

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

黄淮海流域水资源 配置模型研究

赵建世 杨元月 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

黄淮海流域水资源 配置模型研究

赵建世 杨元月 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

水资源系统是典型的“人类-自然耦合系统”或“自然-人工二元系统”，这要求我们在经济社会和生态环境协调发展的大背景下，更新水资源系统分析的基本理论框架和规划管理对策。本书首先介绍水资源系统分析的起源、发展历程、研究前沿和未来趋势，在此基础上提出了面向人类-自然耦合的水资源配置整体模型系统的理论方法、模型结构和定量方程。结合我国黄河流域、海河流域和淮河流域的规划管理问题，分别建立这三个流域的水资源系统整体模型，分析未来社会经济发展和工程建设情景下的水资源供需情景和经济、社会、生态影响，并提出了相关的研究结论和政策建议。

本书可供大专院校、研究机构和管理部门的相关专业人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄淮海流域水资源配置模型研究 / 赵建世著. —北京: 科学出版社, 2015. 8

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-045354-9

I. 黄… II. 赵… III. ①黄河流域-水资源管理-研究②淮河-流域-水资源管理-研究③海河-流域-水资源管理-研究 IV. TV213.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第189355号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015年8月第一次印刷 印张: 11 插页: 2

字数: 550 000

定价: 110.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目(2006CB403400)

“十一五” 国家科技支撑计划 (2006BAB04A16)

资助

总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在 2010 年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域 973 计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河 973 计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011 年 10 月 10 日

序

水资源的利用伴随着整个人类社会发展的历程，自从人类社会对自然界的水进行开发利用伊始，水就成为一种最基础的资源。目前，随着经济社会的快速发展，一方面水资源对于人类社会的重要性日益增加，另一方面人类社会对水资源系统影响的深度和广度也在逐渐加大，水资源利用相关问题的复杂性不断增加。由于气候变化的影响和经济社会取—耗—排水量的增加，水资源稀缺与水生态环境退化问题已在全球范围内成为一种正在发生或是潜在的挑战。科学理解变化环境下水资源系统、社会经济系统和生态环境系统之间的相互作用关系，探索系统的演变与发展规律和相互作用关系，并在此基础上做出符合自然规律和经济规律的水资源规划与管理决策，是实现水资源可持续利用的科学的科学基础。

黄河流域、海河流域和淮河流域在我国的重要性毋庸置疑，其水资源短缺和生态环境问题也非常突出。南水北调是我国全局性的水资源配置工程，对于缓解黄淮海流域严重的缺水紧张局面具有重要的战略意义。目前东、中线工程已经正式通水，在大规模的外调水进入后，如何高效利用这些宝贵的水资源？未来黄淮海流域水资源供需形势究竟如何？南水北调后续工程的必要性和时机如何判断？这些问题对于黄淮海流域甚至全国的水资源配置与管理都是至关重要的。为此，国家设立了“十一五”国家科技支撑计划“南水北调水资源综合配置技术研究”（编号：2006BAB04A16）和国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）以及一系列相关的重大科研项目进行专门的研究，针对性地回答了这些问题，为黄淮海流域的水资源配置以及南水北调工程的科学管理提供了基础性的科技支撑。

在支持我国重大国家需求的同时，项目的研究成果在水资源系统分析的基础理论方面也有显著的进展，尤其是在面向人类—自然耦合的二元水资源系统模型方面的成果，学术意义重大。基于人类—自然水资源系统的复杂特性，只有将社会科学方面的理论方法（如宏观经济学、计量经济学、资源经济学、人口社会学等）与自然科学方面的理论方法（如水资源系统分析、水文学、水环境学、生态学等）有机融合，才能够真正建立适合二元水循环模式的水资源配置理论与模型，为分析水系统、社会经济系统和生态环境系统之间的相互作用提供科学工具。基于此基本思路，本书明确提出了面向人类—自然耦合的水资源

配置整体模型系统，并结合黄淮海流域以及南水北调工程的实际情况，对相关的重大配置、管理问题进行了定量分析，为相关问题的决策提供了重要的科学参考，并在黄淮海流域的管理实践中得到了应用。

本书对相关项目成果中的水资源配置研究部分进行了全面和系统的总结，形成了理论方法、系统模型和应用案例等章节，可以更好地服务于我国水资源配置的科学研究和生产实践。

中国水利水电科学研究院
水资源研究所所长



2015年8月

前 言

黄河流域、海河流域和淮河流域地位重要，但水资源问题突出。三大流域总面积约为 144 万 km^2 ，约占全国的 15%；总人口约为 4.5 亿，约占全国的 35%，其中城镇人口约 1.9 亿。这一地区土地资源丰富，是中国重要的农业经济区和粮食、棉花主产区；能源和矿产资源丰富，如煤、石油、天然气、铁、铝、石膏、石墨、海盐等储量居全国前列。另外，北京、天津、石家庄、济南、青岛、郑州、兰州、西安、太原、呼和浩特、西宁等大城市在我国国民经济与社会发展中具有重要的战略地位。但这三个流域的水资源问题突出，径流减少、供需矛盾尖锐、水污染严重、地下水超采、水生态环境退化等问题，对社会经济的发展和生态环境的维持都造成了严重的威胁。特别是在未来水资源条件不断变化、社会经济可持续发展的情况下，如何科学合理地规划利用有限的水资源，成为这一区域不可避免的核心问题之一。

水资源是一个典型的人类-自然耦合系统，任何单学科的理论方法都无法描述其内在的复杂性。本书立足于开放、复杂的大系统背景，将宏观经济学、计量经济学、资源经济学、人口社会学等社会科学，以及水资源系统分析、水文学、水环境学、生态学等自然科学进行融合，以流域系统可持续为核心，以动态模拟流域重要人类-自然交互过程为基础，提出面向人类-自然耦合的水资源系统模型的理论框架。以此为基础，建立完整的方法体系，包括面向人类系统的人口增长模拟、投入产出分析，面向自然系统的水量调度、水生态环境评估，以及描述二者交互作用的水工程投资分析、水资源供需模拟，并采用整体模型技术、情景生成与方案评估技术、多目标分析与群决策技术实现了人类和自然两个子系统的动态耦合，从而建立基于新的方法论的流域水资源系统分析理论方法体系。基于这一整体的分析框架和模型方法，本书对黄河流域、海河流域和淮河流域的水资源问题进行了情景分析，重点分析了未来不同水资源条件、不同工程措施、不同管理措施和不同经济社会发展模式条件下，流域的水资源供需情景和工程、非工程对策。

本书的案例研究部分是在作者承担的一些研究项目的基础上总结提炼而成，这些研究

项目主要包括：黄河流域综合规划修编专题研究、黄河水量统一调度十年效果评价、华北地区的生态水文变化及水资源管理对策、淮河流域生态用水调度、南水北调水资源综合配置技术研究等。在此谨对相关项目的资助方以及在相关课题研究过程给予无私帮助和辛勤劳动的单位和专家表示感谢。

作 者

2015 年 3 月

目 录

总序
序
前言

第1章 水资源配置模型研究进展	1
1.1 水资源系统分析的起源与发展	1
1.1.1 传统水资源系统分析的起源与发展	1
1.1.2 面向人类-自然耦合的水资源系统分析	2
1.2 水资源配置模型国内外研究现状	3
1.2.1 传统的优化模型与模拟模型	3
1.2.2 组合模型方法与整体模型方法	4
1.2.3 水资源宏观经济投入产出分析	6
1.2.4 资源问题的微观经济学方法	7
1.2.5 水资源配置的时空特性研究	7
1.2.6 基于主体的建模方法	8
1.3 小结	9
第2章 面向人类-自然耦合的水资源配置整体模型系统	10
2.1 人类-自然耦合水资源系统模拟理论与方法	10
2.1.1 水资源系统的人类-自然耦合特性及其挑战	10
2.1.2 面向人类-自然耦合的水资源系统模拟理论与方法体系	10
2.1.3 面向人类-自然耦合的水资源系统多过程模拟关键技术	11
2.2 模型系统功能及构成	13
2.2.1 模型功能需求	13
2.2.2 模型系统构成	15
2.3 模型构建	16
2.3.1 人口模型	16
2.3.2 宏观经济预测模型	18
2.3.3 需水与节水预测模型	22

2.3.4	水污染负荷排放及调控预测模型	24
2.3.5	水量平衡分析模型	25
2.3.6	多目标与群决策模型	26
2.3.7	水资源整体模型的耦合	28
2.4	模型机制	29
2.4.1	模型间关系	29
2.4.2	整体模型机制	29
第3章	黄河流域水资源整体模型与情景设置	32
3.1	黄河流域概况与整体模型设置	32
3.1.1	黄河流域概况	32
3.1.2	整体模型中的基本空间单元	35
3.1.3	模型时间设定	39
3.1.4	水文系列数据	39
3.2	模型重要边界设定	39
3.2.1	国务院分配指标的影响	39
3.2.2	水量统一调度的影响	40
3.2.3	黄河水资源承载状况	40
3.2.4	外流域调水量配置方案	41
3.2.5	水库调度规则的设定	42
3.3	参数率定与设定	43
3.3.1	节水模式与用水定额	43
3.3.2	治污情景及其表征参数	48
3.3.3	水投资参数	48
3.3.4	宏观经济调控参数	51
3.4	模型的验证	52
3.4.1	水量平衡关系验证	53
3.4.2	水资源利用关系验证	53
3.5	情景方案设置	54
第4章	黄河水资源调度与配置情景分析	55
4.1	水量统一调度宏观经济模拟评估	55
4.1.1	黄河水量统一调度实施背景	55
4.1.2	研究思路与技术路线	57
4.1.3	水量统一调度以来国民经济与水资源利用基本情况	58

4.1.4 统一调度实施效果的宏观经济分析	66
4.1.5 水情比较分析	74
4.2 黄河水资源承载能力情景分析	74
4.2.1 研究思路与方法	75
4.2.2 情景方案	75
4.2.3 节水情景分析	77
4.2.4 治污情景分析	77
4.2.5 综合情景分析	78
4.3 外流域调水量配置方案宏观效果情景评估	81
4.3.1 研究思路与方法	81
4.3.2 情景方案成果	81
4.3.3 外流域调水对黄河流域经济社会发展影响情景分析	83
4.3.4 外流域调水对维持黄河健康生命的作用	85
4.4 黄河流域案例研究小结	86
第5章 海河流域水资源配置整体模型与情景设置	89
5.1 海河流域概况与整体模型设置	89
5.1.1 海河流域概况	89
5.1.2 海河流域整体模型时空范围设定	92
5.2 海河流域水资源配置情景边界设定	94
5.2.1 节水力度情景分析	94
5.2.2 水资源保护力度情景分析	95
5.2.3 地下水超采情景分析	96
5.2.4 南水北调工程情景分析	97
5.2.5 枯水系列情景分析	98
5.2.6 气候变化系列情景分析	98
5.3 海河流域水资源利用情景组合	99
5.3.1 方案编码	99
5.3.2 方案组合	100
第6章 海河流域水资源配置情景分析	102
6.1 方案对比和情景分析	102
6.1.1 在现状条件下	102
6.1.2 在可能发生的连续枯水年的条件下	117
6.1.3 在可能出现的气候变化条件下	120

6.1.4	气候变化情境下水资源变化的经济影响与风险预留估算	125
6.2	海河流域案例研究小结	127
第7章	淮河区水资源配置整体模型与情景设置	128
7.1	淮河区概况与整体模型设置	128
7.1.1	淮河区概况	128
7.1.2	淮河区整体模型时空范围设置	131
7.2	边界条件	133
7.2.1	人口发展与城市化率	133
7.2.2	经济发展	134
7.2.3	灌溉面积	134
7.2.4	节水力度	135
7.2.5	河道外生态环境	136
7.2.6	河道内生态环境	136
7.2.7	当地水资源条件	137
7.2.8	跨流域调水	138
7.3	情景设计	139
第8章	淮河区水资源配置情景分析	140
8.1	基准情景分析	140
8.2	2015 推荐情景分析	141
8.3	2020 推荐情景分析	143
8.4	2030 推荐情景分析	144
8.5	淮河区案例研究小结	149
8.5.1	淮河区水资源形势总体不容乐观	149
8.5.2	调水工程对缓解淮河区水资源短期至关重要	149
8.5.3	淮河区的缺水风险依然不容忽视	149
8.5.4	淮河区的生态环境用水需要保障	150
8.5.5	积极推进南水北调东中线二期工程	150
第9章	总结与展望	151
9.1	成果总结	151
9.1.1	面向人类-自然耦合的水资源系统分析理论与方法	151
9.1.2	水资源配置整体模型	151
9.1.3	重大调水工程的经济影响综合评价技术	151

9.1.4 大流域水量统一调度水资源-环境经济后评估技术	152
9.2 未来展望	152
9.2.1 经济学的理论方法将在水资源系统分析中扮演越来越重要的角色	152
9.2.2 生态流量将成为水资源系统分析的重要目标之一	153
9.2.3 风险管理问题在水资源系统分析中不可忽视	153
9.2.4 水联网和智慧水利将带来水资源系统研究的新时代	154
参考文献	155
索引	160

| 第 1 章 | 水资源配置模型研究进展

1.1 水资源系统分析的起源与发展

1.1.1 传统水资源系统分析的起源与发展

现代水资源系统分析方法起源于美国二十世纪五六十年代的“哈佛水项目”（Mass et al., 1966）。在此后的几十年中，水资源系统分析逐渐将运筹学、统计学、经济学和生态学等学科的理论方法融入到工程应用中，形成了流域规划、水库调度、水权水市场、水生态、水环境等专门的研究方向。

Loucks 和 Beek（2005）在其著作 *Water Resources System Planning and Management* 中对水资源系统及规划管理做了较为全面的阐述。其中关于水资源系统的分析方法，Loucks 将其归纳为三类：基于宏观规划与控制的自上而下法（top-down approach）、基于微观分析与综合的自下而上法（bottom-up approach）以及综合应用法（Integrated Water Resources Management, IWRM）。优化模型和模拟模型是在这些分析方法中经常使用的建模工具。

自上而下法往往采用集总式优化，有两个基本假定：①有一个从上而下的管理体制，其中的个体都完全听从“决策者”的安排；②系统中各部门各地区的个体信息是足够充分的。在这种宏观调控的制度设计下，集总式优化模型得到的配置结果往往理论上非常理想，但由于基本不可能达到上述的两个假定，使得实际操作中却不现实，经常遇到来自不同部门和用户的挑战和违规行为；除此之外，集总式优化的缺陷还包括“维数灾”问题，由于系统组成及其相互关系都十分复杂，非线性优化的算法一直以来都是分析系统非线性特征的瓶颈，导致水资源系统的优化通常采用简化的线性优化方法，从而削弱了我们理解和定量刻画水资源系统一些基本复杂特性的能力。

自下而上法则是以微观个体的行为特征以及个体对环境的适应机理为基础，认识系统运行规律，制定系统管理策略，这就避免了上述两个不现实的基本假定。由于此方法允许并鼓励各利益相关主体参与到策略制定的过程中，因此自下而上法越来越多地被人们接受并应用。与自上而下法相比，自下而上法的理论思路和现实更为相似、操作的可行性更高，但是由于历史原因，水资源的相关数据基本都是以宏观行政单位为基础单位搜集整理的，从而给自下而上法带来了较大程度的困难。此外，传统的优化算法对于自下而上法显然是不适用的，如何开发新的优化算法、如何合理设置基本假定（如生态系统的效益如何体现、交互规则如何管理等），也是此分析方法的瓶颈问题。

上述两种分析方法各有利弊，Perry 和 Easter（2004）认为存在这么一个矛盾的局面：

一方面,数据情况和传统的优化算法适合于集总式的优化方法,另一方面,现实情况中的决策过程则更趋向于使用自下而上的分析方法。Yang 等(2009)提出,符合现实情况的水资源系统分析方法应该是一种能够综合应用自上而下法和自下而上法的结构。

IWRM 这个概念出现于 20 世纪 80 年代,人口迅速增长,经济迅速发展,由此引发的水资源短缺和水质恶化使得很多国家重新开始审视并且修改原有的水资源管理方法。这个时期内,水资源管理方法的特征由供给导向、工程依赖逐渐转变为需求导向、多方达成。1992 年的《都柏林协议》为 IWRM 提供了目前被广泛接受的涵义:①水是一种有限的、脆弱的、必需的自然资源,对维持生命、支持发展和保护环境具有不可或缺的作用;②水资源的规划和管理应该基于一种多方(用户、规划方和政策制定者等)参与的路线;③女性应在水资源的规划和管理方面起到核心作用;④水资源在其所有用途中均具有经济价值,应当被看做一种具有经济性的商品,是可交易的。

1.1.2 面向人类-自然耦合的水资源系统分析

水资源系统是典型的人类-自然耦合系统,在这样的系统中人类子系统(如人类的日常生活、工农业生产、城市化建设等经济社会发展活动)和自然子系统(如气候、降水、径流、地表地下水交互、生态环境演变等)有着复杂的交互作用,任何单学科的理论和方法都不能完整地描述系统的复杂性,因此必须从人类-自然耦合系统的基本特征出发采用整体论的研究方法进行研究(Lin et al., 2007)。

面向人类-自然耦合特性对传统水资源系统分析理论和规划方法提出了新的挑战。随着环境的不断改变以及人们对水资源系统认识的逐步深入,水资源系统分析理论与技术目前正面临新的发展阶段,这一阶段在认识论、方法论、模型方法和管理策略三个层面都具有与以往截然不同的特征。

从认识论的层面来看,由于包含人类经济社会发展过程、自然水循环和生态过程以及两者交互产生的工程设施以及管理制度子系统,水资源系统被认为是典型的“人类-自然耦合系统”。在我国被广泛使用的相应概念是“自然-人工二元系统”(王浩等,2002)。二元理论可以被看做是本研究的重要理论基础之一,但与之不同的是:二元理论更加注重从水循环或水资源的角度进行分析,提出了自然水循环和人工侧支水循环等重要的基本概念;而基于 CHN 系统(Coupled Human-Nature System)的观点,水资源更应该被看做是人类-自然耦合系统中的重要的“约束性”要素之一,但并非其核心的“驱动性”要素,因此需要在经济社会和生态环境协调发展的大背景下,提出水资源系统分析的基本理论框架和规划管理对策。

从研究方法论的角度来看,对于包括水资源系统在内的 CHN 系统的分析和研究,正如 2009 年诺贝尔经济学奖得主 Ostrom 指出的,必须对系统中个体之间、个体与子系统之间及各个子系统之间的交互作用进行描述,建立动态的整体分析模型,进而在 CHN 系统的框架内提出资源环境管理问题的解决途径(Ostrom, 2009)。因此,基于学科分解的“还原论”研究方法已经不能满足 CHN 分析的要求,应用“整体论”方法研究这些 CHN