



IUYU/QUYU SHUIZIZYUAN QUANYAOSU YOUHUA PEIZHI GUANJIAN JISHU JI SHIFAN

魏传江 韩俊山 韩素华 著

# 流域/区域水资源全要素优化配置 关键技术及示范



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

“十一五”国家科技支撑计划项目 (2007BAB28B02)  
水利部公益性行业科研专项 (201101034)

联合资助

# 流域/区域水资源全要素优化配置 关键技术及示范

魏传江 韩俊山 韩素华 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是在“十一五”国家科技支撑计划项目“流域/区域水资源全要素优化配置关键技术研究”(2007BAB28B02)课题成果的基础上撰写而成。以水量与水质联合配置为主线,探讨了流域/区域水资源全要素优化配置理论,构建了水资源全要素优化配置模型系统,开发了相应的计算机软件,并选择两个典型流域进行了示范研究。

本书可供水利、水资源、生态、环境等专业的科研、教育、计划管理人员以及高等院校相关专业的师生阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

流域/区域水资源全要素优化配置关键技术及示范 /  
魏传江, 韩俊山, 韩素华著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 4

ISBN 978-7-5084-9662-7

I. ①流… II. ①魏… ②韩… ③韩… III. ①流域—  
水资源管理—优化配置—研究②区域—水资源管理—优化  
配置—研究 IV. ①TV213

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第072753号

|      |                                                                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 流域/区域水资源全要素优化配置关键技术及示范                                                                                                        |
| 作 者  | 魏传江 韩俊山 韩素华 著                                                                                                                 |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>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                                                                                                               |
| 印 刷  | 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司                                                                                                                |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 12.5印张 296千字                                                                                                 |
| 版 次  | 2012年4月第1版 2012年4月第1次印刷                                                                                                       |
| 印 数  | 0001—2000册                                                                                                                    |
| 定 价  | 48.00元                                                                                                                        |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前言

2011年中央1号文件《关于加快水利改革发展的决定》明确了今后一个时期水利改革发展的四大目标体系。实现基本建成水资源合理配置和高效利用体系、基本建成水资源保护和河湖健康保障体系、基本建立最严格的水资源管理制度等目标,需要在水资源开发利用中合理解决河道外生产、生活、生态用水与河道内生态环境用水、水力发电、航运等用水需求之间的矛盾,对水量、水质、水生态、水环境等水资源要素进行全方位的配置。传统的水资源配置以水量调配为主,对水资源的另一重要属性——水质的考虑显得不足,在水资源配置中较少考虑不同用水户对水质的不同要求,以及人工侧支循环中社会经济用水对水质的影响等。随着现代社会人口剧增、城镇化和工业化迅速发展,水资源配置中存在的这些缺陷将对控制水资源短缺、河道水污染、社会经济与生态环境的用水矛盾产生不利的影响。因此,迫切需要研发综合考虑各种要素的水资源优化配置技术体系,为实现我国今后一个时期水利改革发展目标提供技术支撑。

在“十一五”期间,针对国家提出的“振兴东北老工业基地”战略,开展了国家科技支撑计划项目“东北地区水资源全要素优化配置与安全保障技术研究”(2007BAB28B00)。其中,“流域/区域水资源全要素优化配置关键技术研究”(2007BAB28B02)是以水量与水质联合配置为主线,研究流域或区域水资源全要素优化配置的关键技术,试图研制出一套实用的工具,将水资源配置从传统的水量分配向维持人与自然和谐,考虑水资源的质、量、生态、环境等要素,可持续利用有限的水资源方向发展。课题的研究具有前瞻性,不仅对实施“振兴东北老工业基地”战略提供了重要的用水安全保障基础,也符合我国今后一个时期水利改革发展的目标,同时对其他地区开展综合考虑各种要素的水资源优化配置起到积极的推动和示范作用,特别是在制定科学的截污减排措施,进行污染物总量控制,保障水功能区水质达标等方面具有重要的现实意义。

全书分为7章。第1章是绪论;第2章探讨了流域/区域水资源全要素优

化配置理论,包括水资源全要素优化配置的定义、配置原则、决策机制、调控指标、“三次平衡”思想、水资源可持续利用评价量化方法、多目标决策分析与优化模拟方法,以及水资源全要素优化配置方案评价方法等;第3章构建了水资源全要素优化配置模型系统,包括水资源优化配置模型、基于水资源优化配置水质模拟模型和地下水数值模拟模型;第4章开发了水资源全要素优化配置模型计算机软件;第5章和第6章分别对浑太河、三岔河至哈尔滨进行了示范研究;第7章是结论与建议。

本书在流域/区域水资源全要素优化配置理论与方法方面取得了如下具有推广应用价值的成果:①提出了流域/区域水资源全要素优化配置理论、技术框架和模型系统;②提出了流域水资源分区社会经济耗水和生态用水比例等计算方法;③绘制了基于水功能区划分的水资源配置系统网络图,提出了系统网络图节点计算次序的编码规则;④提出了水资源全要素配置方案评价方法与指标体系。

本书是在“十一五”国家科技支撑计划项目“流域/区域水资源全要素优化配置关键技术研究”(2007BAB28B02)课题的专题研究成果的基础上撰写而成。本书的顺利完成与课题组成员的共同努力是分不开的,在此对参加课题研究的所有工作人员表示真诚的感谢。

流域/区域水资源全要素优化配置理论与方法的研究是一个极其复杂的系统工程,涉及面非常广泛,本书仅是这方面研究的起步阶段,尚有许多内容需要深入研究。由于作者水平有限,难免会有疏忽或错误,在此恳请诸位专家、读者批评指正。

作 者

2011年11月

# 目 录

## 前言

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论               | 1   |
| 1.1 水资源全要素优化配置研究的目的和意义 | 1   |
| 1.2 水资源全要素优化配置研究的思想方法  | 2   |
| 1.3 水资源全要素优化配置的主要研究内容  | 2   |
| 第 2 章 水资源全要素优化配置理论基础   | 4   |
| 2.1 水资源配置研究进展          | 4   |
| 2.2 水资源全要素优化配置基础       | 7   |
| 2.3 水资源可持续利用评价方法       | 14  |
| 2.4 水资源全要素优化配置方法       | 19  |
| 2.5 水资源全要素优化配置方案评价方法   | 22  |
| 2.6 小结                 | 27  |
| 第 3 章 水资源全要素优化配置模型系统设计 | 28  |
| 3.1 模型系统总体设计           | 28  |
| 3.2 水资源全要素优化配置系统概化     | 33  |
| 3.3 水资源优化配置模型          | 40  |
| 3.4 地下水数值模拟模型          | 54  |
| 3.5 基于水资源优化配置水质模拟模型    | 65  |
| 3.6 小结                 | 87  |
| 第 4 章 水资源全要素优化配置模型程序设计 | 89  |
| 4.1 程序系统总体设计           | 89  |
| 4.2 水资源优化配置模型          | 97  |
| 4.3 水质模拟模型             | 108 |
| 4.4 GMS 三维地下水数值模拟系统    | 115 |
| 第 5 章 辽河流域典型示范区研究      | 120 |
| 5.1 浑太河流域概况            | 120 |
| 5.2 系统网络图与模型数据         | 124 |
| 5.3 基准年水资源配置方案分析       | 127 |
| 5.4 规划水平年水资源配置方案分析     | 138 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 5.5 小结 .....                  | 155 |
| <b>第6章 松花江流域典型示范区研究</b> ..... | 156 |
| 6.1 松花江流域典型示范区概况 .....        | 156 |
| 6.2 系统网络图与模型数据 .....          | 159 |
| 6.3 基准年水资源配置方案分析 .....        | 161 |
| 6.4 规划水平年水资源配置方案分析 .....      | 170 |
| 6.5 小结 .....                  | 182 |
| <b>第7章 结论与建议</b> .....        | 183 |
| 7.1 主要研究结论 .....              | 183 |
| 7.2 几点建议 .....                | 185 |
| <b>参考文献</b> .....             | 187 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 水资源全要素优化配置研究的目的和意义

水是人类赖以生存和发展的重要战略性自然资源，水资源的可持续利用是支撑社会经济可持续发展和生态环境健康的基本保障，直接关系到我国全面建设小康社会目标的实现。当前水资源短缺已成为全球性问题，水资源危机引起了世界各国的广泛关注和不安。我国面临洪涝灾害、水资源短缺、水环境恶化三大问题，特别是水资源短缺和水环境恶化问题成为社会经济发展和生态环境保护的主要制约因素，使得水资源成为当前和今后相当长一段时期需要迫切解决的战略问题。2011 年中央 1 号文件明确了我国今后一个时期水利改革发展的目标，其中，基本建成水资源合理配置和高效利用体系，基本建成水资源保护和河湖健康保障体系，基本建立最严格的水资源管理制度是主要目标。实现这些目标需要遵循可持续、公平、高效的原则，将有限的水资源在社会、经济、生态、环境等系统内合理调配，并协调好它们之间的用水关系，保障社会经济和生态环境的健康发展。

我国水资源配置研究大体经历了基于宏观经济的水资源优化配置和面向生态的水资源优化配置阶段，目前正向水量与水质联合配置阶段发展。前两个阶段以水量调配为主，对水资源的另一属性——水质的考虑显得不足，在水资源配置中较少考虑不同用水户对水质的不同要求以及人工侧支循环中社会经济用水对水质的影响。随着我国水污染问题的日趋严重，水量与水质的联合配置已成为国内近年来的研究热点。我国即将实行的最严格的水资源管理制度包括：建立用水总量控制制度、建立用水效率控制制度和建立水功能区限制纳污制度。在水资源配置中进行水量与水质联合调配，可以将人工侧支循环中污染物的产生、运移、削减纳入水质微观模拟中，并结合水功能区的水质目标实现区域内用水户的分质供水、水环境容量分配、入河污染源的控制和治理，是建立健全水资源管理制度重要技术支撑。

综上所述，水资源配置是流域或区域水资源可持续利用的一项重要、迫切的基础性工作，需要在科学发展观的指导下，从人与自然和谐的目标出发，研究与不同发展阶段相适应的社会经济与生态环境两大系统之间的水量分配，以及在流域水环境承载能力约束下的排污总量控制和时空配置问题；研究在社会经济可用水总量的约束下，如何实现流域内地区之间、区域内城乡之间、河流上下游之间水资源的公平和高效利用等水资源配置问题；研究城镇化、工业化、农业及粮食安全建设等所带来的城镇、工业、灌溉、航运、水力发电等不同经济目标用水之间的权衡和协调；研究回答流域内修建跨流域调水工程的可行性和必要性等。因此，针对流域或区域水资源开发利用中存在的问题，研究和提出水资源全要素优化配置关键支撑技术，对于保障我国全面建设小康社会目标的实现具有重大现实意义。



## 1.2 水资源全要素优化配置研究的思想方法

针对国内外水资源配置的实践和新时期我国水利改革发展的目标,以辩证的系统思维方式为哲学基础,积极探索水资源系统的基本规律,完善和发展流域或区域水资源全要素优化配置的理论与方法,为建立健全我国水资源管理制度提供技术支撑。主要思想方法包括:理论研究和实证研究并重、宏观和微观协调、定性和定量结合、多学科交叉研究等。

(1) 理论研究和实证研究并重。结合国内外水资源配置的相关理论和实践经验,对流域或区域水资源全要素优化配置开展系统和深入的理论探索,设计开发相应的模型系统和软件。在此基础上,对辽河流域的浑太河、松花江流域的三岔河至哈尔滨进行水资源全要素优化配置示范研究。

(2) 宏观和微观协调。水资源全要素优化配置侧重于研究宏观战略问题,但以微观问题为基础,在实践中常采用“自上而下”和“自下而上”相结合的方法。“自上而下”是从宏观上把握全局,对各层次的水资源问题要有基本的判断,从上至下指导水资源配置。“自下而上”是在前一种方法的基础上,从底层开始,不断验证和调整水资源的配置。

(3) 定性和定量结合。水资源全要素优化配置涉及到大量的决策问题,会遇到许多结构化、半结构化和非结构化的决策问题。结构化决策问题可以定量描述,非结构化决策问题只能定性描述,半结构化决策问题介于两者之间,因此,必须采用定性和定量相结合的方法。

(4) 多学科交叉研究。流域或区域水资源全要素优化配置是从水量、水质、水生态、水环境等方面研究水资源的调配,涉及到国家与地方等多个决策层次,部门与地区等多个决策主体,近期与远期等多个决策时段,社会、经济、生态、环境等多个决策目标,以及水文、生态、工程、环境、市场、资金等多类风险,因此,必须从社会、经济、生态、环境等多个层面进行多学科交叉和综合研究。

## 1.3 水资源全要素优化配置的主要研究内容

### 1.3.1 主要研究内容

#### 1. 初步建立流域/区域水资源全要素优化配置的理论框架

以水量与水质联合配置为主线,提出和完善水资源全要素优化配置的定义、配置原则、决策机制、调控指标、“三次平衡”思想、水资源可持续利用评价量化方法、多目标决策分析与优化模拟方法以及水资源全要素优化配置方案评价方法等,构成了水资源全要素优化配置理论的初步框架。

#### 2. 构建和设计流域/区域水资源全要素优化配置模型系统

模型系统由水资源优化配置模型、基于水资源优化配置水质模拟模型、地下水数值模拟模型以及水资源全要素优化配置方案评价模型组成。主要内容包括:①水资源全要素优化配置模型系统总体设计,包括构建思路、基本结构、组成及特点;②水资源全要素配置系统概化,包括水资源全要素优化配置分区划分原则、方法和理论基础,系统网络图的构成与绘制;③水资源优化配置模型设计,包括模型构建原理、主要约束方程和目标函数、

社会经济耗水和生态耗水估算、模型参数识别方法等；④地下水数值模拟模型，包括模型原理、参数率定方法等；⑤基于水资源优化配置水质模拟模型设计，包括模型构建的原理、组成、计算框架、水质模拟计算方法、污染物负荷总量控制准则、分配框架与方法、水功能区水质达标评价方法、模型参数识别方法等；⑥水资源全要素优化配置方案评价模型，包括方案评价流程、评价指标体系建立、指标权重分析方法、评价过程等。

### 3. 开发流域/区域水资源全要素优化配置模型计算机软件

自主研发水资源优化配置模型和基于水资源优化配置水质模拟模型，地下水数值模拟模型采用美国 Brigham Young 大学的环境模型研究实验室和美国陆军工程师兵团排水工程试验工作站开发的三维地下水流数值模拟系统 GMS 软件。

### 4. 水资源全要素优化配置示范研究

以辽河流域的浑太河，松花江流域的水资源三级区三岔河至哈尔滨作为示范区，利用构建的水资源全要素优化配置模型系统进行示范研究。

#### 1.3.2 技术路线

水资源全要素优化配置总体思路：在维持水资源再生机制和可持续利用的前提下，充分研究水资源的水量、水质、水生态、水环境等特性，通过保持社会经济与生态环境合适的用水比例，合理抑制需求、保障有效供给、控制取耗水总量与污染物总量、提高用水效率，对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行水量、水质的公平和高效配置，为社会经济高速发展和生态环境健康奠定良好的基础。水资源全要素优化配置模型系统试图提供一套实用工具，将水资源配置从传统的水量分配向维持人与自然和谐、考虑水资源的质和量、可持续利用有限的水资源等方面发展。

水资源全要素优化配置涉及水文水资源、水力发电工程、水文地质、生态与环境、农田水利、社会经济、计算机技术与信息科学等，以长系列实测资料、试验、调查统计和规划等成果为依托，对水量、水质、水生态、水环境等水资源要素在区域间和各用水部门间进行全方位的调配，其成果是水资源可持续利用、公平和高效配置的主要手段，也是实现总量控制和初始水权分配的科学基础。水资源全要素优化配置技术需要研究配置分区的划分原则、方法，绘制水资源配置系统网络图，深化发展现有水资源大系统分析技术、社会经济需水和生态环境需水预测技术、水资源供需平衡技术、多水源联合调配技术、多目标决策分析技术和通用化优化配置模型的构建技术等，其技术路线见图 1-1。

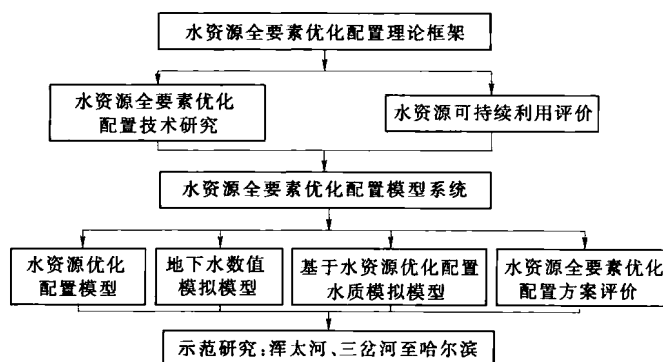


图 1-1 水资源全要素优化配置技术路线

## 第2章 水资源全要素优化配置理论基础

### 2.1 水资源配置研究进展

#### 2.1.1 水资源配置研究现状

清洁的水源和高供水保证率是现代社会健康发展的基础，随着社会经济高速发展，对水资源质和量的要求不断提高。我国水资源禀赋条件并不优越，淡水资源总量仅占全球水资源的6%，人均水资源占有量不足 $2400\text{m}^3/\text{s}$ ，仅为世界平均水平的1/4，被联合国列为世界少数几个贫水国之一。现实可利用的淡水资源量更少，人均可供应量不足 $1000\text{m}^3/\text{s}$ ，分布极不均匀，大量淡水资源集中在南方，北方淡水资源只有南方水资源的1/4。我国正处于经济高速发展期，人口剧增、城镇化、工业化等是当前社会经济发展的主要模式，水资源短缺、水污染严重、生态与环境恶化等问题已经成为经济发展的主要制约因素。如何协调流域或区域生活、生产和生态环境用水之间日趋尖锐的矛盾，合理配置有限的水资源十分迫切。

水资源配置必须以流域水循环过程为载体。天然状态下流域的水分在太阳辐射、势能和其他能量的作用下，通过“大气降水—天然蒸发—地下入渗—坡面汇流—河川径流”过程不断循环往复。然而，随着人类活动对流域水循环过程的影响日益加剧，基于现代变化环境下的流域“天然—人工”二元水循环模式应运而生。流域二元水循环模式由中国水利水电科学研究院王浩院士提出，它强调了流域水循环过程的“天然—人工”二元特性，包括以下3个方面：一是在流域水循环驱动力上，提出由过去的一元自然驱动演化为现在的“天然—人工”二元驱动；二是在流域水循环结构上，提出由过去的天然水循环过程演化为现在的“大气降水—天然蒸发—地下入渗—坡面汇流—河川径流”自然循环和“供水—用水—耗水—排水”人工侧支循环相耦合的二元水循环过程；三是在流域水循环参数上，提出由过去的单一取决于下垫面条件的自然参数演化为同时取决于自然参数和水资源开发利用的社会经济参数的二元模式参数。

流域二元水循环模式是针对现代人类用水矛盾日益突出的变化环境下，对传统的一元静态水循环模式的重大改进，同时，也推动了基于流域水循环的水资源相关研究模式的变革。基于传统一元静态水循环模式的水资源研究是在得到水文实测资料后，通过消除人类活动对流域水循环的影响，使得流域水资源“还原”到天然状态后进行的研究。这种研究模式，在人类活动影响程度较小的情况下或水资源演变不甚明显的流域，能够满足实际需要。而基于“二元”动态水循环模式的水资源研究，是在得到水文实测资料后，将自然驱动项与人工驱动项进行分离，但同时保持两者间的动态耦合关系，进而对两类分项进行研究。这种研究模式是面向现代变化环境下，对人类活动强烈干扰下的流域所采用的研究模式。

从 20 世纪 80 年代以来,我国对流域/区域水资源配置进行了深入探索研究和实践,取得了丰硕的科研成果。随着对水资源系统认识的深入,流域/区域水资源配置的思路 and 理论也逐步完善,大致经历了以下 3 个阶段。

### 1. 基于宏观经济的水资源优化配置

20 世纪 90 年代,随着计算机技术的发展和系统理论的深入应用,中国水利水电科学研究院在总结以往工作经验的基础上,将宏观经济、系统方法与区域水资源规划实践相结合,在“八五”国家科技攻关项目中提出了基于宏观经济的水资源优化配置理论。

基于宏观经济的水资源优化配置将水资源配置纳入到宏观经济系统中,从宏观经济结构与发展机制入手,通过分析投入产出关系、积累消费关系、调入调出关系以及宏观经济发展与水资源配置间的相互制约关系,实现区域经济和资源利用的协调发展。

基于宏观经济的水资源优化配置认为,水资源系统和宏观经济系统之间具有内在的、相互依存和相互制约的关系。一方面,区域宏观经济系统的发展不仅受其内部因素的制约,同时也受到外部自然资源和环境生态条件的制约。当区域经济快速发展时,必然要求供水量快速增长;而当水资源的供给紧缺时,也会限制经济的增长并促使经济结构作适应性调整。另一方面,水资源系统的发展也会受到宏观经济系统发展的影响,区域经济发展的速度、结构等势必影响水资源的需求,同时,水资源开发利用的资金投入也会影响水资源的供给、节水水平以及污水处理回用水平等。基于宏观经济的水资源优化配置将宏观经济系统和水资源系统作为一个系统来统一考虑,揭示出这两个系统间存在相互依存、相互制约关系,对我国的水资源优化配置具有深远影响。

### 2. 面向生态的水资源优化配置

基于宏观经济的水资源优化配置虽然考虑了宏观经济系统和水资源系统之间的相互依存、相互制约关系,但却没有考虑生态环境的保护,忽视了社会经济系统、水资源系统与生态环境系统三者之间的相互作用关系。作为对基于宏观经济的水资源优化配置的延伸与拓展,在“九五”国家科技攻关项目中,中国水利水电科学研究院提出了面向生态的水资源优化配置理论。

面向生态的水资源优化配置将社会经济系统、水资源系统和生态系统三者作为相互联系的整体统一考虑,并将水资源的优化配置纳入其中,对基于宏观经济的水资源优化配置进行了一系列拓展。在水资源配置范畴上,以“天然—人工”二元水循环模式为基础,将单纯考虑人工侧支水循环系统,拓展为同时考虑流域天然水循环与流域人工侧支水循环系统及两者之间的相互作用关系;在决策服务对象上,将单纯考虑社会经济系统,拓展为同时考虑社会经济和生态环境系统;在决策目标上,将单纯经济效益最大,拓展为经济效益与生态效益之和最大;在决策机制上,将单纯考虑经济机制,拓展为同时考虑经济机制、水资源演变机制、水与生态系统相互作用机制等;在优化配置涉及的生态系统方面,既包括城镇生态,还包括需人工补水的湖泊、湿地等生态系统和其他天然生态系统。

### 3. 水量与水质联合配置

以上所述的水资源优化配置都是针对水量进行分配,而忽视了水资源的另一属性——水质,在水资源配置中较少考虑不同用水户对水质的不同要求以及人工侧支循环中社会经济用水对水质的影响。随着我国水污染问题的日趋严重,水量与水质的联合配置已成为国

内近年来的研究热点,并受到水利相关专家和学者的广泛关注。

通过分析国内近年来的研究成果,水量与水质联合配置在研究方法上大体有以下3种:

(1) 以水量优化配置为主,把水质要素作为影响因子加入到水量配置中,从而实现对不同用水户进行分质供水的要求。

(2) 通过水环境容量的价值量化后,将其作为水环境价值纳入到水量优化配置目标中,利用多目标优化方法实现对区域用水户进行水量优化配置的同时,完成对其水环境容量的配置,从而达到对用水户污染物排放和水质目标的控制。

(3) 基于“天然—人工”二元水循环模式,将水质因子纳入区域水量优化配置中,将人工侧支循环中污染物的产生、运移、削减纳入水质微观模拟中,并建立两者之间的动态耦合关系,同时结合水功能区的水质目标,通过“优化—模拟—反馈—评价—控制”等过程实现区域内用水户的分质供水、水环境容量分配、入河污染源的控制和治理。该研究框架由中国水利水电科学研究院提出,为当前水量与水质联合配置提供了研究思路和方法。

### 2.1.2 水质模拟及污染物总量控制研究现状

水质模拟是水量与水质联合配置中的重要环节,国内外学者对此作了诸多研究,取得了一系列成果。纵观这些研究成果,其研究方法基本上都是从污染物在水中的迁移、扩散和转化的机理出发,遵循质量守恒的基本原理,通过一定的概化和假设建立物理方程,最后利用计算机进行数值求解来实现。只是依据的水体、污染物类型、模拟尺度以及相关概化与假设的侧重点不同,水质模拟的方法有所区别。例如:根据污染物所在水体的不同,水质模拟主要有河流水质模拟、河口水质模拟、湖泊/水库水质模拟等;根据污染源类型不同,可分为点源水质模拟和非点源水质模拟;根据尺度不同,可分为一维水质模拟、二维水质模拟和三维水质模拟等。

目前,在国内外应用比较广泛的水质模拟模型主要有:WASP、QUAL、BASINS、MIKE等。其中,WASP和QUAL模型的应用最广,发展最为完善。WASP模型由美国环保局开发,目前的最新版本是WASP6,可用来模拟河流、湖泊、水库、河口等多种水体的一维、二维和三维稳态和非稳态的水质问题。QUAL模型同样由美国环保局开发,是一个适用于枝状河流的一维综合河流水质模型,能比较全面地模拟多种污染物在水环境中的迁移转化、自净规律和水环境容量、污染负荷的再分配。QUAL模型经多次修订和增强,相继推出了QUAL2E模型和QUAL2K模型,适用于大型河流系统的水质模拟,在我国得到了较广泛的应用。

水质达到水功能区的要求是水量与水质联合配置的任务之一,势必需要对排入水体的污染物进行控制。我国对水体污染物的控制始于浓度控制,然而,随着排入水体污染物浓度的攀升,对单一排污口污染物浓度控制难以达到水功能区的水质目标。因此,为克服水体污染物浓度控制的弊端,提出了污染物总量控制方法。

我国污染物总量控制研究始于20世纪80年代末,主要围绕污染物总量控制的管理方法和理论方法进行。1988年3月,国家环保局颁布了《水污染排放许可证管理暂行办法》,标志着我国进入总量控制、强化水环境管理的新阶段,随后国家又相继出台了污染物总量控制的实施细则、污染物排放总量的监测技术规范等,各地区、流域以及相关行业

针对自身特点制定了相应的管理和实施办法。在理论方法上,国内学者开展了以水环境容量为基础的污染物总量控制指标定量研究,针对流域特点的污染物总量排放的控制因子研究,污染物产生和排放的预测方法研究,污染物排放总量的优化分配研究以及污染物削减和治理技术方面的相关研究等,并取得了一定的研究成果。

### 2.1.3 水资源配置发展趋势

水资源全要素优化配置问题是目前研究的一个新热点,也是未来水资源配置研究的一个发展趋势。水资源全要素优化配置是指在水资源开发利用中要合理解决河道外生产、生活、生态用水与河道内生态环境用水、水力发电、航运等用水需求之间的矛盾,需要对水量、水质、水生态、水环境等水资源要素进行全方位的配置。其研究内容涉及基于“二元”水循环模式的水资源系统诊断技术、面向循环经济的社会发展模式与节水防污关键技术、生态环境保护准则与需耗水量计算方法、水资源全要素优化配置理论技术体系、初始水权分配理论技术体系、水资源实时监控管理系统研究等。

随着水资源问题的日益突出,水资源配置研究在理论与方法上逐步得到完善,未来仍需针对水资源的各种要素在以下方面做进一步研究。

(1) 从资源有效性出发,拓宽水资源配置对象,将人工系统和生态系统的有效水分纳入到水资源配置中,从广义水资源的角度进行优化配置。

(2) 以“天然—人工”二元水循环机理的模拟为基础,对区域水循环和影响水循环的自然与社会因素进行多维整体调控。

(3) 采用有效的综合评判方法,对水资源优化配置方案进行社会后效性、生态环境后效性、经济后效性、效率后效性等综合性评价,并以此作为配置方案的调整依据。

(4) 以水资源调度作为水资源优化配置的实现手段,探索水资源优化配置与水资源调度的耦合方法,实现水资源宏观规划与微观实践的统一。

## 2.2 水资源全要素优化配置基础

### 2.2.1 水资源全要素优化配置的内涵及概念

#### 1. 水资源全要素优化配置的内涵

要素的词义是指具有共同特性和关系的一组现象,是构成事物的必要因素。水是一种具有自然、社会、商品等属性的特殊资源,是最活跃的环境因子,是自然与人类社会健康发展必不可少的资源。水资源全要素是指构成水资源所有因素的集合,对于水资源配置问题,主要包括水量、水质、水生态、水环境等因素。

传统的水资源配置以水量调配为主,在城镇化比较低、工业化程度不高、城市用水水平较低的情况下,河流自净能力基本上能保证水体清洁,可以满足社会经济和生态环境对水量和水质的要求。近30年以来,随着我国社会经济高速发展和人口剧增,城镇用水和农业灌溉用水大幅增加,河道水量锐减,未经处理的城镇废污水大量直排进入水体,水污染日益严重,资源型缺水 and 水质型缺水凸显,可利用的水资源量有减少的趋势,导致社会经济与生态环境的用水矛盾日益激化。大量的事实和研究结果表明,社会经济挤占过多的生态环境用水是导致水危机和生态环境恶化的主要原因之一,水污染又使可利用的水资源

量减少,进一步加剧了水危机和生态环境恶化的程度。面对当前水资源开发利用现状、存在的主要问题,以及水资源与社会经济发展、水生态、水环境等越来越紧密的联系,水资源配置在理论和方法上应综合考虑水资源的各种因素,在水资源可持续利用的前提下,控制取用水总量,限制排污量,提高用水效率,综合利用水资源,从水量和水质等方面调配有限的水资源具有重要的现实意义。

上述分析表明,水资源全要素优化配置的内涵主要包括3层含义:

(1) 协调好社会经济和生态环境两者的用水关系。从流域/区域整体控制社会经济与生态环境合适的用水比例,维持水资源可持续利用。

(2) 控制用水总量和排污总量,提高用水效率。在水资源开发利用时,国民经济取水实行严格的总量控制;根据水功能区的水质目标和纳污能力要求,对入河污染物实行严格的总量控制;大力发展节水型社会,加强居民的节水意识,严格控制工业用水定额,适度发展农业高效节水灌溉面积,提高水资源的利用效率。

(3) 水资源综合利用。在保障供水的前提下兼顾水资源的综合利用,如发电、航运等。

## 2. 水资源全要素优化配置概念

“配置”在汉语词典里解释为“配备、布置”。随着社会经济的不断发展,人类对水的依存性越来越大,水资源优化配置的概念逐步明确,其内涵日益丰富,至今仍在发展之中。

国际水资源协会(IWRA)主席 B. Braga 认为:水资源配置是将有限的水资源在多种相互竞争的用户中进行复杂分配,各项目标的基本冲突表现在经济效益与生态环境效益上的冲突。

中国水利水电科学研究院对水资源合理配置的定义为:在流域或特定的区域范围内,遵循高效、公平和可持续的原则,通过各种工程与非工程措施,考虑市场经济的规律和资源配置准则,通过合理抑制需求、有效增加供水、积极保护生态环境等手段和措施,对多种可利用的水源在区域间和各用水部门间进行的调配。

《全国水资源综合规划大纲》对水资源合理配置的定义为: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,对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行的配置。

根据上述概念,水资源全要素优化配置的定义为:在流域或特定的区域范围内,遵循可持续、公平和高效的原则,利用各种工程与非工程措施,按照自然规律和市场经济规律,协调好社会经济与生态环境用水的大体比例,通过合理抑制需求、控制取耗水总量与污染物总量、提高用水效率、维护和改善生态环境质量等手段和措施,对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行全方位的配置。

### 2.2.2 水资源全要素优化配置原则

流域/区域水资源全要素优化配置是在协调社会经济与生态环境合适的用水比例基础上,从水量和水质等方面调配有限的水资源,并与当前的水资源管理紧密结合。水资源全要素优化配置应遵循以下基本原则。

(1) 水资源可持续利用原则。水资源可持续利用是流域/区域社会经济和生态环境健康发展的基本保证,也是水资源全要素优化配置必须遵循的首要原则。在当前水资源短缺、生态环境恶化、水污染严重的情况下,处理好流域社会经济与生态环境的用水竞争关系,保持生态环境合适的用水比例,是保护水资源再生机制、可持续利用水资源的关键。

(2) 公平性原则。注重流域之间、地区之间、近期和远期之间、不同用水目标之间、不同用水人群之间等对水资源的公平分配。各流域、地区之间要统筹全局,均衡配置当地水和过境水,不应以损害其他地区的发展为代价;近远期之间均衡配置水资源,既满足近期的用水需求,又不损害远期的发展能力;用水目标上,应优先保证必要的生活和最小生态用水,在此基础上兼顾经济用水和一般生态用水,同时在保障供水的前提下兼顾水资源的综合利用;不同人群对水资源拥有同等享有权,要注意提高农村饮水的保障程度。

(3) 高效性原则。高效性包括提高用水效率和效益两个方面。水资源配置要通过各种措施提高生活、生产和生态环境过程水量的有效利用程度,减少水资源转化过程和用水过程中的无效蒸发,提高有效水资源的比例。增加单位供水量对农作物、工业产值和 GDP 的产出。加强节水型社会建设,通过制定节水防污型定额标准,实施用水定额管理。

(4) 总量控制原则。总量控制包括取耗水总量和排污总量控制。根据水资源禀赋条件的差异,水资源开发利用程度要与水资源承载能力相协调,对社会经济用水实行严格的总量控制。通过调整产业结构和布局,减少高耗水、重污染行业的发展规模,采用新工艺降低废污水排放率,提高废污水收集率和处理率,根据水功能区的水质目标和纳污能力要求,保持河流一定的环境流量,对入河污染物实行严格的总量控制。

(5) 系统性原则。从流域或区域层面对水资源量和污染物负荷统一分配。在协调好社会经济用水和生态环境用水矛盾的基础上,对地表水和地下水、干流和支流、当地水和过境水及外调水、原生性和再用性水资源、降水性和径流性水资源、水资源量和污染物负荷统一分配。

### 2.2.3 水资源全要素优化配置决策机制

水资源具有自然、社会、经济、生态、环境等属性,这些属性之间既矛盾又相互竞争,水资源的质和量是决定社会经济与生态环境可持续发展的关键。水资源全要素优化配置从水量、水质、水生态、水环境等方面研究水资源的调配,涉及国家与地方等多个决策层次,部门与地区等多个决策主体,近期与远期等多个决策时段,社会、经济、生态、环境等多个决策目标,水文、生态、工程、环境、市场、资金等多类风险,是一个高度复杂的多阶段、多层次、多目标、多决策主体的风险决策问题。因此,水资源全要素优化配置的本质是按照自然规律和经济规律,对流域水循环及其影响水循环的自然、社会、经济、生态和环境诸因素进行整体多维调控,并遵循水平衡机制、生态机制、社会机制、经济机制、环境机制进行的水资源配置决策。

#### 1. 水平衡决策机制

具有天然主循环和人工侧支循环二元结构的流域水资源演化不仅构成了社会经济发展的资源基础,是生态环境的控制因素,同时也是诸多水问题的共同症结所在。因此,水资源可持续利用是确保社会经济和生态环境可持续发展的前提,水资源全要素优化配置首先要遵循水平衡机制。水资源全要素优化配置中水平衡需从 3 个层次加以分析和考虑。第 1



层次从流域总来水量（包括降水量和从流域外流入本流域的水量）、蒸腾蒸发量（即净耗水量）、排水量（即排到流域之外的水量）之间的平衡关系进行分析，分析在水资源二元演化模式下，不影响和破坏流域生态系统，不导致生态环境恶化情况下流域允许的总耗水量，包括社会经济耗水量与生态用水量，评价尺度通常为二级以上流域。第2层次从流域或区域径流性产水量、耗水量和排水量之间的平衡关系进行分析，分析在人工侧支循环条件下径流性水资源对社会经济耗水和人工生态耗水的贡献，界定允许径流性耗水量、社会经济用水和生态用水大致比例，评价尺度通常为三级、四级以上流域。第3层次从流域、区域、计算单元的供水量与需水量，用水量、耗水量和排水量之间的平衡关系，水功能区的水质目标、纳污能力与允许的人河污染物负荷总量之间的关系进行分析，采用运筹学方法与专家经验规则方法相互校验的配置技术，分析计算地表水、地下水、外调水等各种水源对社会经济各行业、各用水部门等不同用户之间、不同时段的分质分级供水与需水平衡，以及满足水功能区水质目标的点源和非点源污染物削减和总量分配。

## 2. 生态决策机制

生态决策机制的核心是可持续利用有限的水资源。为保持水资源系统的可再生维持功能，在社会经济发展与生态环境保护之间确定合理的平衡点十分重要。水资源全要素优化配置生态合理性的判定标准有两条：一是整体生态状况应当不低于现状水平，在此基础上考虑人工生态效益的增加和天然生态系统可能带来的损害；二是必须满足生态保护准则中关于天然生态保护的最低要求，以维护生态系统圈层结构的稳定。因此，必须将水资源开发利用、社会经济发展、生态环境保护放在流域/区域水资源演变和生态环境变化的统一背景下进行考虑，以流域/区域为基础，以经济建设和生态安全为出发点，根据水分条件与生态系统结构的变化机理，在竞争性用水的条件下，通过利益比较和权衡，确定合适的社会经济与生态环境用水比例，使生态系统保持相对稳定和功能的协调，经济建设受到的影响相对较小。

## 3. 社会决策机制

社会决策机制体现水量分配和水污染治理的公平性，包括代际公平、城乡协调机制、地区之间的公平、用水目标之间的公平。具体表现为：

（1）代际公平。经济、生态用水格局要基本稳定，并适当提高生态和环境用水规模。人口增长、城市化、工业化等，经济用水的增长态势与保持稳定的经济生态用水格局有很大的矛盾，只能一部分生态改善，一部分生态维持现状；水污染日益严重与保持稳定的河流生态环境功能有很大的矛盾，一方面要提高污水处理率、限制入河污染物总量，另一方面要保持河道一定的环境流量。

（2）城乡协调机制。农田灌溉面积基本保持现状，并稍有下降，满足城乡用水协调，建设节水型社会；城镇废污水排放是河流主要污染源，废污水应达标排放，满足城乡用水对水质的要求，达到水功能区的水质目标。

（3）地区之间的公平。地区人均用水量不要差异太大，期望值为相等；谁污染谁治理，建立河流污染补偿制度。

（4）用水目标之间的公平。供水服从防洪，发电、灌溉服从于城市供水，特殊情况时，发电、航运服从灌溉。