



- 高等学校水利类专业教学指导委员会
- 中国水利教育协会
- 中国水利水电出版社

共同组织编审

普通高等教育“十二五”规划教材
全国水利行业规划教材

水资源优化配置 与调度

主 编 邱 林 王文川



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



● 高等学校水利类专业教学指导委员会

● 中国水利教育协会

共同组织编审

● 中国水利水电出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

全国水利行业规划教材

水资源优化配置 与调度

主 编 邱 林 王文川

副主编 吕素冰 魏明华 徐冬梅



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材较全面地反映了当今水资源优化配置与调度的新进展，全书除绪论外共分 6 章，主要包括：水资源优化配置与调度的理论与技术、水资源优化配置与调度的量化分析、水资源优化配置模型、水资源优化配置的智能算法、基于模糊模式识别理论的水资源优化配置模型、基于可变模糊集理论的水资源优化调度模型。

本教材适用于高等学校水文与水资源工程专业，也适用于水利水电工程、工程管理、农业水利工程、城市水务工程等专业，并可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

水资源优化配置与调度 / 邱林, 王文川主编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2015.6

普通高等教育“十二五”规划教材 全国水利行业规划教材

ISBN 978-7-5170-3289-2

I. ①水… II. ①邱… ②王… III. ①水资源管理—高等学校—教材 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第138736号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 全国水利行业规划教材 水资源优化配置与调度
作 者	邱林 王文川 主编
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 (发行部)
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
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 11.25 印张 267 千字
版 次	2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	25.00 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

水资源是人类生存和经济社会发展的物质基础，是不可替代的重要自然资源。随着社会经济的快速发展，水资源紧缺已经成为 21 世纪我国社会经济发展的重要制约因素，通过水资源的优化配置，提高水资源的利用效益，实现水资源可持续利用是我国水利工作的首要任务。

我国水资源南北差异显著，地区不均衡现象普遍存在。在过去的几十年，我国的经济快速发展，用水总体增长迅速，这使水务管理问题突出、用水竞争加剧，极大地限制了我国国民经济健康稳定的发展，同时不利于社会的和谐稳定。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其影响的自然与社会诸因素进行整体调控。水资源配置也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，水资源优化配置研究日益受到重视。

华北水利水电大学水文水资源教研室相关任课教师结合多年的课堂教学经验和工作实践，组织编写了《水资源优化配置与调度》这本教材。水资源优化配置与调度是水文与水资源工程专业的一门重要的基础课，主要包括：绪论、水资源优化配置与调度的理论与技术、水资源优化配置与调度的量化分析、水资源优化配置模型、水资源优化配置的智能算法、基于模糊模式识别理论的水资源优化配置模型、基于可变模糊集合理论的水资源优化调度模型等。本教材适合作为高等院校水利水电工程、农业水利工程、工程管理、水文学及水资源等专业的教学参考书，也可供水利水电工程技术人员参阅。

本教材由邱林、王文川担任主编，吕素冰、魏明华、徐冬梅担任副主编。其中，第 1 章由邱林教授编写、第 2~4 章由吕素冰、魏明华博士编写、第 5~7 章由王文川、徐冬梅副教授编写。全书由邱林、王文川统稿。

编者

2014 年 11 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水资源概况及供需分析	1
1.1.1 世界水资源概况	1
1.1.2 世界水资源供需分析	3
1.2 我国水资源及存在的问题	3
1.2.1 我国水资源的特点	3
1.2.2 我国面临的水资源问题	6
1.2.3 我国水问题的根源	7
1.2.4 水资源问题危及社会发展	7
1.3 水资源优化配置与调度与水源的可持续利用	8
1.3.1 水资源可持续利用理论	8
1.3.2 水资源优化配置与可持续利用	15
1.4 水资源优化配置概念与内涵	16
1.4.1 水资源优化配置的概念	16
1.4.2 水资源优化配置的内涵	17
1.5 水资源优化配置类型	19
1.6 水资源优化配置发展趋势	20
1.6.1 基于可持续发展的水资源配置理论	21
1.6.2 生态环境需水计算理论研究	21
1.6.3 水质水量联合优化配置	22
1.6.4 从单一目标趋向于多目标	22
1.6.5 模型功能向多功能方向发展	23
1.6.6 考虑不确定因素的方案选择	24
1.6.7 大系统多目标分析技术	25
1.6.8 水资源配置决策支持系统	25
1.6.9 其他方面	26
第 2 章 水资源优化配置与调度的理论与技术	27
2.1 水资源优化配置理论	27

2.1.1	基于“供、需”单方面限制的优化配置理论	27
2.1.2	基于经济最优、效率最高的优化配置理论	27
2.1.3	基于资源、社会经济、生态环境统筹考虑的协调优化配置理论	28
2.1.4	“三生水”配置理论	28
2.1.5	水资源优化配置理论评述	31
2.2	水资源优化配置基本原则	32
2.3	水资源优化配置手段	33
2.4	水资源优化配置模型构建概述	33
第3章	水资源优化配置与调度的量化分析	37
3.1	水资源总量分析	37
3.1.1	水资源评价概述	37
3.1.2	地表水资源量计算	38
3.1.3	地下水资源量计算	51
3.1.4	区域水资源总量计算	58
3.2	水资源开发利用现状分析	60
3.2.1	世界水资源的开发利用状况	60
3.2.2	中国水资源的开发利用状况	61
3.3	水资源需求预测	63
3.4	生活需水	66
3.4.1	生活需水的分类	66
3.4.2	生活需水预测	66
3.5	工业需水	68
3.5.1	工业需水分类	68
3.5.2	工业需水调查计算	69
3.5.3	工业需水预测	70
3.6	农业需水	78
3.6.1	农田灌溉需水	78
3.6.2	农业其他需水	84
3.7	生态需水	85
3.7.1	基本概念与内涵	86
3.7.2	河流生态需水计算方法	87
3.7.3	河道最小生态流量研究计算	91
3.7.4	河口生态环境需水量计算	94
3.7.5	湖泊生态环境需水量	96
3.7.6	湿地生态环境需水量	97
3.7.7	城市生态环境需水量	100
3.7.8	林地生态环境需水量	102

3.8 综合需水分析与计算	104
第4章 水资源优化配置模型	107
4.1 水资源优化配置理论	107
4.1.1 水资源优化配置建模方法	107
4.1.2 水资源优化配置系统模型	108
4.2 线性规划模型	109
4.2.1 线性规划数学模型	109
4.2.2 水库用水配置模型	111
4.3 非线性规划模型	112
4.3.1 非线性规划类型与特点	112
4.3.2 灌溉水量优化配置模型	113
4.4 动态规划模型	114
4.4.1 动态规划模型与求解	115
4.4.2 水资源优化配置动态规划模型	116
4.4.3 水库优化调度动态规划模型	119
4.5 多目标规划模型	120
4.5.1 水资源配置的多目标规划	120
4.5.2 多目标规划数学模型	120
4.5.3 供水系统水量配置多目标规划	121
4.5.4 地下水资源管理多目标规划	123
4.6 系统模拟模型	124
4.6.1 模拟技术与优化技术的比较	124
4.6.2 系统模拟的一般步骤	125
4.6.3 水资源系统模拟模型	125
4.6.4 跨流域调水工程水量调度模拟	130
第5章 水资源优化配置的智能算法	134
5.1 水资源配置与优化算法	134
5.2 传统优化算法	135
5.3 智能优化算法	136
5.4 人工神经网络	137
5.4.1 人工神经网络定义	137
5.4.2 人工神经网络特点	137
5.4.3 BP神经网络	138
5.4.4 基本BP算法原理	139
5.4.5 BP算法的缺陷	141
5.5 进化算法	141
5.6 遗传算法	144

5.6.1	概述	144
5.6.2	遗传算法的基本结构	146
5.6.3	遗传算法的操作步骤	146
5.7	免疫进化算法	149
5.7.1	生物免疫系统	149
5.7.2	免疫进化算法设计思想	150
5.7.3	免疫进化算法一般表述	151
5.7.4	免疫进化算法实现技术	152
第6章	基于模糊模式识别理论的水资源优化配置模型	154
6.1	模糊模式识别理论	154
6.1.1	模糊模式识别模型	154
6.1.2	指标的相对优属度	155
6.1.3	指标的权重	156
6.2	多目标模糊优选动态规划理论	157
6.3	多目标模糊优选动态规划在水资源优化配置中的应用	160
6.3.1	半结构性多目标有约束水资源优化配置问题	160
6.3.2	定量与定性目标相对优属度的确定	160
6.3.3	确定水资源配置各供水量方案的平均相对优属度	161
6.3.4	确定水资源配置各供水量方案的平均相对优属度	162
第7章	基于可变模糊集合理论的水资源优化调度模型	164
7.1	对立模糊集概念与定义	164
7.2	可变模糊集合概念	165
7.3	相对差异函数模型	166
7.4	可变模糊识别模型	167
参考文献		169

第 1 章 绪 论

水是人类赖以生存和社会发展不可缺少的物质基础，而水资源开发利用关系全球发展。随着人类社会经济的快速发展和世界人口不断地增长，人类正在以空前的速度和规模开发利用极其有限的水资源，水资源问题已从一些缺水国家和地区发展为全球性问题。2001 年 5 月美国《时代》周刊刊登题为“世界出现干旱危机”的文章，认为淡水短缺已经成为 21 世纪人类继全球变暖之后所面临的第二大问题。随着社会的不断发展，一方面水资源的开发利用水平逐步提高，水资源的需求量不断增加，供需矛盾日益突出；另一方面，由于人类对水资源的合理开发利用和保护重视不够，出现了水资源利用效率低、浪费严重、水资源过度开发利用、生态环境遭到严重破坏等现象，造成了全球变暖、土地荒漠化乃至沙化、干旱和洪涝灾害频繁发生等负面影响。20 世纪 90 年代以来黄河频繁断流、北方地区沙尘暴、江河湖海水污染以及 1998 年长江和嫩江特大洪水等受到全世界的关注，人们越来越清楚地认识到在社会经济水平和科技水平高度发展的今天，在众多自然资源中，水资源将是制约社会发展和人类进步的主要因素之一，水资源正日益影响全球的环境与发展，甚至可能导致国家间的冲突。人类必须充分、合理地利用有限的水资源以满足社会发展和经济增长对水资源的需要，实现水资源的开发利用与社会经济、生态环境的协调发展，最终促进水资源的可持续利用，保证社会经济可持续发展。因此，探讨 21 世纪水资源的相关科学问题，是全球共同关注的重要议题之一。

水资源作为一种基础性自然资源，是生态环境的控制性因素之一。同时，水资源又是战略性经济资源，是一个国家综合国力的有机组成部分。因此，水资源开发利用研究必然涉及到社会科学和自然科学等众多交叉科学，必须突破传统的理论框架、引进先进的研究方法和技术手段、建立合理的水资源优化配置理论和综合评价模型，以便为水资源的可持续利用提供理论基础和决策依据^[1]。

1.1 水资源概况及供需分析

1.1.1 世界水资源概况

水是由氢氧两种元素组成的化合物，它是如何形成的，目前学术界存在着较大的争议，尚未定论。水是地球极其丰富的自然资源，也是生物生存不可替代的环境资源，它成为现代社会可持续发展的关键因素之一，这种观点逐渐被理论界和决策层所接受。水以固态、液态和气态三种基本形态存在于自然界之中，分布极其广泛。

所谓的水圈是由地球地壳表层、表面和围绕地球的大气层中固态、液态和气态的水组成的圈层，它是地球“四圈”（岩石圈、水圈、大气圈和生物圈）中最活跃的圈层。在水

圈内，大部分水以液态形式存在，如海洋、地下水、地表水（湖泊、河流）和一切动植物体内存在的生物水等，少部分以水汽形式存在于大气中形成大气水，还有一部分以冰雪等固态形式存在于地球的南北极和陆地的高山上。地球上的水量是极其丰富的，其总储水量约为 13.86 亿 km^3 ，但我们必须注意到，水圈内水量的分布是十分不均匀的，大部分水储存在低洼的海洋中，占 96.54%，而且其中的 97.47%（分布于海洋、地下水和湖泊水中）为咸水，淡水仅占总水量的 2.53%，且主要分布在冰川与永久积雪（占 68.70%）和地下水（占 30.36%）中。如果考虑现有的经济、技术能力，扣除无法取用的冰川和高山顶上的冰雪储量，理论上可以开发利用的淡水不到地球总水量的 1%。实际上，人类可以利用的淡水量远低于此理论值，主要是因为总降水量中，有些是落在无人居住的地区如南极洲，或者降水集中于很短的时间内，由于缺乏有效的水利工程措施，很快地流入海洋之中。由此可见，尽管地球上的水是取之不尽的，但适合饮用的淡水水源则是十分有限的。

水圈中的水并不是静止不变的，而是处于不断的运动之中，存在着明显的水文循环现象，水文循环可以分为大循环和小循环两种基本形式。水文大循环就是水在陆地、海洋、大气中的相互转化，如海洋中的水，经过蒸发转化为大气水，大气水在一定条件下凝结，以降水的形式回到陆地表面，最后通过不同的形式回到海洋之中，完成一个循环过程。小循环就是上述三种介质中任意两种之间的水相互移动，如陆地中的水，通过植物蒸腾的形式进入大气，然后又回到陆地的过程。值得说明的是，不同的淡水和海洋正常更新循环的时间是不相等的，有的更新时间较长，有的更新时间极短，表 1-1 是各类淡水水体的更新周期。

表 1-1 淡 水 更 新 周 期

水体	更新周期	水体	更新周期
永久积雪	9700 年	沼泽水	5 年
海水	2500 年	土壤水	1 年
地下水	1400 年	河流	16 天
湖泊水	17 年	大气水	8 天

资料来源 UNEP1993, Freshwater Pollution, 世界环境。

从表 1-1 可以看出，各种淡水更新周期存在着较大的差异，大气中的水只需 8 天时间就更新一次，是可更新资源；永久积雪更新一次需要 9700 年；地下水更新一次需要 1400 年，时间较长，它告诉我们对于这种近似于不可更新的水资源而言，在开发利用时，必须慎而又慎。

不管地球上的水如何运动和更新，但是地球上的水从总体上来看是平衡的，它遵循着质量守恒定律。表 1-2 是全球年水量平衡表。表 1-2 表明，地球上的水在海洋与陆地之间不断地进行循环，径流与蒸发的代数和等于降水量，从全球角度来看，降水量等于蒸发量。如果细加分析，它暗含了这样一个真理：地球上的水数量基本上是恒定的，它具有一定的承载力，我们没有能力改变这种客观存在，我们所能做到的是，在开发利用水资源时，不要超过其限度。

表 1-2 全球年水量平衡表

分区	面积/ 10^6 km^2	水量/ 10^3 km^3			水深/mm		
		降水	径流	蒸发	降水	径流	蒸发
海洋	361	458	-47	505	1270	-130	1400
陆地	149	119	47	72	800	315	485
全球	510	577	—	577	1130	—	1130

资料来源 UN. Water Development and Management. Proceeding of the UN Water Conference 1977. Part4. Oxford: Programon Press, 1978.

1.1.2 世界水资源供需分析

世界水资源供需状况并不乐观。1996 年 5 月，在纽约召开的“第三届自然资源委员会”上，联合国开发支持和管理服务部（United Nations Department of Development Support and Management）对 153 个国家（占世界人口的 98.93%）的水资源，采用人均占有水资源量、人均国民经济总产值、人均取（用）水量等指标进行综合分析，将世界各国分为四类，即水资源丰富国（包括吉布提等 100 多个国家）、水资源脆弱国（包括美国等 17 个国家）、水资源紧缺国（包括摩洛哥等 17 个国家）、水资源贫乏国（包括阿尔及利亚等 19 个国家）。按此种评价法，目前世界上有 53 个国家和地区（占全球陆地面积的 60%）缺水，其中包括：西班牙、意大利南部、达尔马提尼亚沿岸、希腊、土耳其、阿拉伯国家（叙利亚除外）、伊朗大部分地区、巴基斯坦、印度西部、日本、朝鲜、澳大利亚、新西兰的西部地区 and 南部地带、西北非和西南非沿岸、巴拿马、墨西哥北部、智利中部和美国西南部以及中国。目前的趋势已经表明，21 世纪初，水危机已成为几乎所有干旱和半干旱国家普遍存在的问题。联合国发表的《世界水资源综合评估报告》预测结果表明，到 2025 年，全世界人口将增加至 83 亿，生活在水源紧张和经常缺水国家的人数，将从 1990 年的 3 亿增加到 2025 年的 30 亿，后者为前者的 10 倍，第三世界国家的城市面积也将大幅度增加。除非更有效地利用淡水资源、控制对江河湖泊的污染、更有效地利用净化后的水，否则，全世界将有 1/3 的人口遭受中高度到高度缺水的压力。

总之，水危机已是全人类面临的重大环境问题，水资源危机发展将更加迅速，前景令人担忧！如何合理地开发利用保护水资源，已是摆在全人类面前刻不容缓的课题^[2]。

1.2 我国水资源及存在的问题

1.2.1 我国水资源的特点

我国地域辽阔，气候、地理等自然条件复杂多变，降水受季风气候控制，水资源时空分布不均，各地水资源条件差别很大，从总体分析，我国的水资源主要有以下特点。

1.2.1.1 河流湖泊众多

1. 河流 我国共有流域面积 100km² 以上的河流 5 万多条，总长约 43 万 km，其中可通航不同

船舶的各级航道约 13.5 万 km。在这些河流中,流域面积大于 1000km^2 的有 1500 多条,流域面积大于 1万 km^2 的有 79 条,流域面积大于 10万 km^2 的有 18 条(数据来源:《中国江河》)。

在我国的主要江河中,年径流量超过 100亿 m^3 的有 40 余条,其中超过 500亿 m^3 的有 19 条(数据来源:《中国水资源评价》《全国水资源调查评价成果》)。

2. 湖泊

目前,中国境内(包括香港、澳门和台湾)共有 1.0km^2 以上的自然湖泊 2693 个,总面积 81414.6km^2 ,约占全国国土面积的 0.9% ,分别分布在除海南、福建、广西、重庆、香港、澳门外的 28 个省(自治区、直辖市)。其中,大于 1000km^2 的特大型湖泊有 10 个,分别为色林错、纳木错、青海湖、博斯腾湖、兴凯湖、鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖、呼伦湖;面积在 $1.0\sim10.0\text{km}^2$ 、 $10.0\sim50.0\text{km}^2$ 、 $50.0\sim100.0\text{km}^2$ 、 $100.0\sim500.0\text{km}^2$ 和 $500.0\sim1000.0\text{km}^2$ 的湖泊分别有 2000 个、456 个、101 个、109 个和 17 个。

青海湖是全国最大的咸水湖,湖水位 3193.9m 时水面面积为 4340km^2 。鄱阳湖是全国最大的淡水湖,湖水位 21.7m 时水面面积 2940km^2 。全国第二大咸水湖纳木错,藏语是“天湖”之意,湖面海拔 4718m ,水面面积 1961.5km^2 。新疆的艾丁湖水水面低于海平面 154m ,是我国海拔最低的湖泊。长白山天池最大水深约为 370m ,是我国最深的湖泊。

1.2.1.2 水资源总量比较丰富

我国多年平均河川径流量 2.7万亿 m^3 ,多年平均水资源总量 2.84万亿 m^3 ,约占世界淡水资源量的 6% ,居世界第 6 位(第 1~5 位依次为:巴西 6.95万亿 m^3 ,俄罗斯 4.27万亿 m^3 ,加拿大 3.1万亿 m^3 ,美国 2.97万亿 m^3 ,印度尼西亚 2.90万亿 m^3)。2005 年水资源总量国家排序:巴西 8.2万亿 m^3 ,俄罗斯 4.5万亿 m^3 ,美国 3.05万亿 m^3 ,加拿大 2.9万亿 m^3 ,印度尼西亚 2.84万亿 m^3 ,中国 2.8万亿 m^3 ,中国仍居第 6 位。第 7~10 位依次为哥伦比亚 2.13万亿 m^3 ,秘鲁 1.91万亿 m^3 ,印度 1.9万亿 m^3 ,刚果民主共和国 1.28万亿 m^3 。

1.2.1.3 水资源时空分布不均

我国降水受东南季风和西南季风控制,年际变化大,年内季节分布不均,主要集中在 6—9 月,约占全年的 $60\%\sim80\%$,其中北方有些地区可达 90% 以上。如根据北京市 110 年实测资料,降水量最少的 1869 年为 242mm ,降水量最多的 1959 年为 1406mm ,相差 5.8 倍;1869 年 7 月的降水量为 5.8mm ,1891 年 7 月的降水量为 996mm ,相差 172 倍。在降水空间分布上,全国年降水量小于 400mm 的地区占国土面积的 $2/5$ 以上,降水最多的东南沿海地区在 2600mm 以上,降水最少的西北内陆地区不足 5mm ,相差 500 多倍。

受降水时空分布不均的影响,河川径流量也呈现与此相似的时空分布不均的特点。全国外流区面积占国土面积的 64% ,水资源量占全国的 95% ,内流区面积占国土面积的 36% ,但水资源仅占全国的 5% 。北方地区(包括松花江、辽河、海河、黄河、淮河、西北诸河等 6 个水资源一级区)的面积占全国的 64% ,耕地面积和人口分别占全国的 65% 和 46% ,但水资源仅占全国的 18.5% ;南方地区(包括长江、东南诸河、珠江、西南诸河等 4 个水资源一级区)的面积占全国的 36% ,耕地面积和人口分别占全国的 35% 和 54% ,但水资源占全国的 81.5% 。地处内陆腹地的新疆,面积占全国的 $1/6$,但水资源量

不足全国的 1/30。这种水资源南多北少、东多西少和汛期水量集中（6—9 月河川径流量占全年的 60%~80%，最多的超过 90%）的时空分布格局，是我国水旱灾害频繁发生、北方地区水资源严重短缺和生态环境极其脆弱的主要原因。

1.2.1.4 水能资源丰富

我国的地势西高东低，从西部的青藏高原到中部的山区丘陵和东部沿海地区形成了三级阶地。青藏高原平均海拔在 4500m 以上，被誉为“世界屋脊”和“亚洲水塔”，我国的长江、黄河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等主要江河都发源于青藏高原。这些河流水量丰富，落差大（如长江、黄河从河源到河口的总落差达 4800~5000m），蕴藏着丰富的水能资源，从而使我国成为世界上水能资源最丰富的国家。

1. 全国水能资源分布情况

根据中华人民共和国水力资源复查成果（2003 年），全国共复查水力资源理论蕴藏量 10MW 以上的河流 3886 条，水力资源理论蕴藏量共计 $6.08 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，平均功率 694GW，居世界第一位。其中技术可开发量（指当前技术条件下可能开发的水能资源量）为 $2.47 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，平均功率 542GW；经济可开发量（指当前经济技术条件下，综合开发成本与其他能源相比具有比较优势，并且不存在不可克服的环境问题和社会问题的水力资源可开发量）为 $1.75 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，平均功率为 402GW [数据根据《中国水力资源复查成果总报告（简要本）》有关资料整理]。

2. 我国重点水力资源分布情况

（1）中国大型水电基地。中国的水力资源绝大部分分布在西部地区的河流或河段，形成了一批可供梯级滚动开发的水电基地。按目前的经济可开发量，主要的水电基地有长江中上游、金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、澜沧江、红水河、黄河中上游以及东北、湘西、闽浙赣等。怒江的水力资源理论蕴藏量近 45000MW，技术可开发量 32000MW，但由于在水电开发与生态环境的问题上存在争论，需要进行全面协调和论证 [数据根据《中国水利百科全书（水力发电卷）》有关资料整理]。

（2）全国装机容量 300MW 以上水电站概况。全国可装机 300MW 以上的大型水电站共有 243+10/2 座，总装机容量 371379MW（其中装机容量 1000MW 以上的特大型和巨型水电站 110+5/2 座），占全国技术可开发量的 68.6%，其中绝大部分分布在长江流域、西南诸河和西藏诸河 [数据根据《中国水力资源复查成果总报告（简要本）》有关资料整理]。

1.2.1.5 我国水资源的国际比较

我国多年平均降水深约 650mm，为全球陆地平均降水深（800mm）的 81%；多年平均径流深 288mm，为全球陆地平均径流深（315mm）的 91%。同时，我国的降水深和径流深也低于亚洲的平均值（731mm 和 332mm），所以我国按单位面积计算的水资源量在世界上处于中等偏下的水平。

我国是世界上人口最多的国家，总人口约占全世界的 21%，但水资源仅占全世界的 6%，所以人均水资源量仅为世界平均值的 29%。在 193 个国家和地区中，我国的水资源总量居第 6 位，但按人均水资源量排序，我国居 143 位。人均水资源量超过 1 万 m^3 的有 61 个国家，其中超过 10 万 m^3 的有 8 个国家和地区。同时，世界上有 14 个国家的人均水

资源量低于 300m^3 。) 考虑到有些国家和地区的人口很少, 缺乏可比性, 所以在人口 1000 万以上、5000 万

以上和 1 亿以上的国家中再进行比较。在人口 1000 万以上的 77 个国家中, 我国的人均水资源量居第 54 位; 在人口 5000 万以上的 23 个国家中, 我国的人均水资源量居第 18 位; 在人口 1 亿以上的 11 个国家中, 我国的人均水资源量居第 9 位。

在不同层面上按人均水资源量排序, 我国分别排在倒数第 51 位 (193 个国家和地区)、倒数第 24 位 (人口 1000 万以上的 77 个国家)、倒数第 5 位 (人口 5000 万以上的 23 个国家) 和倒数第 3 位 (人口 1 亿以上的 11 个国家)。

根据世界上水资源开发利用的总体情况, 通常以人均水资源 3000m^3 以上为丰水, $2000\sim 3000\text{m}^3$ 为轻度缺水, $1000\sim 2000\text{m}^3$ 为中度缺水, $500\sim 1000\text{m}^3$ 为重度缺水, 低于 500m^3 为极度缺水。按 2005 年人口, 我国人均水资源量 2140m^3 , 已接近中度缺水 ($1000\sim 2000\text{m}^3$) 的上限, 但世界上还有 50 个国家的人均水资源量低于这一水平^[3]。

1.2.2 我国面临的水资源问题

我国地处中纬度, 受气候条件、地理环境及人为因素的影响, 成为一个洪涝灾害频繁、水资源短缺、生态环境脆弱的国家。新中国成立后, 水利建设工作取得了很大进展。初步控制了大江大河的常遇洪水, 形成了 5600 多亿 m^3 的年供水能力, 灌溉面积从 2.4 亿亩扩大到近 8 亿亩, 累计治理水土流失面积 78 万 km^2 。但在很多地区, 水的问题仍旧是限制区域经济和社会可持续发展的瓶颈。从全国范围看, 我国面临的水问题主要有以下三个。

(1) 防洪标准低, 洪涝灾害频繁, 对经济发展和社会稳定威胁较大。20 世纪 90 年代以来, 我国几大江河已发生了 5 次比较大的洪水, 损失近 9000 亿元。特别是 1998 年发生的长江、嫩江和松花江流域的特大洪水, 充分暴露了我国江河堤防薄弱、湖泊调蓄能力降低等问题。防洪建设始终是我国的一项长期而紧迫的任务。

(2) 干旱缺水日趋严重。农业、工业以及城市都普遍存在缺水问题。20 世纪 70 年代全国农田年均受旱面积 1.7 亿亩, 到 90 年代增加到 4 亿亩。农村还有 3000 多万人饮水困难, 全国 600 多个城市中, 有 400 多个供水不足。干旱缺水已成为我国经济社会尤其是农业稳定发展的主要制约因素之一。

(3) 水生态环境恶化。近几年, 我国水体水质总体上呈恶化趋势。1980 年全国污水排放量为 310 多亿 t, 1997 年为 584 亿 t。受污染的河长也逐年增加, 在全国水资源质量评价的约 10 万 km 河长中, 受污染的河长占 46.506%。全国 90% 以上的城市水域受到不同程度的污染。目前, 全国水蚀、风蚀等土壤侵蚀面积 367 万 km^2 , 占国土面积的 38%; 北方河流干枯断流情况愈来愈严重, 进入 20 世纪 90 年代, 黄河多年断流, 年均达 107 天。此外, 河湖萎缩, 森林、草原退化, 土地沙化, 部分地区地下水超量开采等问题, 严重影响了水环境。

随着人口增加和经济社会发展, 我国水的问题将更加突出。仅从水资源的供需来看, 在充分考虑节约用水的前提下, 2010 年全国总需水量将达 6400 亿~6700 亿 km^3 ; 2030 年人口开始进入高峰期, 将达到 16 亿, 需水量将达 8000 亿 km^3 左右, 需要在现有供水

能力的基础上新增 2400 亿 km^3 。保护开发利用水资源的任务十分艰巨。

1.2.3 我国水问题的根源

形成我国水问题严峻形势的根源, 总体来看, 主要有两个方面:

(1) 自然因素, 与气候条件的变化和水资源的时空分布不均有关。在季风作用下, 我国降水时空分布不平衡。在我国北方地区, 年降水量最少只有 40mm, 最多也仅 600mm, 长江流域及以南地区, 年降水量均在 1000mm 以上, 最高超过 2000mm。气候变化对我国水资源年际变化产生很大影响, 从长期气候变化来看, 在近 500 年中, 中国东部地区偏涝型气候多于偏旱型, 而近百年来洪涝减少、干旱增多。在黄河中上游地区, 数百年来一直以偏旱为主。

(2) 人为因素, 与社会经济活动和人们不合理地开发、利用和管理水资源有关。目前我国正处于经济快速增长时期, 工业化、城市化的迅速发展, 人口的增加和农业灌溉面积的扩大, 使得水资源的需求量不可避免的迅猛增加。长期以来, 由于水资源的开发、利用、治理、配置、节约和保护不能统筹安排, 不仅造成了水资源的巨大浪费, 破坏了生态环境, 而且更加剧了水资源的供需矛盾。突出表现以下几方面:

1) 流域缺乏统一管理, 上下游用水配置不合理, 造成水资源的消退。如西北内陆区塔里木河已经缩短了约 180km 的流程。黄河严重断流, 经专家们会诊, 主要原因还是人类活动的影响。

2) 地表、地下水缺乏联合调度, 过度开采地下水, 造成地下水资源枯竭。

3) 水价不合理, 水资源浪费严重。以农业用水为例, 目前农业用水占全国总用水量的 80% 以上, 北方农业用水则高达 86.7%。但农业灌溉用水浪费现象最为严重, 在一些地区仍采用漫灌、串灌等十分落后的灌溉方式, 渠系水利用系数较低, 只有 0.5~0.6 左右。灌溉定额高, 亩均毛用水量在 600m^3 以上。工业上用水重复利用率平均只有 30%~40%, 而日本、美国则在 75% 以上。

4) 废水大量排放, 使得生态环境恶化, 水资源污染型短缺。如南方长江三角洲和珠江三角洲的一些缺水地区。

5) 人类的活动破坏了大量的森林植被, 造成区域生态环境退化, 水土流失严重, 洪水泛滥成灾。一方面使河道冲沙用水量增加, 另一方面使一部分本可以成为资源的水, 却以洪水的形式宣泄入海, 这样极大降低了可用水资源的数量。

1.2.4 水资源问题危及社会发展

中国乃至整个世界的的水资源供需矛盾将随着人口与经济的增长进一步加剧, 正如联合国在 1997 年《对世界淡水资源的全面评价》报告中指出的: “缺水问题将严重地制约 21 世纪经济和社会发展, 并可能导致国家间的冲突。” 水资源短缺、水质污染、洪涝灾害等水问题严重威胁了社会经济发展, 主要表现在:

(1) 水资源危机导致生态环境的恶化。水不仅是社会经济发展不可替代的重要资源, 同时也是生态环境系统不可缺少的要素。随着社会经济的发展, 水资源的需求量越来越大, 为了取得足够的水资源供给社会, 人们过度开发水资源, 争夺生态用水量, 结果导致

一系列的生态环境问题的出现。例如,我国西北干旱、半干旱地区水资源天然不足,为了满足社会经济发展的需要,盲目开发利用水资源,不仅造成了水资源的消退,加重了水资源危机,同时使得本已十分脆弱的生态环境进一步恶化。天然植被大量消亡、河湖萎缩、土地沙漠化等问题的出现,已经危机到人类的生存与发展。目前水资源不足与生态环境脆弱已经成为制约部分地区社会经济发展的两大限制性因素。

(2) 水资源短缺将威胁粮食安全。粮食是人类生活不可缺少的物质,粮食生产依赖于水资源的供给。目前由于缺水而不得不缩小灌溉面积和有效灌溉次数,因此造成的粮食年减产量达 250 多万 t。

(3) 水资源危机给国民经济带来重大损失。从现状看,全国城市年缺水量达 58 亿 m^3 , 每年因缺水造成的直接经济损失达 2000 亿元,仅胜利油田 1995 年因黄河断流就减产 30 亿元,给国民经济带来重大损失。

综上所述,中国水资源面临的形势非常严峻。造成如此局面的原因,一部分是天然因素,与水资源时空分布的不均匀性有关;另一部分是人为因素,与人类不合理地开发、利用和管理水资源有关。

如果在水资源开发利用方式上没有大的突破,在管理上没有新的转变,水资源将很难满足国民经济迅速发展的需要,水资源危机将成为所有资源问题中最为严重的问题,它将威胁我国乃至世界的社会经济持续发展。解决水资源问题的根本途径在于执行可持续发展的原则,将水资源规划与管理同可持续发展相结合,实现水资源可持续利用^[4]。

1.3 水资源优化配置与调度与水资源的可持续利用

1.3.1 水资源可持续利用理论

可持续发展,是目前使用频率最高的词汇之一,已广泛被各国政府和学者所关注。水资源是可持续发展的基本支撑条件之一,保证水资源的可持续利用是可持续发展的基本要求。

1.3.1.1 可持续发展的概念及由来

第二次世界大战以来,随着科学技术的进步和社会生产力的飞速发展,人类创造了前所未有的物质财富,经济增长了近百倍,人口过快增长,世界总人口翻了两番,已达 60 亿,并且仍以每年约 9200 万的速度剧增,资源过度消耗、生态环境质量严重下降,使自然界生命支撑系统承受越来越大的压力。像环境污染、生态系统破坏等问题的发生给社会经济发展和生命财产带来严重损失。在这种严峻形势下,人类不得不重新反思自己的发展历程,重新审视自己的社会经济行为。人们终于认识到高消耗、高污染、先污染后治理的传统发展模式已不再适应当今和未来发展需要,必须寻找一条社会、经济、资源、环境相协调的可持续发展道路。

一些国际组织通过各种形式积极推动可持续发展进程。1972 年,在瑞典斯德哥尔摩召开的世界环境大会上,人们开始改变多年来习以为常的“世界实际是无限的”概念,开始明白只有一个“地球”的含义,孕育了“可持续发展”的萌芽。会议通过了《关于人类