

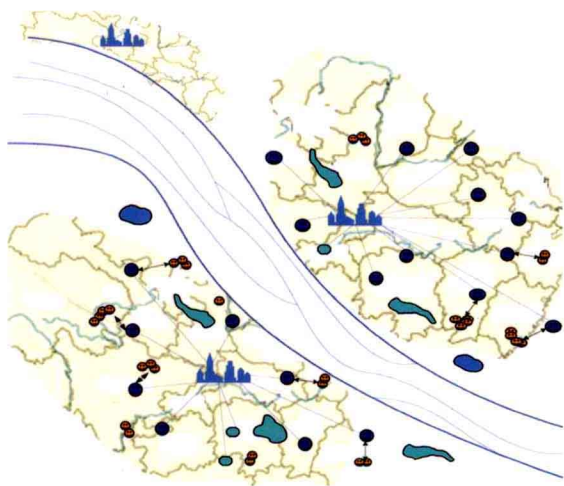


水危机管理系列丛书

Methods and Applications on
Water Resources Adaptive Allocation System

水资源适应性配置 系统方法及应用

王慧敏 佟金萍 著



科学出版社

水危机管理系列丛书

水资源适应性配置系统 方法及应用

王慧敏 佟金萍 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

水资源配置是实现水资源合理开发利用的基础,是水资源可持续利用的根本保证。本书从理论、方法和应用三个方面系统地研究了水资源适应性配置问题。作者以复杂系统科学为方法论,以人与自然和谐理念为指导,以水资源合理配置问题为导向,研究水资源适应性配置系统中主体行为和系统演化的规律;从新的视角,运用综合集成研讨方法,展开水资源适应性配置的系统方法与实现研究。本书提供了两个案例,即水资源冲突问题比较突出的漳河流域水资源配置案例和南水北调东线工程水资源配置应用案例。

本书可作为高等院校信息类、经济管理类、资源环境类相关专业师生的参考书,也可供相关科研单位、管理部门及决策部门的科技、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水资源适应性配置系统方法及应用/王慧敏,佟金萍著. —北京:科学出版社, 2011. 11

(水危机管理系列丛书)

ISBN 978-7-03-032630-0

I. ①水… II. ①王… ②佟… III. ①水资源-协调控制-研究 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 219657 号

责任编辑:鞠丽娜/责任校对:马英菊

责任印制:吕春珉/封面设计:三函设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年11月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011年11月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 1—2 000 字数: 251 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8002

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基。水资源合理配置与利用不仅关系到国家的供水安全、粮食安全，更关系到经济安全、生态安全和国家安全。随着工业化、城市化深入发展，我国出现历史上空前的“资源危机”和“生态赤字”，水资源整体态势异常复杂，水安全形势日趋严峻，表现为洪旱灾害、水短缺和水生态环境恶化等方面相互交织的多重危机和挑战，水资源供需矛盾突出已成为我国可持续发展的主要瓶颈。随着水资源变化的不确定性与水资源计划控制管理的矛盾愈演愈烈，传统的基于确定性的水资源短缺的调度、控制已难以适应不确定性加大的环境变化。人们越来越强烈地意识到水资源的管理应具有更强的适应性、灵活性和可持续性，水资源管理的成功之路在于适应性管理。

从20世纪90年代末开始，我国有意识地加快了水资源的治道变革。在社会经济的发展、人口增长及生态环境的恶化、水资源的供求形式发生了重大变化时，水资源的管理目标、管理制度和管理方式也相应发生变化。水资源管理理念逐渐由以预测、控制为特征的技术管理向以沟通、协调为特征的“交互-适应-协调”管理转变，管理模式逐渐由统一、综合管理向适应性管理转变，以此来应对复杂的、不确定性的水资源管理问题。各国政府和学者也逐渐意识到：水资源管理模式正由以刚性特征的机械行政组织管理向具有灵活特征的适应性管理转变。

水资源管理的时代特征要求我们：必须从沟通与协调的视角来研究水资源配置问题，这正是本书研究的核心所在。主要探索：一是如何面对和处理水资源配置过程中的不确定性和复杂性问题；二是如何协调水资源配置过程中各主体的行为；三是如何平衡水资源配置各主体利益关系等。那么，水资源适应性配置与管理重心势必要由仅关注人-水关系的绝对水量供需平衡向全面考察人-水关系与人-人关系的相对水量分配的多利益相关者“满意”方向转变。

水资源配置系统是由社会、经济、生态环境和水资源各个子系统相互促进、相互制约而构成的开放的、动态的复杂巨系统。水资源适应性配置系统是将视为一个人与水相互作用的系统，系统内自然、经济、社会和政治因素是相互联系的。水资源系统的协调发展有赖于水资源的承载能力、水环境缓冲能力、经济的生产能力、社会的水需求能力、水资源管理的协调控制能力的提高，以及各种能力的相互适应。竞争与协同的相互依赖和相互转化构成了水资源适应

性配置系统发展演化的动力。

如何描述和揭示水资源适应性配置过程中的主体行为规律和系统演化规律,如何协调政府、市场、公众、社团等多主体利益关系,促进水资源适应性配置过程中多利益相关者的行为合作已成为中国水资源配置与管理面临的重大课题,也是解决水资源供需矛盾和冲突的紧迫问题。以往的水资源配置理论和方法,多以基础系统科学和运筹学为主要分析工具,研究如何通过方法、模型和技术对水资源配置进行优化的理论和方法,精力重点放在水资源优化配置的系统建模上。经典水资源配置理论和方法忽略了配置过程的复杂性、交换的复杂性、人的有限理性和信息不对称等因素带来的不确定性,更忽视了配置过程中主体的能动性。因此,当务之急是要更新观念,突破原有思维定式,由过去的“技术经济寻优”向以沟通与协调为特征的适应性配置理念发展,考察水资源配置问题。

基于上述认识,我们以复杂系统科学为方法论,以人与自然和谐理念为指导,以水资源合理配置问题为导向,研究水资源适应性配置系统中主体行为和系统演化规律;从新的视角,运用综合集成研讨方法,展开水资源适应性配置的系统方法与实现研究。我们将近年来的研究成果整理出版,希望能为读者在复杂系统理论研究、适应性管理研究、制订水资源合理配置的综合管理、发展决策和规划应用中提供参考和帮助。

本书围绕水资源适应性配置理论、方法及应用开展讨论和介绍。全书共分6章。第1~4章侧重于阐述理论与方法,第5~6章侧重于介绍应用与实践。理论方法部分对水资源适应性配置的基本理论、方法进行了较深入的分析,重点介绍水资源适应性配置的系统分析,水资源适应性配置的 Multi-agent 方法和水资源适应性配置的综合集成研讨与实现方法。实践应用部分有两个应用工程案例,包括漳河流域水资源适应配置、南水北调东线工程水资源适应配置应用分析。

近年来,我们得到国家自然科学基金重大研究计划(项目编号:90924027)、国家自然科学基金(项目编号:50979024)、国家社会科学基金重点项目(项目编号:10AJY005)、国家重点基础研究发展计划专题研究(“973”计划)(项目编号:2010CB951104)、高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号:200802940007)、水利部公益项目(项目编号:200801027)以及企事业单位的委托等项目的资助。获得省部级科技进步一等奖1项、二等奖3项,通过省部级科技成果鉴定5项,在水资源配置研究和实践方面有较多的心得体会。本书的写作是在以上工作经历的基础上完成的。

感谢课题组牛文娟博士,承担了第3章的写作初稿。感谢课题组的其他成员:梁慧稳博士、陈志松博士、唐润博士、刘高峰博士、任政博士、林晨硕士、

徐茜茜硕士。

在本书的编写过程中参考的大量文献资料已尽可能地一一列出，但由于文献资料较多，疏漏在所难免，在此表示歉意，并向所有的参考文献资料作者表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中会有许多缺点和不完善之处，恳请广大读者批评指正。

王慧敏

2011年8月15日

于河海大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 新时期面临的水短缺危机	1
1.1.1 水资源供需矛盾	2
1.1.2 水短缺面临的问题和挑战	11
1.2 水资源管理的时代特征	12
1.3 响应水短缺危机的治水变革	14
1.4 水资源配置研究进展	17
1.5 本书研究内容	23
第二章 水资源适应性配置的系统分析	25
2.1 现代水资源配置的不确定分析	25
2.2 适应性配置的概念与内涵	27
2.2.1 适应性	27
2.2.2 适应性管理	28
2.2.3 适应性配置	35
2.3 适应性配置系统	41
2.3.1 适应性配置系统的特征	41
2.3.2 适应性配置系统的结构	47
2.4 适应性配置系统行为分析	50
2.4.1 适应性配置系统主体分析	50
2.4.2 适应性配置系统演化分析	61
第三章 水资源适应性配置系统方法	66
3.1 水资源适应性配置系统的方法论	66
3.1.1 现行水资源配置方法的局限性	66
3.1.2 水资源适应性配置方法的新思路	70
3.2 水资源适应性配置系统的 Multi-Agent 方法	71
3.2.1 水资源适应性配置系统的 Multi-Agent 建模框架	71

3.2.2	水资源适应性配置系统的 Multi-Agent 建模	72
3.3	水资源适应性配置系统的 Multi-Agent 仿真框架及流程	92
3.3.1	水资源适应性配置系统的 Multi-Agent 仿真框架	92
3.3.2	水资源适应性配置系统的 Multi-Agent 仿真流程	97
第四章	水资源适应性配置系统的综合集成研讨与实现	99
4.1	水资源适应性配置系统的综合集成研讨思路	99
4.2	水资源适应性配置系统的综合集成研讨体系	101
4.2.1	配置系统的研讨主体	101
4.2.2	配置系统的研讨体系	109
4.2.3	配置系统的研讨层次	111
4.3	水资源适应性配置系统的综合集成研讨过程	114
4.3.1	初始配置的综合集成研讨	114
4.3.2	二次配置的综合集成研讨	127
4.4	水资源适应性配置系统的综合集成研讨实现	134
4.4.1	研讨信息集成	134
4.4.2	研讨工具	138
第五章	漳河流域水资源适应性配置综合集成研讨方法应用	140
5.1	漳河流域水资源配置概况	140
5.1.1	漳河流域概况	140
5.1.2	漳河上游水资源配置矛盾与冲突分析	141
5.1.3	漳河上游水资源配置方案及实施	143
5.2	漳河流域水资源适应性配置的综合集成研讨体系构建	144
5.2.1	漳河水资源适应性配置综合集成研讨厅思想	144
5.2.2	漳河水资源适应性配置综合集成研讨厅的研讨任务	146
5.2.3	漳河水资源适应性配置综合集成研讨厅的概念框架	146
5.2.4	漳河水资源适应性配置系统的综合集成研讨体系	147
5.3	漳河流域水资源适应性配置综合研讨分析	154
5.3.1	漳河水资源初始配置备选方案制定	154
5.3.2	漳河水资源二次配置综合研讨	160
第六章	南水北调东线工程水资源适应性配置 Multi-Agent 方法应用	172
6.1	南水北调东线工程环境概况	172
6.2	南水北调东线工程水资源适应性配置系统分析	175

6.2.1	南水北调东线工程配置系统结构	175
6.2.2	配置系统的 Agent 抽象与确立	176
6.2.3	配置系统的 Agent 行为规则	179
6.2.4	配置系统 Agent 间关联性分析	186
6.3	南水北调东线工程水资源适应性配置的 Multi-Agent 仿真 模型建立	186
6.3.1	仿真模型简化原则	186
6.3.2	仿真结果的评价指标	187
6.3.3	仿真程序实现细节	189
6.4	南水北调东线工程水资源适应性配置的 Multi-Agent 结果分析 ...	192
6.4.1	水量分配方案	192
6.4.2	水量配置方案评价与影响	194
参考文献		200

第一章 绪 论

1.1 新时期面临的水短缺危机

水是基础性的自然资源和战略性的经济资源。水资源的可持续利用是经济和社会可持续发展的重要保证。世界范围内的水资源短缺^①，是困扰当今世界经济发展的突出问题，成为可持续发展的制约因素。在约翰内斯堡可持续发展世界首脑会议上，水被列为全球持续发展的五大问题之首，反映出水对人类生存与发展的极端重要性。国际上有“19 世纪争煤，20 世纪争石油，21 世纪看水”和“21 世纪国际投资与经济发展，一看人，二看水”等说法。联合国《世界水资源综合评估报告》指出：水问题将严重制约 21 世纪全球经济与社会发展，甚至导致国家间的冲突。人类必须合理有效地配置、利用水资源，不断完善供水、用水、管水制度，是世界各国在水资源开发利用领域所不断追求的目标之一。

我国淡水资源总量约为 2.8 万亿 m^3 ，约占全球淡水资源总量的 6.7%，居世界第六位。目前，我国人均水资源量仅相当于世界人均水资源量的 1/4，亩均水资源量相当于世界亩均占有量的 4/5^[1]。我国还面临着水资源时空分布不均、开发利用率高、供需矛盾突出、利用效率低、浪费严重等现象，这些都进一步加剧了我国水资源短缺问题。同时，由于受水资源分布和自然地理条件的限制，水利工程的兴建不仅困难和复杂，而且造价高，再加上我国财力有限，工程供水在一定程度上又受到制约，水资源管理手段和技术难以适应和解决水资源现状，导致我国正在以最稀缺的水资源和最脆弱的生态系统，支撑着世界上最大规模的人口，负担着世界上最大规模的人类活动^[2]。因此，有必要对我国现有水资源供需矛盾进行分析，对我国水短缺面临的问题和挑战进行剖析，才能从根本上了解中国水资源短缺的实质，才能找到有效利用和配置水资源的管理方法和管理手段，缓解我国水安全和国家安全问题，实现水资源的可持续利用，保障我国社会经济可持续发展。

^① 从世界范围来看，世界海水占地球水总量的 96.54%，世界人均水资源量为 7342 m^3 ，远在 3000 m^3 /人的缺水上限之上，折合地表径流深达 296mm，也远在 150mm 的生态缺水线以上；但淡水只占 2.53%，其中将近 2/3 以冰雪形式存在，这些水人类是难以开发利用的，并且世界水资源分布极不均匀。世界正陷于严重的淡水短缺局面，通常会表现为蓄水层的超量开采和地下水位下降等。

1.1.1 水资源供需矛盾

1. 水资源量概况

从水资源总量来看^[3]，2008 年，全国水资源总量为 27 434.3 亿 m³，比常年偏少 1%。地表水资源量约为 26 377 亿 m³，地下水资源总量为 8122 亿 m³，地下水与地表水不重复量为 1 057.3 亿 m³，占地下水资源总量的 13%。2008 年各水资源一级区水资源量见表 1.1，与常年比较见图 1.1。北方 6 区^①水资源总量 4600.7 亿 m³，比常年偏少 12.5%，占全国的 16.8%；南方 4 区水资源总量 22 833.6 亿 m³，比常年偏多 1.7%，占全国的 83.2%。

表 1.1 2008 年各水资源一级区水资源量数据表 （单位：亿 m³）

水资源一级区	降水总量	地表水资源量	地下水资源量	地下水与地表水 资源不重复量	水资源总量
全国	62 000.3	26 377.0	8 122.0	1 057.3	27 434.3
北方 6 区	19 534.8	3 681.6	2 455.2	919.1	4 600.7
南方 4 区	42 465.5	22 695.4	5 666.8	138.2	22 833.6
松花江	4 353.2	788.5	426.1	194.2	982.7
辽河	1 586.8	305.1	171.7	88.8	393.9
海河	1 729.5	126.9	242.1	167.6	294.5
黄河	3 443.1	454.2	344.7	104.9	559.0
淮河	2 902.1	782.1	430.6	265.1	1 047.2
西北诸河	5 520.1	1 224.8	840.0	98.6	1 323.4
长江	19 120.6	9 344.3	2 416.3	113.0	9 457.2
其中：太湖	450.7	175.7	45.7	23.7	199.4
东南诸河	3 269.5	1 724.4	454.4	10.7	1 735.2
珠江	10 438.0	5 682.3	1 293.7	14.6	5 696.8
西南诸河	9 637.5	5 944.4	1 502.4	0.0	5 944.4

① 北方 6 区包括松花江、辽河、海河、黄河、淮河和西北诸河；南方 4 区包括长江（含太湖）、东南诸河、珠江、西南诸河；东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南；中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南；西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆。

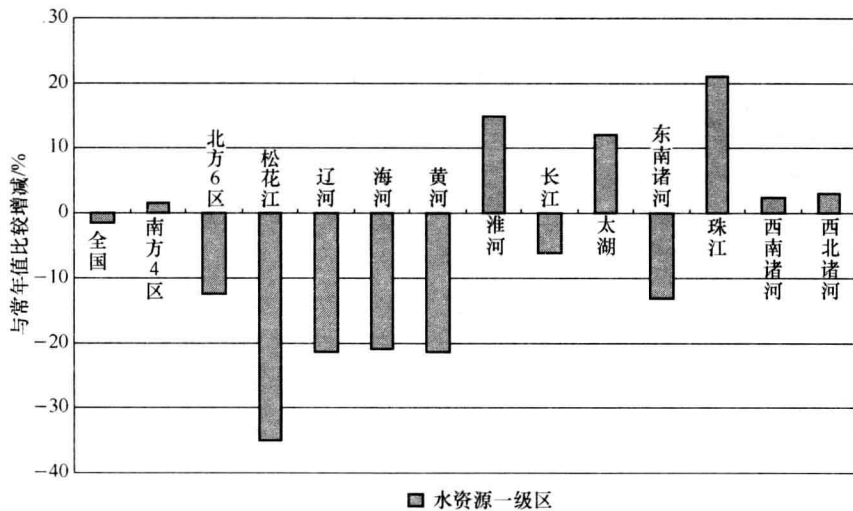


图 1.1 2008 年各水资源一级区水资源总量与常年值比较

2008 年各省级行政区水资源总量见表 1.2，与常年值比较见图 1.2 所示。东部地区水资源总量为 5 741.3 亿 m^3 ，比常年值偏多 3.9%；中部地区水资源总量为 5 941.9 亿 m^3 ，比常年值偏少 11.8%；西部地区水资源总量为 15 751.1 亿 m^3 ，比常年值偏多 2.0%。

表 1.2 2008 年各省级行政区水资源量数据表 (单位: 亿 m^3)

省级行政区	降水总量	地表水资源量	地下水资源量	地下水与地表水资源不重复量	水资源总量
全国	62 000.3	26 377.0	8 122.0	1 057.3	27 434.3
北京	104.8	12.8	24.9	21.4	34.2
天津	76.4	13.6	5.9	4.7	18.3
河北	1 046.6	62.4	136.3	98.6	161.0
山西	728.8	51.3	78.9	36.0	87.4
内蒙古	3 205.1	274.8	235.1	137.2	412.1
辽宁	902.0	226.8	105.4	39.2	266.0
吉林	1 109.6	276.6	99.6	55.4	332.0
黑龙江	2 154.6	341.9	247.8	120.0	462.0
上海	78.5	30.0	10.2	7.0	37.0
江苏	1 013.6	280.9	111.3	97.1	378.0
浙江	1 574.3	839.9	198.1	15.3	855.2
安徽	1 598.4	651.9	178.1	47.4	699.3

续表

省级行政区	降水总量	地表水资源量	地下水资源量	地下水与地表水 资源不重复量	水资源总量
福建	1 978.7	1 035.7	303.9	1.2	1 036.9
江西	2 564.3	1 335.7	370.3	20.5	1 356.2
山东	1 115.2	229.0	180.6	99.8	328.7
河南	1 221.8	259.1	188.3	112.2	371.3
湖北	2 255.0	1 003.7	282.0	30.2	1 033.9
湖南	2 957.4	1 593.1	386.2	6.8	1 600.0
广东	3 801.6	2 197.3	506.9	9.5	2 206.8
广西	4 257.7	2 282.5	504.8	0.0	2 282.5
海南	715.6	414.1	97.9	5.0	419.1
重庆	978.7	576.9	88.4	0.0	576.9
四川	4 630.7	2 488.3	598.2	1.6	2 489.9
贵州	2 231.2	1 140.7	265.0	0.0	1 140.7
云南	5 111.3	2 314.5	801.6	0.0	2 314.5
西藏	7 419.5	4 560.2	1 054.3	0.0	4 560.2
陕西	1 217.5	285.0	107.6	19.0	304.0
甘肃	1 089.9	179.3	114.3	8.2	187.5
青海	2 317.2	640.0	298.5	18.1	658.1
宁夏	129.6	6.6	23.2	2.6	9.2
新疆	2 415.0	772.5	518.5	43.1	815.6

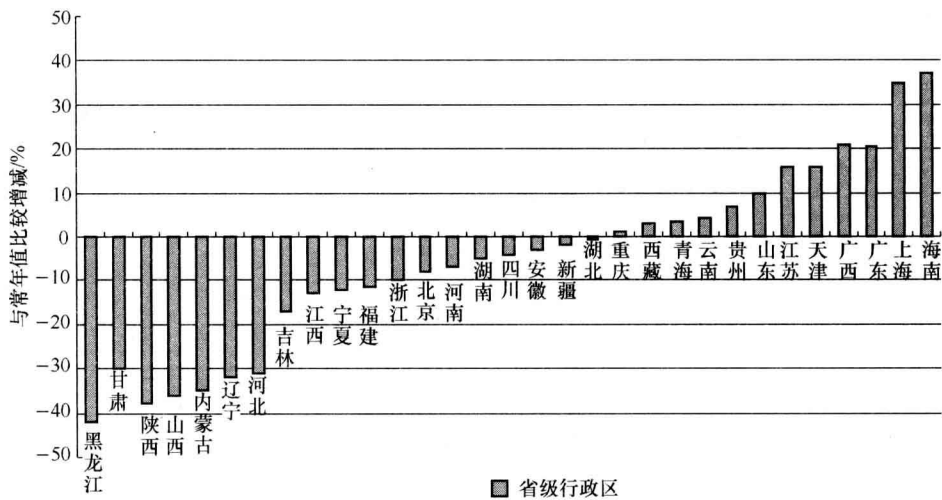


图 1.2 2008 年各省级行政区水资源总量与常年值比较

从人均水资源量来看。根据《2008 中国水资源公报》统计,全国人均水资源量为 2071 m^3 ,虽然水资源总量在世界排名第四,但人均水资源量仅为世界平均值的 $1/3$,处于缺水上下限 ($3000 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{人}$) 的中值,亩^①均占有水量 $27867 \text{ m}^3/100\text{m}^2$,仅为世界平均值的 79% 。2008 年,我国有 18 个省(自治区、直辖市)人均水资源量低于联合国可持续发展委员会审议的人均占有水资源量 2000 m^3 标准,其中有 12 个省(自治区、直辖市)人均低于 1000 m^3 的最低限。根据 1993 年国际人口行动提出的《持续水:人口和可更新水的供给前景》报告:人均水资源量少于 1700 m^3 的国家为用水紧张国家,少于 1000 m^3 的为缺水国家,少于 500 m^3 的为严重缺水国家,所以我国一直接近中度缺水线,由于北方人均水量仅为 990 m^3 ,属于重度缺水。到 2030 年,我国人口将增至 16 亿,人均水资源量将降到 1760 m^3 ,接近国际公认的警戒线,未来水资源态势十分严峻,并且,华北地区是中国乃至世界上最缺水的区域之一。黄、淮、海三流域的土地面积占全国的 13.4% ,耕地占 39% ,人口占 35% ,GDP 占 32% ,而水资源量仅为 7.7% ,人均水资源量约为 500 m^3 ,耕地亩均水资源量少于 400 m^3 。北方黄、淮、海流域的开发利用率都超过了 50% ,其中海河流域已经近 90% ,均超过国际公认 40% 的合理限度。黄河从 1972 年到 1998 年的 27 年中,有 21 个年份黄河下游出现断流,2007 年断流时间达历史最长 270 天。淮河中游 1999 年也出现了历史上罕见的断流现象。

总体来看,从 1997 年到 2008 年,不论是水资源总量还是人均水资源量,其变化过程总体均呈下降趋势。2009 年,我国全年水资源总量 23763 亿 m^3 ,比上年又减少了 13.4% ,并且从 2000 年至 2009 年,我国的水资源总量减少了 3937.8 亿 m^3 ,相当于 2008 年全年供水总量的 67% 。

2. 供需水量现状与特点

(1) 供水量现状与特点

2008 年全国总供水量 5909.9 亿 m^3 ,占当年水资源总量的 21.5% 。其中,地表水源供水量 4796.4 亿 m^3 ,占总供水量的 81.2% ;地下水源供水量 1084.8 亿 m^3 ,占总供水量的 18.3% ;其他水源供水量 28.7 亿 m^3 ,占总供水量的 0.5% 。与 2007 年相比,全国总供水量增加 91.2 亿 m^3 ,其中地表水源供水量增加 72.9 亿 m^3 ,地下水源水量增加 15.3 亿 m^3 ,其他水源供水量增加 3.0 亿 m^3 。近几年,我国供水量呈现以下特点:

1) 我国水资源开发利用在区域上具有明显差异。南方 4 区供水量为 3288 亿

^① $1 \text{ 亩} = 666.7 \text{ m}^2$ 。

m^3 , 占全国总供水量的 55.6%, 供水以地表水为主, 其供水量占总供水量的比例一般都在 95% 左右, 比 2005 年降低了 5 个百分点; 而北方供水组成差异较大, 以地下水供水为主, 除西北诸河区地下水供水量只占总供水量的 18.4% 外, 其余 5 区地下水供水量均占有较大比例, 其中海河区和辽河区的地下水供水量分别占总供水量的 65% 和 55.1%。从各个省级行政区供水来看, 同样具有这一供水特点, 南方省份地表供水量占其总供水量比重均在 90% 以上, 而北方省份地下水供水量则占相当大的比例, 其中河北、北京、山西、河南 4 个省 (直辖市) 地下水供水量占总供水量的一半以上。但近年来随着地表水污染日趋严重, 南方 4 区地下水的利用有加大趋势; 北方, 尤其是黄河、淮河、海河, 其供水增长严重受当地水资源条件限制, 目前主要靠抽取地下水包括超采地下水以维持不断增长的用水需求^[4]。

2) 水资源开发利用效率总体呈上升趋势, 且南低北高。通常认为当径流量利用率超过 20% 时就会对水环境产生很大影响, 超过 50% 时则会产生重要影响。我国水资源开发利用效率已具相当程度, 1980 年水资源开发利用效率为 16%, 1993 年上升至 18.8%, 2005 年达到 20.3%, 接近世界平均水平的 3 倍。我国水资源利用率区域差异反差极大, 目前北方和内陆区水资源利用率很高, 2005 年北方水资源开发利用效率达到 47%, 而超过 50% 的流域包括海河 (102%)、淮河 (59%)、黄河 (53%), 内陆河的水资源利用率也达到了 47%, 从水资源角度其利用率已不宜提高。但南方流域水资源利用率均较低, 一般在 20% 左右, 但由于水体受到污染, 造成水质下降, 产生污染型缺水。不过, 南方也存在水资源利用率较高现象, 如经济发达的珠江三角洲的水资源开发利用效率最高达 83.1%^①。

3) 工程供水量明显增加, 调蓄控制能力不高。在地表水源供水量中, 蓄水工程供水量占 33.8%, 引水工程供水量占 38.6%, 提水工程供水量占 24.9%, 水资源一级区区间调水量占 2.7%。全国跨水资源一级区调水主要分布在黄河下游向其左右两岸的海河和淮河流域调水, 以及长江下游向淮河流域的调水。我国蓄水工程对地表水的调蓄控制能力明显低于美国、加拿大、俄罗斯、墨西哥等国家。由于自然的地理、气候、开发利用条件以及水利投入等因素的影响, 我国各流域对地表水的调蓄控制能力差别较大。南方蓄水能力有所增加, 据《中国水资源公报 2008》显示, 南方 4 区水库蓄水量比年初增加 411.5 亿 m^3 , 其中长江区和珠江区蓄水量增加较多, 分别是 241.9 亿 m^3 和 142.4 亿 m^3 ; 而北方蓄水能力较低, 2008 年北方蓄水量减少了 51.8%, 其中黄河区就减少了 35.5 亿

① 三角洲水资源开发利用效率超过八成. <http://www.hbzhan.com/News/Detail/7899.html>.

m^3 ，尽管除海河外黄河对地表水的调蓄控制能力很强。此外，西南诸河、西北诸河对地表径流的调蓄能力最弱，总库容不及多年平均径流的 10%。

(2) 用水量现状与特点

2008 年，全国总用水量 5909.9 亿 m^3 ，生活用水 729.2 亿 m^3 （其中城镇生活占 58.8%），占总用水量的 12.3%；工业用水 1397.1 亿 m^3 ，占总用水量的 23.7%；农业用水 3663.4 亿 m^3 （其中农田灌溉占 90.2%），占总用水量的 62%。随着我国社会经济的快速发展，我国用水量具有以下特点：

1) 水资源用水量逐渐增加，人均用水量趋势波动较大，区域差异明显。与 2007 年相比，全国用水总量增加 91.2 亿 m^3 ，其中生活用水增加 18.9 亿 m^3 ，农业用水增加 64.9 亿 m^3 ，生态与环境补水增加 14.4 亿 m^3 。而人均水资源用水量如图 1.3 所示。1999~2003 年，人均用水量降至 412.9 m^3 ，降幅达 6.2%；但 2003 年开始，人均水资源用水量逐年提高，2008 年达历史新高 446.2 m^3 ，增幅达 7.7%。从水资源区来看，各项用水指标南高北低，其中万元工业增加值用水量高出北方 1.8 倍，农田灌溉亩均用水量高出近 40%，如表 1.3 所示。从地区来看，各项用水指标西部大、东部小，如东、中、西部人均水资源量分别为 426 m^3 、425 m^3 、525 m^3 ，东中部小，西部大；万元 GDP 用水量西部（321 m^3 ）高出东部（113 m^3 ）近 2 倍；农田灌溉面积亩均用水量西部达 556 m^3 ，高出东部（165 m^3 ）和中部（174 m^3 ）。

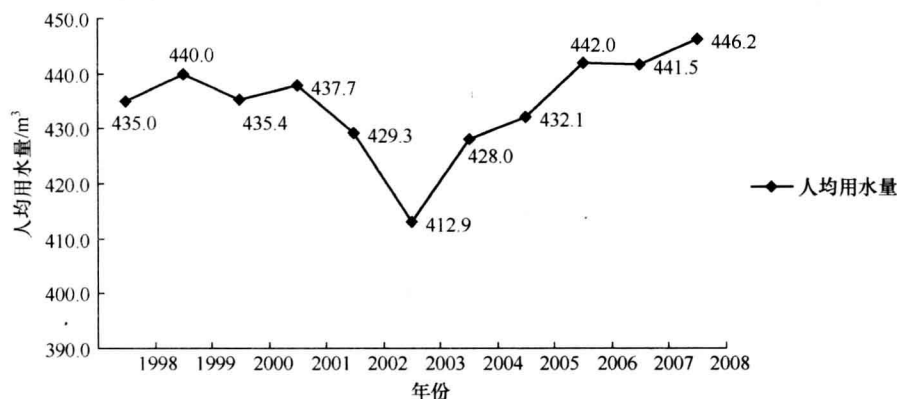


图 1.3 1998~2008 年我国人均水资源用水量

2) 水资源利用效率低，浪费严重。自 1997 年以来，我国人均用水量基本维持在 430 m^3 上下，用水效率明显提高，万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量均呈显著下降趋势，农田实际灌溉亩均用水量总体上呈缓慢下降趋势。尽管如此，全国农业灌溉水的利用系数平均在 0.4~0.45，与先进国家 0.7~0.8 相比，我国灌溉效率落后于世界先进水平 30~50 年；我国的水分利用效率也比

表 1.3 2008 年各水资源一级区主要用水指标

水资源一级区	人均国内生产总值/万元	人均用水量/ m^3	万元国内生产总值用水量/ m^3	农田实际灌溉亩均用水量/ m^3	人均生活用水量/(L/d)		万元工业增加值用水量/ m^3
					城镇生活	农村居民	
全国	2.270	446	193	435	212	72	108
北方 6 区	2.517	438	170	378	165	58	48
南方 4 区	2.504	466	183	524	248	85	136
松花江	2.264	636	278	446	156	53	123
辽河	2.858	364	125	445	187	69	39
海河	3.085	272	86	233	162	58	28
黄河	2.248	343	150	395	153	45	46
淮河	2.326	307	130	274	158	62	45
长江	2.311	450	191	447	222	71	166
其中:太湖	6.688	750	106	445	310	102	133
东南诸河	3.557	452	123	529	250	100	94
珠江	2.693	506	185	802	310	119	99
西南诸河	1.082	538	495	537	167	73	132
西北诸河	2.127	2103	945	709	217	67	68

注:万元国内生产总值用水量和万元工业增加值用水量指标按当年价格计算。

较低,仅有 $0.6 \sim 1.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。我国工业用水利用效率也很低。据《2008 年中国水资源公报》资料显示,我国人均 GDP 比较高的省市(如北方以北京、天津,南方以浙江、上海、广东为例),万元 GDP 用水量和万元工业用水量都较低,其中万美元 GDP 用水量和万元工业产值用水量均高于美国和日本的 $5 \sim 10$ 倍,如我国生产 1 t 钢耗水量为 $23 \sim 56 \text{ m}^3$,而美国、日本、德国等工业化国家耗水量为 6 m^3 ;我国生产 1 t 纸至少耗水 450 m^3 ,而工业化国家耗水量不到 200 m^3 ;日本在 1989 年单位工业产值达 $32.4 \text{ 美元}/\text{m}^3$,美国在 1990 年达 $10.3 \text{ 美元}/\text{m}^3$,而我国在 1995 年仅约为 $1.3 \text{ 美元}/\text{m}^3$ 。2000 年,我国工业用水重复利用率只有 $40\% \sim 50\%$,远落后于发达国家 80% 的平均水平^[1]。

3) 城市水资源利用率较低。除北京、天津、大连、青岛等城市水资源重复利用率可达 70% 以上外,大批城市水资源重复利用率仅为 $30\% \sim 50\%$,而发达国家达到 $75\% \sim 80\%$ 。根据国际水协的有关统计资料,我国城市供水系统漏失强度(单位管长单位时间的供水漏失量)1999 年达到 $3.41 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{h})$,而同期的日本、英国、德国分别只有 $1.0 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{h})$ 、 $0.8 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{h})$ 、 $0.4 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{h})$;1997 年各地区城市供水系统的综合漏失率为 9.13% ,城市自来水管网跑、冒、滴、漏的损失率超过 20% 。