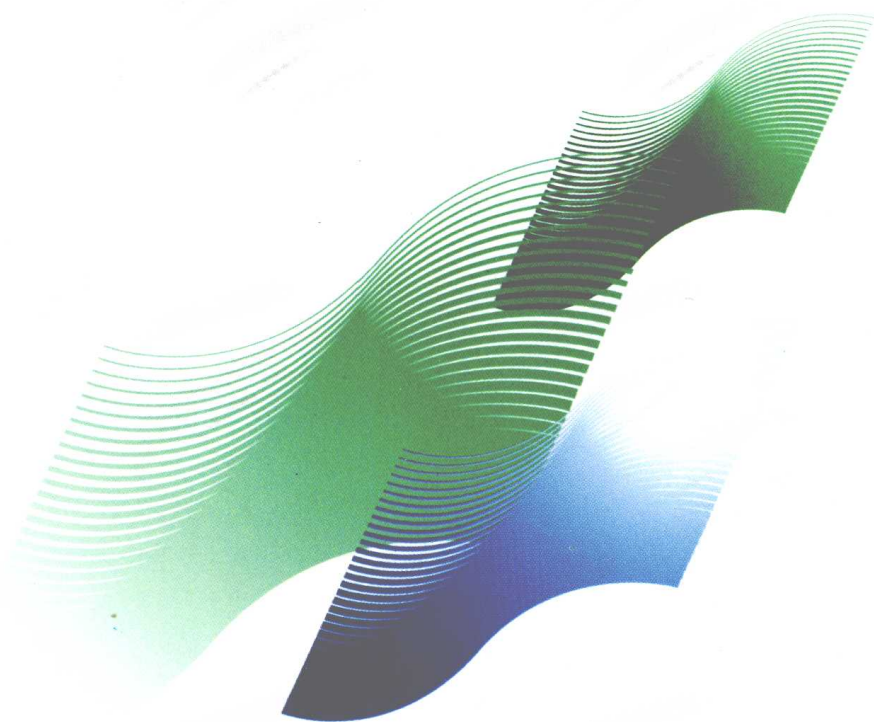


COMPLEXITY THEORY OF
WATER RESOURCES SYSTEM

水资源复杂系统理论

邵东国 刘丙军 阳书敏 黄显峰 顾文权 杨丰顺 等 著



科学出版社

水资源复杂系统理论

Complexity Theory of Water Resources System

邵东国 刘丙军 阳书敏 黄显峰 顾文权 杨丰顺 等 著

国家自然科学基金项目 (50679068)

国家“973”计划课题 (2003CB415206)

湖北省自然科学基金重大项目 (2007ABD007)

湖北省水利重点科研项目 (HBSHLKJ2007K004)

水资源与水电工程科学国家重点实验室专项经费资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面分析了水资源系统的复杂性特征及其研究发展趋势,系统阐述了水资源复杂系统的理论基础与建模方法、参考作物潜在腾发量时空变异特性、灌溉系统的分形特征及其识别方法、水资源系统的混沌特性及其预测模型、基于小波分析的水资源系统智能随机模拟预测方法、水资源系统多目标混沌优化算法、水资源系统多目标自优化随机模拟调度技术、水资源优化配置多目标演化算法、水资源系统协同学评价模型、水资源复杂系统评价方法、基于自优化模拟技术的水资源系统风险分析理论、基于MCMC的河流水质风险管理模型等;重点介绍了上述理论与方法在南水北调中线工程及汉江中下游水资源系统、举水流域水资源系统、漳河水库灌区复杂灌排系统、湖南韶山灌区作物耗水系统等方面的最新应用研究成果,丰富和发展了水资源系统分析理论与方法,对区域、流域及跨流域水资源系统综合管理具有重要参考意义与广泛应用前景。

本书可供水文水资源、农业水利、系统工程、管理科学等领域从事水资源规划与管理及系统分析等相关研究的科研、工程技术人员,以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水资源复杂系统理论/邵东国等著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034290-4

I. ①水… II. ①邵… III. ①水资源—复杂性理论 IV. ①TV211

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第093566号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:耿 耘
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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

*

2012年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:25 3/4

字数:503 000

定价:78.00 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 010-62137154 (BZ08)

版权所有, 侵权必究

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

前 言

水资源作为生命之源、生产之要、生态之基，事关国家粮食安全、经济安全与生态安全，是国家战略资源与重要的安全保障。随着社会经济的快速发展，南水北调、三峡等大规模水利水电工程建设与城市化发展等人类活动加剧了水资源系统的演变，使得水资源可持续高效利用的影响因素及其相互作用关系更加复杂，水资源系统的非线性与不确定性等复杂性日趋明显。水资源系统的复杂性正成为世界水科学研究的前沿热点。

气候变化与人类不合理的水资源开发、利用、配置和保护，导致区域、流域乃至跨流域水资源短缺、水旱灾害与水环境污染等问题更加突出，已成为制约水资源可持续利用与经济社会可持续发展的关键因素。2011 年，中共中央、国务院在《关于加快水利改革发展的决定》中明确提出：把严格水资源管理作为加快转变经济发展方式的战略举措，建立最严格的水资源管理制度，即确立水资源开发利用控制红线，建立取用水总量控制指标体系；即确立用水效率控制红线，把节水工作贯穿于经济社会发展和群众生产生活全过程；确立水功能区限制纳污红线，严格控制入河湖排污总量。这就需要深刻认识水资源系统开发、利用、节约、配置与保护之间的动态发展关系，以及水资源系统内部来水、耗水、用水、取水、排水、水体自净、泥沙输移、生态修复等诸环节的自身演化机制与规律，正确把握水资源系统与社会经济系统、生态环境系统之间的相互作用关系，从更加宏观的层面上揭示强人类活动与气候变化对水资源系统演化的影响机理与作用机制，深入揭示水资源系统内部来水、耗水、用水、取水、排水、物质输移的复杂性及自身演化规律，这是建立最严格水资源管理制度的重要基础。

近 10 年来，在国家自然科学基金项目“灌区水资源高效利用多维临界调控模型（50679068）”、湖北省自然科学基金重大项目“面向生态的水资源多目标混沌优化配置理论与方法（2007ABD007）”、国家“973”计划课题“长江流域水沙资源优化配置理论与模型（2003CB415206）”、湖北省水利重点科研项目（HB-SHLKJ2007K004）以及水资源与水电工程科学国家重点实验室专项经费等支持下，对灌区水资源系统、流域水资源系统以及南水北调、引江济汉等跨流域调水系统的复杂性进行了深入研究，首次提出了灌溉系统的分形特征与多目标混沌遗传优化算法（MCGOA）、基于小波变换与 BP 神经网络结合的参考作物潜在腾发量预测模型、基于可变外部存储多目标演化策略（DAES）算法的水资源优化配置模型、基于混沌神经网络综合评价模型（CNNCE）、改进的突变评价法的模

型、基于自优化-随机模拟技术的供水风险分析模型、基于 MCMC 理论的水环境风险分析模型等，初步建立了水资源复杂系统理论方法体系。本书对这些研究成果进行了系统总结，比较全面地阐述了水资源系统中径流、用水、耗水、排水、水质、生态需水等不同过程的复杂性及其分析方法与最新应用研究成果。

全书在分析灌区、流域、跨流域等不同尺度水资源系统的复杂性及其研究动态的基础上，重点阐述了水资源复杂系统的理论基础、灌溉系统分形理论、水资源系统混沌分析理论、水资源系统智能化随机模拟预测模型与方法、水资源系统多目标混沌优化算法、水资源系统自优化随机模拟调度技术、水资源优化配置多目标演化算法、水资源系统协同学评价模型、水资源复杂系统综合评价方法、水资源系统风险分析方法、水质风险管理模型等。应用该理论、模型与方法体系，对南水北调中线工程及汉江中下游地区水资源系统、举水流域水资源系统、漳河水库灌区水资源系统等进行了实例研究，取得一系列实用性成果，丰富和发展了水资源系统分析理论、方法及应用，对灌区、流域及跨流域水资源系统综合管理具有重要参考意义与广泛应用前景。

在多年课题研究与本书撰写过程中，邵东国教授负责全书的内容研究与统稿工作。刘丙军博士负责第 3 章内容以及第 6 章、第 11 章部分内容的研究与撰写；阳书敏博士负责第 9 章、第 10 章内容的研究与撰写；黄显峰博士负责第 4 章、第 5 章、第 7 章以及第 11 章部分内容的研究与撰写；顾文权博士负责第 12 章、第 13 章内容的研究与撰写；代涛博士负责第 8 章部分内容的研究与撰写；唐明博士负责第 11 章部分内容的研究与撰写；邓宇杰负责第 6 章、第 8 章部分内容的研究与撰写；王龙负责第 11 章部分内容的研究与撰写；杨丰顺博士负责第 2 章内容的研究与撰写，并参与全书的统稿工作。同时，衷心感谢本书所引用参考文献的作者们曾做的大量工作！

在本书撰写过程中，得到了武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室、水利水电学院领导与老师们的大力支持，在此一并表示诚挚的感谢。

由于时间和水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正！

著 者

2011 年 11 月

于珞珈山

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水资源特性及其系统构成	1
1.1.1 水资源特性	1
1.1.2 水资源系统组成	4
1.1.3 影响水资源系统结构与功能的因素	5
1.2 水资源系统的复杂性	8
1.2.1 水资源系统复杂性特征	8
1.2.2 水资源系统复杂性研究动态	11
1.3 水资源复杂系统理论体系	19
1.3.1 水资源复杂系统理论基础	19
1.3.2 水资源复杂系统理论研究内容	21
1.3.3 水资源复杂系统的整体技术路线	26
1.4 水资源复杂系统理论研究成果	27
1.4.1 主要成果	27
1.4.2 创新点	30
1.5 小结	31
第 2 章 水资源复杂系统理论基础	32
2.1 复杂系统	32
2.1.1 复杂系统的内涵	32
2.1.2 复杂系统特征	34
2.2 复杂系统研究动态	36
2.3 复杂系统基本理论	40
2.3.1 非线性系统理论	40
2.3.2 随机系统理论	56
2.3.3 复杂适应系统理论	60
2.3.4 自组织理论	63
2.3.5 信息熵理论	67
2.4 复杂系统建模方法	71
2.4.1 复杂系统建模思想	71
2.4.2 复杂系统建模体系	72

2.5 小结	73
第3章 灌溉系统分形特征识别方法	74
3.1 参考作物潜在腾发量时间分形特征	74
3.1.1 基本原理	74
3.1.2 韶山灌区参考作物潜在腾发量的时间分布	75
3.1.3 韶山灌区参考作物潜在腾发量时间分形特征	77
3.2 参考作物潜在腾发量空间分形特征	79
3.2.1 基本原理	79
3.2.2 湖南省参考作物月平均逐日潜在腾发量空间分布	81
3.2.3 湖南省参考作物月平均逐日潜在腾发量空间分形特征	82
3.3 灌溉渠道系统分形特征	84
3.3.1 灌溉渠系空间分形特征分析	85
3.3.2 灌溉渠系灌水模数与分形维数的相关性	87
3.3.3 漳河灌区灌溉渠道系统分形特征研究	90
3.4 小结	92
第4章 水资源系统混沌特性识别方法	94
4.1 系统混沌特性描述	94
4.2 复杂系统相空间重构技术	95
4.2.1 系统相空间重构基本思想	95
4.2.2 时间延迟的确定	97
4.2.3 嵌入维数的确定	100
4.2.4 C-C 算法	103
4.3 系统混沌特性识别方法	104
4.3.1 功率谱分析法	105
4.3.2 李雅普诺夫指数法	106
4.3.3 饱和关联维数法	107
4.4 举水流域水资源系统混沌特性识别	109
4.4.1 举水流域来水过程混沌特性识别	109
4.4.2 举水流域用水过程混沌特性识别	113
4.5 汉江中下游水资源系统混沌特性研究	114
4.6 小结	118
第5章 水资源系统混沌预测模型与方法	119
5.1 混沌预测基本理论	119
5.1.1 系统预测	119
5.1.2 混沌预测原理	120
5.1.3 混沌预测方法	121

5.2 基于最大李雅普诺夫指数的混沌时间序列预测	124
5.2.1 基于最大李雅普诺夫指数的混沌预测模型	124
5.2.2 基于最大李雅普诺夫指数的混沌预测步骤	124
5.2.3 预测实例	125
5.3 基于支持向量机的混沌时间序列预测	127
5.3.1 统计学习理论	127
5.3.2 支持向量机预测原理	128
5.3.3 基于相空间重构的 SVM 预测方法	130
5.3.4 预测实例	131
5.4 基于逻辑斯谛的混沌时间序列预测	134
5.4.1 逻辑斯谛预测模型原理	134
5.4.2 逻辑斯谛连续模型与离散模型	136
5.4.3 预测实例	137
5.5 举流域经济社会需水量混沌预测研究	140
5.6 小结	143
第 6 章 水资源系统智能随机模拟预测模型与方法	144
6.1 引言	144
6.2 水文过程随机模拟模型	144
6.2.1 水文随机模拟的蒙特卡罗方法简述	144
6.2.2 伪随机数的产生	145
6.2.3 P-III 型分布纯随机序列的模拟	146
6.2.4 丹江口水库径流量随机模拟计算	146
6.3 小波分析模型	152
6.3.1 小波函数定义与时频局部化特性	152
6.3.2 小波变换模型	154
6.3.3 多分辨分析方法	156
6.3.4 韶山灌区参考作物潜在腾发量多时间尺度小波分析	160
6.4 水资源系统智能小波分析模型	167
6.4.1 改进的 BP 神经网络模型	167
6.4.2 基于智能小波分析的丹江口水库径流预测	171
6.4.3 基于智能小波分析的韶山灌区参考作物潜在腾发量预测	176
6.5 小结	182
第 7 章 水资源系统多目标混沌优化方法研究	183
7.1 混沌优化方法	183
7.1.1 系统非线性优化	183
7.1.2 混沌优化算法思想	187

7.1.3	混沌优化算法步骤	187
7.1.4	混沌优化算法的收敛性	188
7.2	混沌遗传优化算法	189
7.2.1	基本思想	189
7.2.2	遗传算法	190
7.2.3	混沌遗传优化算法的步骤	191
7.2.4	混沌遗传优化算法算例	192
7.3	多目标混沌遗传优化算法研究	195
7.3.1	基本思想	195
7.3.2	多目标决策技术	196
7.3.3	多目标混沌遗传优化算法步骤	198
7.4	举水流域水资源多目标混沌优化配置模型与方法研究	201
7.4.1	水资源优化配置数学模型	201
7.4.2	配置模型参数率定	204
7.4.3	MCGOA 算法求解技术及配置成果	206
7.5	小结	212
第 8 章	水资源系统自优化随机模拟调度技术	213
8.1	自优化模拟决策的基本原理	213
8.2	基于自优化模拟技术的水库水资源配置研究	214
8.2.1	基本思路	214
8.2.2	数学模型	214
8.2.3	模型求解方法	216
8.2.4	丹江口水库及汉江中下游地区水资源配置研究	218
8.3	水库自优化随机模拟调度模型与方法	224
8.3.1	水库自优化随机模拟调度数学模型	224
8.3.2	自优化随机模拟调度计算方法与步骤	225
8.3.3	自优化随机模拟调度成果与分析	229
8.4	小结	230
第 9 章	水资源优化配置多目标演化算法	231
9.1	可变外部存储多目标演化策略 (DAES)	231
9.1.1	DAES 算法	231
9.1.2	编码方式	231
9.1.3	演化操作	232
9.1.4	适应值分配方式	234
9.1.5	外部存储集添加规则	234
9.1.6	外部存储集减少规则	234

9.1.7 约束控制规则	235
9.2 实例测试	235
9.2.1 可视化比较	236
9.2.2 性能指标分析	236
9.3 水资源优化配置整体模型的 DAES 求解	238
9.3.1 水资源优化配置整体模型	238
9.3.2 大系统分解协调与 DAES	242
9.4 汉江中下游干流供水区水资源多目标优化配置研究	244
9.4.1 水源与用水部门	244
9.4.2 水资源可利用量上限及需水量	245
9.4.3 模型参数	246
9.4.4 水资源优化配置结果及其分析	246
9.5 小结	257
第 10 章 水资源系统协同学评价方法	258
10.1 协同学应用基础	258
10.1.1 水资源系统的协同机理	258
10.1.2 水资源系统序参量	260
10.1.3 水资源系统序参量的分级阈值	262
10.2 有序度评价模型	262
10.2.1 子系统有序度模型	262
10.2.2 水资源系统有序度模型	263
10.3 协调度评价模型	264
10.3.1 复合系统协调的数学描述	264
10.3.2 水资源优化配置的协调机理	265
10.3.3 协调度评价模型	265
10.4 公平度评价模型	267
10.4.1 配置方案的公平性评价	267
10.4.2 Matheson 公平度模型	267
10.4.3 公平度评价模型	268
10.5 可持续度评价模型	270
10.5.1 配置方案的可持续性评价	270
10.5.2 可持续度评价模型	271
10.6 汉江中下游水资源配置方案综合评价	271
10.7 小结	273
第 11 章 水资源复杂系统综合评价模型与方法	274
11.1 水资源系统综合评价	274

11.2	水资源系统混沌神经网络综合评价模型	274
11.2.1	混沌神经元网络	274
11.2.2	混沌神经网络综合评价模型	276
11.2.3	举水流域水资源配置效果评价	279
11.3	水资源系统耗散结构评价模型	286
11.3.1	河流系统的耗散结构模型	286
11.3.2	东江河流水量水质评价	289
11.4	基于突变理论的旱灾风险多准则评价方法	293
11.4.1	常规突变评价法存在的缺陷与改进方法	293
11.4.2	基于突变理论的旱灾风险多准则评价法	294
11.4.3	安徽省各市旱灾风险总体评价	297
11.5	基于遗传算法与证据理论的河流健康综合评价模型	299
11.5.1	综合评价的目标与原则	299
11.5.2	基于 Gray 码加速遗传算法的指标权重模型	299
11.5.3	基于证据理论的河流健康综合评价模型	305
11.5.4	基于遗传算法和证据理论的长江流域河流健康评价	309
11.6	小结	314
第 12 章	水资源系统风险分析理论与方法	315
12.1	水资源系统风险分析基础	315
12.1.1	水资源系统中的不确定性分析	315
12.1.2	水资源系统风险的概念与特征	316
12.1.3	水资源系统风险分析基本方法	318
12.2	基于自优化模拟的水资源系统供水风险分析模型与方法	324
12.2.1	供水系统风险因子识别	324
12.2.2	主要风险因子随机模拟技术	327
12.2.3	基于自优化-随机模拟技术的供水风险分析模型	335
12.3	水资源配置风险评价理论与方法	342
12.3.1	水资源优化配置的风险识别	342
12.3.2	水资源优化配置风险评价模型与方法	343
12.4	汉江中下游水资源系统风险分析	347
12.4.1	南水北调中线调水 95 亿 m ³ 后汉江中下游干流供水风险分析	347
12.4.2	汉江中下游水资源配置风险分析	361
12.5	小结	364
第 13 章	水质风险管理理论与方法	365
13.1	引言	365

13.2	基本理论	366
13.2.1	贝叶斯统计方法	366
13.2.2	马尔可夫链	367
13.3	MCMC 抽样方法	369
13.3.1	Metropolis-Hasting 抽样方法	369
13.3.2	吉布斯抽样方法及满条件分布	370
13.4	吉布斯方法在水环境风险中的应用研究	372
13.4.1	基本资料及先验分布	372
13.4.2	模型的建立及满条件概率推导	374
13.4.3	模型的收敛性判断及计算结果分析	376
13.4.4	数据缺失情况的水质风险分析	382
13.5	模糊多目标水质管理模型与求解方法	383
13.5.1	模糊优化理论概述	383
13.5.2	模糊多目标水质管理模型的构建	384
13.5.3	模糊多目标水质管理模型求解方法	388
13.6	水质管理风险分析模型	391
13.7	汉江中下游水质管理风险分析	391
13.8	小结	395
主要参考文献		396

第 1 章 绪 论

1.1 水资源特性及其系统构成

1.1.1 水资源特性

水是一切生命的来源，社会生产的重要资源和生态环境的重要因子。地球上水量丰富，约有 13.86 亿 km^3 水储量，但可供人类生存所需的淡水资源却十分有限，仅占地球水圈总水量的 2.53%，且主要分布在冰川、永久积雪和地下水中。如果考虑到现有的经济、技术能力与生态系统稳定等因素，扣除不宜取用或目前暂时无法取用的冰川积雪及深层地下水，理论上可开发利用的淡水不到地球总储存水量的 1%。淡水作为人类社会赖以依存的可更新的重要资源与生态系统不可缺少的关键因子，是十分宝贵的。

但是，并非所有的淡水都属于水资源。受水的表现形式多样性（如降水、地表水、土壤水、地下水、植物水等）及其复杂的相互转化关系影响，水的流动、侵蚀及生物化学等特性进一步增加了水量水质的时空差异性，直接影响到社会经济发展的基本条件与生态环境系统的质量状态。因此，联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）定义水资源为“可资利用或有可能被利用的水源，但应具有足够的数量和可用的质量，并在某一地点为满足某种用途而被利用”。水资源具有以下特性：

（1）循环可再生性。水资源是在水循环过程中形成的一种动态资源，既在气候变化过程中不断得到大气降水的补给并通过蒸发补充大气水分，又在经济活动过程中不断被开采、利用、消耗和再生，以满足人类活动和生态平衡需求，具有明显的“自然-社会”二元水循环过程特征，可供人类与自然生态系统再生利用。

（2）储量有限性。虽然水循环过程是无限的，但水资源储量是有限的。如某一期间的水量消耗量超过该期间的水量补给量，则可能会破坏水量平衡状态，导致湿地萎缩、植被退化、生物多样性消失等一系列不良的生态问题。

（3）属性动态转化性。水资源属性动态转化过程，既包括液态、固态水的汽化和水汽凝结成降水的过程，也包括降水在地球表面形成的地表水、土壤水、地下水的聚集及其相互转化过程。由于各种不同水体的边界并非完全封闭，与外界环境存在各种物质能量交换关系，气候与土地利用/覆被条件等下垫面变化都可

能改变水资源量与质的时空变化及其相互转化关系,因此,水资源系统属于一类相互联系与相互转化的开放系统。

(4) 时空分布非均衡性。受大气环流和重力的作用,降雨在地球表面产流、汇集过程,总是在一定地域从高向低处流动,这就决定了水资源的演变转化过程总是在流域分水岭之间进行,显现出明显的气候地域特征,具有一定的时间与空间分布非均衡性。随着社会经济状态不同,各地区或流域对水资源的消耗及其使用后的废弃水排放量与质也不会相同,存在不同时间与地域上水资源数量与质量的差异性。在我国,水资源分布呈现出东南多而西北少,沿海多而内陆少,山区多而平原少,经济发达地区水质较差但经济欠开发区水质相对较好的态势。

(5) 因果随机性。自然界中可更新的水资源主要来源于大气降水和冰川融雪水,其循环转换具有因果关系。大气降水和冰川融雪水在时空上存在随机性,导致水资源转化过程中有随机性。如某一区域既有丰、平、枯三种年型,又有连枯连丰情况,一年当中还有枯水期和丰水期,这种变化都是随机的,具有一定的统计规律。

(6) 用途广泛性。水资源广泛用于人类各种生产、生活活动以及自然生态活动,一般可分为河道内用水与河道外用水,其中,河道外用水基本上是消耗性用水,河道内用水则是非消耗性或消耗很小的用水。生产、生活、生态等不同目的的用水对水质的要求亦不相同。这就有利于“一水多用”与排水再利用,充分发挥水资源综合利用效益,提高用水效率。

(7) 不可替代性。水是生命的摇篮,是一切生物的命脉。成人体内含水量占体重的 66%,哺乳动物含水量为 60%~68%,植物含水量为 75%~90%。水在维持人类生存发展和生态系统稳定方面具有不可替代性。

(8) 利害两重性。适量的水资源是维持经济社会可持续发展与生态环境系统健康的重要资源。但过量的水资源可能造成洪、涝、渍、盐碱灾害;过少的水量容易影响作物生长与产量,导致植被退化与土地荒漠化;水太脏又容易导致水生生物死亡、生物多样性丧失、景观旅游环境破坏,严重时甚至危害人类健康。水资源这种利害两重性,要求在水资源开发利用中强调统筹规划和合理调控,以达到兴利除害之目的。

(9) 价值脆弱性。气候变化与人类活动容易改变水循环过程与水资源时空分布规律,影响区域或流域水动力学过程、水资源供需态势及其时空格局,从而极易造成新的水资源调配矛盾。水多时,水资源价值贬值甚至产生洪涝灾害负效益;水少时,出现争水矛盾并由此形成稀缺资源而大幅度增值。大量排污与水动力学条件改变,还影响地表与地下水体的自净能力、生物多样性及水环境承载能力,造成水资源价值贬值。因此,水资源量与质都是一种极受人类活动与气候变化影响的自然资源,具有明显的脆弱性。

我国多年平均水资源总量 28 124.4 亿 m^3 ，其中，多年平均径流总量 27 115 亿 m^3 ，年均地下水资源量为 8288 亿 m^3 ，重复计算量 7279 亿 m^3 ；水资源总量占全球 6%，居世界第 6 位；但多年平均降水总量 62 000 亿 m^3 ，折合降水深 648mm，低于全球陆地平均值约 20%，且其中约 56% 消耗于陆面蒸发，44% 转化为地表和地下水资源。按 2000 年人口统计，人均水资源量 2220 m^3 ，约为世界均值的 1/4；2030 年我国人口预计将达 16 亿，人均水资源将降低到 1760 m^3 ，基本接近国际公认少于 1700 m^3 时为用水紧张国家标准；亩均水资源量 1888 m^3 ，为世界亩均的 80%。我国已被列为世界 13 个贫水国之一。

我国水资源时间分布极不均匀。全国大部分地区每年 6~9 月的降水量占全年的 60%~80%；年径流历年最大和最小的比值，在长江、珠江、松花江流域为 2~3 倍，黄河流域是 4 倍，淮河、海河流域则高达 15~20 倍；受此影响，我国水资源总量中约 2/3 的洪水径流量很难被利用。

此外，我国水资源空间分布极不合理，水土资源配置严重失调。在全国水资源总量中，81% 集中分布在长江及其以南地区，而黄、淮、海三大流域土地面积占全国的 13.4%，耕地面积占 39%，人口占 35%，水资源量却仅占 7.7%，人均水资源量约 500 m^3 ，耕地亩均水资源少于 400 m^3 ，是我国水资源最为紧缺的地区。

考虑到水资源时空特性、水资源开发利用技术和生态环境约束等，我国水资源可利用总量远低于 28 000 亿 m^3 。国际水资源管理研究所（IWMI）认为我国可利用水资源量为 8100 亿 m^3 ；刘昌明等（1995）认为我国水资源最大可开采量为 11 000 亿 m^3 。

随着社会经济的快速发展，全球水资源短缺与污染问题日益凸显。据调查统计，世界上有 12 亿人口得不到安全用水的保证，25 亿人缺少必要的用水卫生设备，每年有 200 万人死于缺水和用水卫生设备差引发的疾病；到 2025 年，水供应紧张国家的人口占世界总人口的比例将从现在的 1/3 增至 2/3。水资源问题已经成为关系到贫困、可持续发展乃至世界和平与安全的重大问题。在中国，经常干旱缺水地区面积达 500 万 km^2 ，占我国陆地面积的 52%，其耕地面积占全国的 64%，人口占全国的 45%；全国 660 多个建制城市中，缺水城市有 400 多个，其中严重缺水城市有 114 个，日缺水量高达 1600 万 m^3 ，每年因缺水造成的直接经济损失达 2000 亿元。2008 年，全国河流 IV 类水河长占 11.4%，V 类水河长占 6.8%，劣 V 类水河长占 20.6%；湖泊 IV 类和 V 类水的面积占 32.5%，劣 V 类水的面积占 23.3%。受此影响，全国城镇水质不安全的人口达 0.72 亿人。全国 25% 的地下水体遭到污染，平原区约有 54% 的地下水不符合生活用水水质标准。约有 3.2 亿人农村饮水不安全，其中 1.9 亿人饮用水有害物质含量超标。随着我国经济的持续发展，2020 年将缺水 300 亿~500 亿 m^3 。水资源短缺与污染问题

已经成为制约中国国民经济和社会发展的重要因素。

1.1.2 水资源系统组成

水资源系统是以水为主体,在一定范围或环境内,为实现水资源开发利用目标,由相互联系、相互制约、相互作用的若干工程单元和管理技术单元组成的具有特定功能的人工-自然结合体,具有自然与社会“二元”结构系统特征。

按水源组成划分,水资源系统包括地表水资源系统、地下水资源系统及其他非常规水资源系统。其中,地表水资源是指存在或运动于地球表面上的可资利用或有可能被利用的江河、湖库、沼泽、冰川里的动态淡水资源量,一般用径流量来表示。在地表水资源系统中,河流水系、湖泊水库是最主要的组成部分,它们与人类生产生活关系最为密切。地下水资源是指埋藏和运动于地面以下可资利用或有可能被利用的不同深度的岩层孔隙、裂隙或溶洞中的重力水。岩石空隙是地下水存储场所和运动通道。空隙的多少、大小、形状、连通情况和分布规律,对地下水的分布和运动具有重要影响。地下水的补给来源有大气降水、地表水、大气中的水蒸气、包气带和岩石中的水以及人工补给等,但其主要补给来源是大气降水和地表水。其他非常规水资源系统包括雨洪水积蓄利用与废污水、微咸水、海水等的再生利用。

按照水资源系统的组成结构划分,水资源系统包括来水、取水、蓄水、输配水、用水、排水及其再生利用与管理系统。其中,来水系统包括区域降水、地表径流、地下水、跨流域调水等各种水源系统;取水系统包括各种改变水的流动过程及时空位置的控制措施,如水闸、水泵等取水工程系统;蓄水系统包括水库、湖泊、塘堰洼淀、水窖、地下含水层等各种水量调蓄设施;输配水系统包括各级渠道、管道、隧洞、渡槽、涵洞等输水、配水与量水设施;用水系统包括人们生产、生活用水与生态环境用水等的供水、耗水、节水设施;排水系统包括排泄雨洪、涝渍等多余水量或生活、生产废弃水等及其污水处理与再生利用设施;管理系统是水资源系统中的非工程系统,包括水资源管理的机构、体制、法规、政策、方法、手段以及水价管理与水权交易机制等。

按照水资源系统建设的目的与功能划分,一类为可直接创造经济效益与价值的兴利系统,包括发电、灌溉、供水、引调水、航运及其综合利用等;另一类是以除害减灾为目的水利防灾减灾系统,包括防洪、排涝、排盐、拦污截污及其处理系统等。显然,它们的管理目标是完全不同的,系统的结构与功能也会存在较大差异;但随着水资源供需矛盾加剧,洪水管理与中水再利用技术不断提高,防洪、兴利、减灾之间的联系与相互转化会更加频繁多样。

不管水资源系统如何分类,由于组成该系统的主要物质形式是水及其有关的自然、社会、经济、工程技术、生态环境等因素,因此,它既是自然系统的一部