综合效能,为流域社会经济与生态环境可持续发展提供科技支撑,为当地的水资源优化配置提供科学依据。

全书共包含6个方面的内容,分为9章。第1章阐述了塔河流域水资源应急调配研究的重大意义,综述了水资源优化配置相关内容的国内外研究进展和发展趋势,水资源优化配置的原则,从理论、方法、应用三方面讨论了现有水资源配置研究中存在的问题;第2章介绍了塔河流域干旱的成因、特点及干旱等级划分方法,重点介绍了WEAP模型的原理和应急调配方案评价模型;第3、第4章重点讨论了研究区的流域概况,水资源开发利用评价,并划分了干旱等级;第5章重点对研究区的供水现状进行了分析,并计算了研究区现状生产生活的生态需水量;第6章对塔河干流区、阿克苏河流域和叶尔羌河流域的水资源系统进行了概化,并利用WEAP模型对不同干旱等级下的研究区水资源供需现状进行了模拟分析;第7、第8章主要是通过多种开源节流思路,构建在各流域的水资源应急调配方案,通过分析评价选出适合各流域的最优方案,并对优选方案进行水资源配置计算,以实现水资源优化调配,为流域社会经济与生态环境可持续发展提供科技支撑;第9章则是结论总结和展望。

本书主要是作者及其培养的研究生参与的科研项目的部分相关科研成果和论文研究成果的总结。在本书撰写过程中,杨明智、张运超、邢宝龙、张竞楠、宋佳佳、李晓玲、王思琪、王苓如、刘远洪、李永坤、王娇、李泽华、安贵阳、张梦泽、施俊雅、卢留虎、钱磊、任磊、邵世光、杜玉娇、李翔、张彪等研究生给予了大力支持,参与了本书部分章节的编写工作以及本书的整编及校验,在此表示感谢。全书由李杰友、薛联青、杨明智统稿。感谢水利部水文局王爱平教授级高工、楚永红处长、孙超工程师、王金山工程师、郑刚工程师,感谢新疆水科院白云岗高工、河海大学访问学者杨晓军以及东南大学程光教授及吴义锋博士、南京工业大学饶群博士和山东大学王好芳博士的帮助和支持。

本书出版得到水利部公益性行业科研专项(201001066,201001057)、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项经费(2011585512)、中央高校基本科研业务费专项资金资助以及江苏高校优势学科建设工程的资助,在此表示感谢!同时感谢江苏省“青蓝工程”优秀骨干教师及“河海大学新世纪创新人才计划”的支持。

在本书的撰写过程中,得到了水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、河海大学水文水资源学院,以及东南大学出版社等单位领导和专家的大力支持,在此深表谢意!

同时对本书所引用的参考文献的作者及不慎疏漏的引文作者也一并致谢!

由于作者水平有限,编写过程中难免存在很多不足及顾此失彼之处,敬请读者给予批评指正!

编 者

2012年12月

目 录

1	绪 论	(1)
1.1	问题的提出及研究意义	(1)
1.2	水资源优化配置	(3)
1.2.1	国外研究进展	(3)
1.2.2	国内研究进展	(6)
1.2.3	水资源配置的发展模式	(8)
1.2.4	水资源优化配置存在的问题	(9)
1.2.5	水资源优化配置的发展趋势	(11)
1.3	水资源配置的原则	(12)
1.3.1	有效性原则	(12)
1.3.2	公平性原则	(13)
1.3.3	可持续性原则	(13)
1.3.4	统一协调性原则	(13)
1.3.5	可接受性原则	(14)
1.4	研究内容、方法和技术路线	(14)
1.4.1	研究内容	(14)
1.4.2	研究方法	(14)
1.4.3	技术路线	(15)
1.5	本章小结	(15)
2	塔河流域极端旱情条件下水资源应急调配理论体系	(17)
2.1	干旱评价指标选取及干旱等级划分	(17)
2.1.1	干旱评价指标选取	(17)
2.1.2	干旱等级划分方法	(18)
2.2	水资源系统及构成	(20)
2.2.1	水库	(20)
2.2.2	灌区	(20)
2.2.3	工业用水	(21)
2.2.4	城乡生活用水	(21)
2.2.5	引水渠道	(21)

2.3	WEAP 模型原理	(22)
2.3.1	WEAP 模型的水资源系统构成要素	(22)
2.3.2	WEAP 模型运算流程	(25)
2.3.3	运算法则	(27)
2.4	极端旱情条件下水资源应急调配原则和目标	(28)
2.4.1	应急调配原则	(28)
2.4.2	应急调配目标	(29)
2.5	应急调配方案评价模型	(29)
2.6	本章小结	(31)
3	塔河干流的水资源系统要素分析	(32)
3.1	流域概况	(32)
3.2	水资源系统要素评价	(34)
3.2.1	降水	(34)
3.2.2	冰川	(35)
3.2.3	蒸发	(35)
3.2.4	河道	(36)
3.2.5	径流	(40)
3.2.6	水资源量及水质	(42)
3.2.7	水资源可利用量	(49)
3.3	干旱等级划分	(53)
3.4	水资源分区	(56)
3.5	水资源开发利用现状	(56)
3.5.1	现状年供水结构分析	(56)
3.5.2	现状年用水结构分析	(57)
3.5.3	水资源开发利用现状评价	(57)
3.6	水文循环	(59)
3.7	生态问题	(61)
3.8	本章小结	(62)
4	叶尔羌河流域的水资源系统要素分析	(63)
4.1	流域概况	(63)
4.1.1	地形地貌	(63)
4.1.2	气象	(64)
4.1.3	河流水系	(65)
4.1.4	社会经济	(65)
4.2	水资源系统要素评价	(66)

4.2.1	降水和蒸发	(66)
4.2.2	河流泥沙	(67)
4.2.3	水资源总量	(69)
4.2.4	水资源可利用量	(74)
4.3	干旱等级划分	(75)
4.4	水资源分区	(77)
4.4	水资源开发利用现状评价	(78)
4.5	水文循环	(79)
4.6	生态环境	(80)
4.7	本章小结	(81)
5	水利工程现状及需水分析	(82)
5.1	塔河干流流域	(82)
5.2	叶尔羌河流域	(84)
5.3	塔河流域社会经济指标	(88)
5.3.1	阿克苏河流域	(88)
5.3.2	塔河干流流域	(90)
5.3.3	叶尔羌河流域	(92)
5.4	生活生产需水量	(95)
5.4.1	阿克苏河和塔河干流流域	(95)
5.4.2	叶尔羌河流域	(95)
5.5	生态需水量	(97)
5.5.1	阿克苏河和塔河干流流域	(97)
5.5.2	叶尔羌河流域	(100)
5.6	需水总量	(100)
5.7	本章小结	(101)
6	塔河流域不同干旱等级下缺水模拟分析	(102)
6.1	阿克苏河流域及塔河干流 WEAP 模型构建	(102)
6.1.1	构建要素	(102)
6.1.2	运行规则	(106)
6.2	塔河流域不同干旱等级下基准年模拟结果及分析	(108)
6.2.1	干旱年的基准年模拟结果及分析	(108)
6.2.2	重度干旱情况的基准年模拟结果及分析	(121)
6.2.3	特大干旱情况的基准年模拟结果及分析	(132)
6.2.4	不同干旱等级下对比分析	(143)
6.3	叶尔羌河流域的 WEAP 模型构建	(145)

6.3.1	河流来水量	(146)
6.3.2	需求点概化	(147)
6.4	不同干旱等级的基准年模拟结果及分析	(147)
6.5	本章小结	(176)
7	塔河干流区不同干旱等级下的水资源应急调配方案优选	(177)
7.1	优化调配方案集的设定及供需分析	(177)
7.1.1	方案一:提高灌溉水利用系数	(177)
7.1.2	方案二:增加地下水开采	(179)
7.1.3	方案三:改变优先顺序	(179)
7.1.4	方案四:组合方案一与方案二	(180)
7.1.5	方案五:组合方案一与方案三	(180)
7.2	塔河干流区各优化调配方案模拟结果及分析	(181)
7.2.1	方案一	(181)
7.2.2	方案二	(186)
7.2.3	方案三	(190)
7.2.4	方案四	(193)
7.2.5	方案五	(197)
7.3	本章小结	(199)
8	叶尔羌河流域不同干旱等级下的水资源应急调配方案及优选	(200)
8.1	应急方案集设定	(200)
8.1.1	增加地下水开采	(200)
8.1.2	高效节水工程和渠系防渗工程	(200)
8.1.3	考虑不同农业比重	(201)
8.2	各方案缺水分析计算	(203)
8.3	方案的比选	(205)
8.4	优选方案分析	(206)
8.4.1	目标函数结果	(206)
8.4.2	方案评价	(210)
8.5	模拟结果及分析	(211)
8.6	方案的合理性评价	(239)
8.7	本章小结	(239)
9	实施的保障措施	(240)
9.1	供水保障对策	(240)
9.2	供水保障措施	(241)
	参考文献	(244)

1 绪 论

1.1 问题的提出及研究意义

水是农业的命脉,也是整个国民经济和人类生活的命脉。水资源分布状况和利用水平已成为评价一个国家或一个地区的经济能否持续发展的重要指标。我国是一个水资源相对匮乏的国家,年均降水量为 630 mm,低于全球和亚洲的降水量;年平均淡水资源总量为 2.8 万亿 m^3 ,人均占有水量仅为 2 300 m^3 ,相当于世界人均水平的 1/4,居世界第 109 位,是世界上人均占有水资源最贫乏的 13 个国家之一^[1];耕地水资源占有量 28 500 m^3/hm^2 ,为世界平均数值的 4/5。另外,我国水资源时空分布不平衡,降水东南多西北少,山区多平原少,雨量大致由东南向西北递减。81%的水资源集中分布在长江流域及以南地区,长江以北地区人口和耕地占我国的 45.3%和 64.1%,而水资源却仅占全国的 19%,人均占有量约为 517 m^3 ,相当于全国人均量的 1/5 和世界人均量的 1/20^[2],区域水资源与生产发展不相适应的问题突出,土地沙漠化趋势日趋严重。

水资源是人类社会一切生产、生活的物质基础,没有水资源就没有人类^[3]。随着社会的不断进步和生产的不断发展,人们对水的质量和数量的需求也越来越高。但自然界所能提供的可用水资源量却是有限的,而且水资源的时空分布与需水量的时空要求不协调,供需矛盾日趋尖锐,因此,从可持续发展观点看,世界上许多国家和地区都将面临水资源的优化配置问题,亦即对有限的水资源如何进行分配,使其满足社会经济发展和生态环境对水资源的需求。

众所周知,农业作为基础产业和战略产业,是任何国家和地区经济发展所依赖的基础。我国是一个农业大国,农业生产的发展对于确保社会经济长期持续发展更是具有决定性的意义。我国是一个占世界人口 20%的大国,预计到 2030 年,我国人口将达到 16 亿,需要粮食 6 400 亿 kg,届时将缺水 1 300 亿~2 600 亿 m^3 。水资源问题将长期成为我国政府面临的头等大事,水资源短缺已成为制约我国农业乃至整个国民经济可持续发展的核心。同时,中国是个受干旱影响严重的农业大国,据水利部统计,“十五”期间,全国农田受旱面积年均达 3.85 亿亩,平均每年因旱减产 350 亿 kg,每年造成经济损失超过 2 300 亿元。同时,由于工农业经济的不合理快速发展,导致我国 70%的内陆河流遭到污染,城镇建设快速发展,工农业用水竞争激烈。这些都成为中国经济发展和社会安定的隐患。

中国有一半的国土在西北干旱半干旱地区,周边有高山阻隔,远离海洋,气候干旱,降水稀少,基本是沙漠、戈壁、草原和贫瘠低产的农田。水是干旱内陆河流域最为宝贵的自然资源,是控制生态环境和经济可持续发展的关键因素,不仅是荒漠绿洲形成、发展和稳定的基础,也是环境的必要和有机组成部分。如何解决西北地区的干旱缺水问题,改变西北落后贫穷面貌,发展工农业生产,缩小东西部地区差别,以开发利用这些地区广袤的国土资源,将这些地区改造为农业生产后备区,发挥其农业生产潜力,将成为中国未来工农业和社会经济发展中面临的难题,应该及早列到国家的议事日程。

塔河是我国最大的内陆河,流域位于新疆南部,总面积 102 万 km^2 ,流域内土地资源、光热资源和石油天然气资源十分丰富。塔河流域历史上形成的天然绿洲,是阻挡塔克拉玛干沙漠的风沙侵袭、保护人类生存环境的天然保障。塔河流域水资源开发利用和生态环境保护,不仅关系流域自身的生存和发展,也关系到西部大开发战略的顺利实施,战略地位十分重要。塔河木河流域深居内陆,气候干旱,降雨稀少,蒸发强烈,水资源相对贫乏,生态环境脆弱,但又是人口密度最高、经济社会发达、水资源开发利用程度最高的内陆河流域。水资源的开发利用支撑着区域经济的发展和人民生活水平的提高,但人口的增加、经济社会的发展、水资源的无序开发和低效利用,致使叶尔羌河、和田河等源流向干流输送的水量逐年减少,甚至断流,水质不断恶化,塔河下游近 400 km 的河道断流,尾间台特玛湖干涸,大片胡杨林死亡,生态环境日趋恶化,已成为制约流域经济社会和生态环境可持续发展的主要因素。与此同时,随着社会经济的发展,水资源的过度开发利用,进入下游绿洲的水量逐年锐减,致使下游地下水位下降,依赖地下水生长的天然植被衰退,绿洲萎缩,进而引起土地沙漠化、荒漠化、盐碱化扩展等一系列生态环境问题,威胁着流域的可持续发展,危及当地人们的生存。为解决不同干旱等级情况下的塔河流域的水资源短缺问题,探索塔河流域水资源的合理配置理论及关键技术,本书结合《塔河流域近期综合治理规划报告》,考虑我国内陆干旱区水资源极端匮乏、干旱频繁发生的实际情况,从研究区的供需现状和缺水形势着手,揭示不同等级的干旱致灾效应,揭示干旱等级对区域社会经济发展的影响。通过增加流域内的地下水开采、发展高效节水工程和渠系防渗工程等开源节流思路,构建在极端旱情下各种工程措施下的水资源调配方案并进行优选,以实现生态系统良性循环及经济可持续发展的目的,实现水资源优化调配,发挥水资源的经济、生态综合效能,为塔河流域的社会经济与生态环境可持续发展提供科技支撑,为当地的水资源优化配置提供科学依据。同时该流域的水资源优化配置模式的研究不仅可以有效地指导流域水资源调控实践,而且对于西北其他内陆河流域都有很好的借鉴意义。

1.2 水资源优化配置

水资源优化配置是指在一个特定流域或区域水资源分配过程中,充分考虑人类社会、经济、生态、环境等因素,合理利用水资源系统的时空变异特征,工程与非工程措施并举,优化水资源在地区之间、部门之间以及上下游、左右岸、经济、生态与环境等之间的分配,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。水资源优化配置是将有限的不同形式的水资源进行科学合理的分配^{[4][5]},实质就是提高水资源的配置效率:一方面是提高水的分配效率,合理解决各部门和各行业之间的竞争用水问题;另一方面则是提高水的利用效率,促使各部门或各行业内部高效用水^[6]。

水资源优化配置与水资源合理配置在概念上是有区别的,合理配置中的合理是水资源供需矛盾、各类用水竞争、上下游左右岸协调、不同水利工程投资关系、经济与生态环境用水效益、当代社会与未来社会用水、各种水源相互转化等一系列复杂关系中相对公平的、可接受的水资源分配方案。合理配置是人们在分配稀缺资源进行分配时的目标和愿望。一般而言,合理配置的结果对某一个体的效益或利益并不是最高最好的,但对整个资源分配体系来说,其总体效益或利益是最高最好的。而优化配置则是人们在寻找合理配置方案中所利用的方法和手段。

1.2.1 国外研究进展

国外对水资源调配的研究是比较早的,源于 20 世纪 40 年代 Mases 提出的水库优化调度问题^[7],主要研究单一工程的优化调度,以后逐渐发展到流域水资源的优化配置,水资源合理配置的研究内容、配置目标及研究方法都得到了发展。1950 年,美国总统水资源政策委员会的报告是最早综述水资源开发、利用和保护问题的报告之一,它推动了行政管理部门进一步开展水资源方面的调查研究工作。由于水资源系统的复杂性,以及存在的包括政治、社会、决策者偏好等各种非技术性因素,简单使用某些优化技术并不能取得预期的效果,而模拟模型技术可更加详细地描述水资源系统内部的复杂关系,并通过有效的分析计算获得满意的结果,从而为水资源宏观规划及实际调度运行提供充分的科学依据。最早的水资源模拟模型是 1953 年美国陆军工程师兵团(USACE)为了解决密苏里河流域 6 座水库的运行调度问题而设计的(Hall 和 Daruap, 1970)。其后,为解决尼罗河流域水库的规模及其运行调度问题(Emergy 和 Meek, 1960)也建立了专门的模拟模型。Masse 等人在 1962 年提出了模拟技术在评价流域开发经济指标中的应用实例。

国外对水资源合理配置的研究始于 20 世纪 60 年代初期。1960 年科罗拉多的几所大学对需水量的估算及满足未来需水量的途径进行了探讨,体现了水资源合

理配置的思想。1961年,Moore提出了在一定时期内最优水量分配问题^[8]。1961年,Buras等首次把DP法引入联合运用系统,用以解决地面水库和地下水库的蓄水分配问题^[9]。1963年,Buras针对包含一个地表水库和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,以确定地下水库和人工回灌工程的规模、各灌区的灌溉面积以及地表水库和地下水库的供水策略^[10]。1967年,Flinn和Musgrvae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^[11]。同时,系统分析的其他方法如线性规划、非线性规划等在水资源优化配置中的应用也越来越广泛。

20世纪70年代以来,伴随计算机技术、系统分析理论和模拟技术的发展及其在水资源领域的应用,水资源合理配置研究得到了长足的进步,各种水资源管理系统模型应运而生。D. H. Marks于1971年提出水资源系统线性决策规则后,采用数学模型的方法来描述水资源系统问题更为普遍,随着系统分析理论、优化技术的引入及计算机技术的发展,水资源系统模拟模型和优化模型的建立、求解和运行的研究和应用工作水平不断得到提高;同年,美国学者Norma. J. Dudley将作物生成模型和具有二维状态变量的随机规划相结合,对季节性灌溉用水分配进行了研究。1974年,J. H. Cohon和D. H. Marks对水资源多目标问题进行了研究;1975年,Y. Y. Haimes应用多层次管理技术对地表水库、地下含水层的联合调度进行了研究,使模拟模型技术向前迈进了一步。同年,J. A. Drac和A. D. Fudmar用系统方法对南斯拉夫Moruaa流域的水资源规划管理进行了研究。1978年,J. M. Shaefer和J. w. Lbadaie提出了流域管理模型。美国麻省理工学院(MIT)于1979年完成的阿根廷河Riocoloardo流域的水资源开发规划^[12],是当时最成功、最有影响的例子。1982年,加拿大内陆水中心利用线性规划网络流算法解决了渥太华流域及五大湖系统的水资源规划和调度问题。同年,Pearosn等利用多座水库的控制曲线,以最大产值、输送能力和预测的需水量为约束条件,用二次规划方法对英国Nawwa区域的用水分配问题进行了研究;英国学者P. W. Herbertson等,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;荷兰学者在考虑了水的多功能性和多种利益关系时,强调决策者与学者的合作,并建立了相应的水资源分配问题的多层次模型,注重水质约束、环境效益与水资源可持续利用研究,体现了水资源配置问题的多目标和层次结构的特点。1983年,D. P. Sheer经过长时间的努力,利用优化和模拟相结合的技术在华盛顿特区建立了城市配水系统。1985年,G. Yhe对系统分析方法在水库调度和管理中的研究及应用作了全面综述,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,以模拟模型技术对流域水量的利用进行了研究,提出了多目标规划理论、水资源规划的数

学模型方法,并加以应用。1987年,Willis应用线性规划方法求解了由1座地表水库与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法求解了一个水库与地下水含水层的联合管理问题^[13]。

自20世纪90年代开始,水污染和水资源危机加剧,传统的以水量和经济效益最大的水资源分配已经不能满足需要,国外开始从单纯的水量配置研究发展到水量水质统一配置研究;从追求流域经济效益最优为目标发展到追求流域整体效益最优为目标,更加重视生态环境与社会经济的协调发展。1992年,Afzal、Javaaid等以某个地区的灌溉系统为例,建立了线性规划模型,对不同水质水的使用问题进行了优化^[14],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结果。1995年,Watkins,David W. Jr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,建立了有代表性的水资源联合调度模型。此模型是一个二阶段扩展模型,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,运用大系统的分解聚合算法求解最终的非线性混合整数规划模型^[15]。R. A. Fleming和R. M. Admas建立的地下水水质水量管理模型,以经济效益最大为目标,考虑了水质运移的滞后作用,并采用水力梯度作为约束来控制污染扩散。U. Pmnaul, Lall等建立了地表水、地下水联合运用系统的多目标管理模型,模型中将地表水地下水的处理费用纳入管理目标。1997年,Wong Hugh S等人提出支持地表水、地下水联合利用的多目标多阶段优化管理的原理与方法,在需水预测中要求地下水、地表水、外调水等多水源联合运用,还考虑了地下水的恶化防治措施^[16];美国学者Norman J Dudley将作物生长模型和具有二维状态变量的随机动态规划相结合,对灌区的季节性灌溉用水量分配进行了研究^[17];Carlos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,模型中考虑了不同用水部门对水质的不同要求。1998年,Wang M研究了遗传算法(GA)和模拟退火(SA)在地下水资源优化管理中的应用,考虑了地下水随水流状态变化而变化的特性,建立了地下水模拟优化混合模型^[18]。通过GA和SA的求解结果与线性规划、非线性规划、动态规划结果的比较,评价各类方法优缺点。三个实例研究中,GA和SA的优化结果优于或接近于各类优化方法的结果。Tewei在2001年建立了流域整体的水量水质网络模型。2002年,Ringler和Claudia在湄公河流域建立了水资源优化配置模型,该模型以流域为单元来确定湄公河水资源分配;Morshed等回顾了GA在非线性和非连续问题中的应用,对改进遗传算法的可能方面进行了研究与探索^[19],以一个具有固定和变化的非线性地下水优化问题为实例,将改进遗传算法得到的最优解和非线性规划得到的最优解进行比较,并研究这些改进方法对GA各种参数的敏感性^[20];McKinney等提出了基于GIS系统的水资源模拟系统框架,进行了流域水资源配置研究的尝试^[21]。

在 2003 年,Zhong P. A 和 Wang H. R 等建立了大系统多目标的水资源优化调度分解模型。Ma W. F 和 Zhao X. H 等(2005)建立了以重复利用为基础的多目标水资源优化配置模型,该模型的决策变量是种植面积,目的是最大限度地扩大作物产量和农民收入,依据优化配置提供科学决策,缓解农业水灌溉危机。在 2006 年,Subhankar Karmakar 和 P. P. Mujumder 建立了基于灰色系统理论的不确定性模型。Ma Weifang 和 Wen Junl(2008)研究实施再生水回用措施来解决我国水资源短缺问题。该系统所有部门都被视为“以满意度为目标”的独立人士。水的分配满足了水的质量和数量的需求,在一定程度上三种水资源的模糊优化的满意度最低优化模型。2009 年,Cai Xinmin 建立了各种水源的以最大经济利润的目标的数学规划模型,这种模型可以用来解决经济、环境相结合的问题。

1.2.2 国内研究进展

在我国,水资源优化配置研究是随着系统工程理论的发展、应用和社会经济发展对水资源需求特点变化而展开的,虽然研究起步较迟,但发展很快。20 世纪 60 年代我国开始了以水库优化调度为先导的水资源分配研究,并在国家“七五”攻关项目中得到提高和应用,形成了水量合理配置的雏形^{[22][23]}。“八五”期间,黄河水利委员会开展了“黄河流域水资源合理分配及优化调度”研究,对流域管理和水资源合理配置起到了较好的示范作用。水资源优化配置方法的系统提出是在国家“八五”科技攻关项目专题“华北地区水资源优化配置研究”中,该成果提出的基于宏观经济的水资源优化配置理论与方法,在水资源优化配置的概念、目标、平衡关系、需求管理、经济机制及模型的数学描述等方面,均有创新性进展,并在华北、新疆北部及其所属部分省、市得到广泛应用^{[24][26]}。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,水资源优化配置的范畴进一步拓展到社会经济—水资源—生态环境系统,优化配置也发展到同时考虑国民经济用水和生态环境用水^[27]。随着我国社会经济发展和用水量不断攀升,水问题的核心变为社会经济用水和生态用水之间的不平衡,使得流域水资源调配格局不当,引起经济、生态问题。针对上述问题,“十五”科技攻关项目“水安全保障技术研究”提出面向全属性功能的流域水资源配置概念。“十一五”主要进行了基于 ET 的水资源整体配置。实现基于 ET 的分配是解决水资源配置问题的一个重要进步,它将水量配置从取用水量配置推进到耗水量配置,将配置与真实节水相关联,对实现流域水循环调控目标具有重要意义。

在我国对水资源优化配置的研究,概括起来有以下几种:

水利工程控制单元的水资源优化配置。水利工程是水资源配置的基本单元,由于其结构相对简单,影响和制约因素相对较少,因此如何实现水利工程控制的有限水资源量的最大效益,成为广大学者较早涉足的研究领域。唐德善以黄河中游

某灌区为例,运用递阶动态规划法,确定水资源量在工业和农业之间的分配比例。贺北方、黄振平、向丽、马斌对多库多目标最优控制运用的模型与方法、灌区渠系优化配水、大型灌区水资源优化分配模型、多水源引水灌区水资源调配模型及应用进行了研究。这些成果促进了以有限水资源量实现最大效益的思想在水利工程管理中的应用。

城市水资源优化配置。针对某一个具体的城市,建立多水源多目标优化模型。卢华友(1997)等以义乌市水资源系统为对象,建立大系统分解协调模型,并提出了递阶模拟择优的方法。黄强等(1999)以西安市市区供水水源优化调度为实例,建立了多水源联合调度的多目标优化模型,提出了多目标模型求解思路和方法。辛玉深等(2000)应用现代系统分析理论,建立了长春市多水源联合供水的优化管理模型。吴险峰等探讨了北方缺水城市——枣庄,在水库、地下水、回用水、外调水等复杂水源下的优化供水模型,从社会、经济、生态等综合效益考虑,建立了水资源优化配置模型。

区域水资源优化配置。由于区域水资源系统结构复杂,影响因素众多,各部门的用水矛盾突出,研究多以多目标和大系统优化技术为主要研究手段,在可供水量和需水量确定的条件下,建立区域有限的水资源量在各分区和用水部门间的优化配置模型,求解模型得到水量优化配置方案。贺北方提出了区域水资源优化分配问题,建立了大系统序列优化模型,采用大系统分解协调技术求解,在河南豫西地区建立了区域可供水资源年优化分配的大系统逐级优化模型,该成果的特点是考虑了产业结构调整对水资源量配置的影响。吴泽宁等以经济区社会效益最大为目标,建立了经济区水资源优化分配的大系统多目标模型及其二阶分解协调模型,并用层次分析法(AHP)简洁考虑了水资源配置的生态环境效果。翁文斌等将宏观经济、系统方法与区域水资源规划实践相结合,形成了基于宏观经济的水资源优化配置理论,并在这一理论指导下提出了多层次、多目标、群决策方法,实现了水资源配置与区域经济系统的有机结合。“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”,建立了干旱区生态环境需水量计算方法,提出了与区域发展模式及生态环境保护准则相适用的生态环境需水量,在此基础上,提出了针对西北生态脆弱地区的水资源配置方案。冯耀龙等(2003)系统分析了面向可持续发展的区域水资源优化配置的内涵与原则,建立了优化配置模型,给出了其实用可行的求解方法。

流域水资源优化配置。唐德善运用多目标规划的思想,建立了黄河流域水资源多目标分析模型,提出了大系统多目标规划的求解方法。1996年由黄委会勘测规划设计研究院主持的“黄河流域水资源合理分配和优化调度研究”,开发了由数据库、模拟模型、优化模型等组成的决策支持系统,并初步研究了黄河干流多库水利联合调度模型。陈晓宏等以大系统分解协调理论作为技术支持,运用逐步宽容

约束法及递阶分析法,建立了东江流域水资源优化调配的使用模型,并对该流域特枯年水资源量进行了优化配置和供需平衡分析。邵东国针对南水北调东线这一多目标、多用途、多用户、多供水优先次序、串并混联的大型跨流域调水工程的水利优化调配,以系统弃水量最小为目标,建立了自优化模拟决策模型,并采用动态规划法求解。卢华友等以跨流域水资源系统中各子系统的供水量和蓄水量最大、污水量和弃水量最小为目标,建立了基于多维动态规划、与模拟技术相结合的大系统分解协调实时调度模型,是水资源优化配置研究的一大进步。

1.2.3 水资源配置的发展模式

我国水资源配置的研究经历了3个阶段:一是水量配置阶段(20世纪60年代~80年代初);二是经济效益优先阶段(80年代中期~90年代初);三是可持续发展和生态保护优先阶段(90年代中期以后)。相应的水资源配置的理论经历了从需水管理到供水管理,再到基于宏观的经济管理的转变,分别形成了“以需定供”、“以供定需”、基于宏观经济和可持续发展的水资源配置理论。

1) “以需定供”的水资源配置

“以需定供”的水资源配置强调供水管理,根据过去或目前的国民经济结构和发展速度资料预测未来的经济规模,通过该经济规模预测相应的需水量,并以此得到需求水量,进行供水工程规划,注重协调各单位竞争性用水,加强管理,并通过工程措施改变水资源天然时空分布与生产力布局不相适应的被动局面。这种思想强调需水要求,通过修建水利水电工程的方法从大自然无节制或者说掠夺式地索取水资源。其结果必然带来不利影响,诸如河道断流、土地荒漠化甚至沙漠化、地面沉降、海水倒灌、土地盐碱化等等。另一方面,由于以需定供,没有体现出水资源的价值,毫无节水意识,也不利于节水高效技术的应用和推广,必然造成社会性的水资源浪费。因此,这种牺牲资源、破坏环境的经济发展,会付出沉重的代价,只能使水资源的供需矛盾更加突出。

2) “以供定需”的水资源配置

“以供定需”的水资源配置,是以水资源的供给可能性进行生产力布局,强调资源的合理开发利用,以资源背景布置产业结构,它是“以需定供”的进步,有利于保护水资源。但是,水资源的开发利用水平与区域经济发展阶段和发展模式密切相关,因此,水资源可供水量是随经济发展相依托的一个动态变化量,“以供定需”在可供水量分析时与地区经济发展相分离,没有实现资源开发与经济发展的动态协调,可供水量的确定显得依据不足,并可能由于过低估计区域发展的规模,使区域经济不能得到充分发展,这种配置理论也不适应经济发展的需要。

3) 基于宏观经济的水资源配置

无论是“以需定供”还是“以供定需”,都将水资源的需求和供给分离开来考虑,