



黄河三角洲水资源 适应性管理技术

李福林 杜贞栋 史同广 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

黄河三角洲水资源 适应性管理技术

李福林 杜贞栋 史同广 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以黄河三角洲为研究区域，在水资源时空演变特征分析、水资源脆弱性评价、水资源承载力计算的基础上，考虑未来气候变化、海平面上升及人类活动影响等多种不确定因素，提出黄河三角洲水资源的适应性管理模式。从开源、节流、生态环境保护等层面构建了水资源系统适应性管理技术体系，对水系联网、水资源优化配置与调度、农业综合节水、非常规水综合利用、水生态修复、水资源监测与评估等多项关键适应性技术进行深入研究，开发了面向三角洲地区水资源适应性管理的信息系统，为黄河三角洲高效生态经济区水资源的可持续利用和生态环境保护提供有力的技术支撑。

本书可为从事水文、水资源、水环境、水生态等领域的科研和管理工作者以及相关高等院校师生提供参考。

图书在版编目（C I P）数据

黄河三角洲水资源适应性管理技术 / 李福林等著

— 北京：中国水利水电出版社，2015.4

ISBN 978-7-5170-3139-0

I. ①黄… II. ①李… III. ①黄河—三角洲—水资源
管理 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第086042号

书 名	黄河三角洲水资源适应性管理技术
作 者	李福林 杜贞栋 史同广 等 著
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 20印张 474千字
版 次	2015年4月第1版 2015年4月第1次印刷
印 数	0001—1300册
定 价	66.00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

黄河三角洲地处华北平原的东部，渤海湾的西南部，是世界上著名的多沙型大河河口三角洲。自然地理概念上的近代黄河三角洲是指 1855 年黄河从铜瓦厢决口夺大清河流路，后经多次改道形成的，即以宁海为顶点，北起套尔河口、南至支脉沟口的扇形冲积平原，面积约 5400km^2 。现代黄河三角洲是 1934 年以来至今仍在继续形成的以渔洼为顶点的扇面，西起挑河，南到宋春荣沟，陆上面积约 3000km^2 。据相关研究，由于黄河大量泥沙入海，1855—1976 年造就了 2058km^2 的三角洲。自 1976 年黄河自清水沟流路入海以来，又增加了 442km^2 的土地面积。近年来，虽然入海泥沙减少，但仍然有 $10\sim 30\text{km}^2/\text{a}$ 的造陆面积。可见，黄河三角洲是世界上最具特色的大河河口三角洲。黄河三角洲不仅蕴含丰富的土地、矿产、石油等资源，而且拥有北方沿海大量的湿地和自然保护区，加上区位优势明显、战略地位突出，资源开发和生态环境保护受到了中央和山东省政府的高度重视。自 20 世纪 90 年代以来，山东省政府就把黄河三角洲开发作为全省跨世纪工程之一，力求重点突破、全面推进。2009 年，国务院批复了山东省政府提出的《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》，黄河三角洲经济发展规划上升到国家战略层面。

然而，黄河三角洲地区多年平均年降雨量 556mm ，由于盐碱地大面积分布，当地水资源十分匮乏，是山东省最为缺水的地区之一；区域供水高度依赖黄河水，但近年来黄河下游来水量呈明显减少趋势，给当地水资源供应造成了更大的压力。黄河三角洲生态环境十分脆弱，受各种自然和人为不合理开发利用的影响，出现了不同程度的生境衰退、环境质量下降、生物多样性降低等现象。随着未来全球气候变化和海平面上升的影响，黄河三角洲地区的水资源和水生态系统将面临更多的不确定性，传统的水资源开发利用和管理模式已经无法适应黄河三角洲生态经济区经济社会发展的需求。如何针对不确定性因素建立具有自适应机制的现代水资源管理模式、如何以水资源适应性技术来引导当地水资源开发和利用方式的转变等，成为破解三角洲地区水资源可持续利用难题的一把钥匙。

山东省水利科学研究院自 2008 年承担了水利部公益性行业科研专项经费项目“黄河三角洲水资源优化配置与适应性技术研究”（编号 200801026），课题研

究历时近四年，主要研究内容包括：黄河三角洲水资源时空演变特征与水资源脆弱性评价、水资源承载力评价与计算、水资源优化配置模型与适应性管理模式、非常水源综合利用适应性技术、农业综合节水适应性技术、水生态修复适应性技术、水资源适应性管理信息系统。同时，开展了农业节水和城郊河道生态修复技术的示范推广，分别在垦利县西宋乡和东营区东、西城衔接处的广利河上建设了引黄灌溉农业节水示范基地和河道生态修复示范段。通过研究，形成了基于生态保护优先的水资源脆弱性评价和水资源承载力计算方法，提出了基于GIS平台的多水源优化配置方案，建立了复杂水资源环境下水资源适应性管理模式，形成了大河三角洲地区水资源适应性综合技术体系。项目组人员还发表多篇学术论文，本书便是在研究成果上的系统总结。本书章节撰写人员分工如下：前言由李福林撰写；第一章由李福林、张玉凤撰写；第二章由刘健、林琳、黄继文、仕玉治撰写；第三章由张欣、刘海娇、陈华伟撰写；第四章由李福林、仕玉治、范明元撰写；第五章由杜贞栋、范明元、陈华伟撰写；第六章由范明元、陈华伟撰写；第七章由杜贞栋、徐征和撰写；第八章由卜庆伟、辛宏杰、田婵娟撰写；第九章由陈学群、范明元、卜庆伟撰写；第十章由陈华伟撰写；第十一章由史同广、傅世东撰写；第十二章由李福林、杜贞栋撰写。全书由李福林统稿。

项目组成员多次开展实地调研，奔赴东营市各县（区）水利局及市内大型水库、闸坝管理机构进行实地考察，组织召开了两次技术交流会，开展了多次野外和室内试验，顺利完成了课题研究任务，实现了既定研究目标。在本书撰写过程中，参考了许多国内外专家学者的文献，特在此向这些专家学者深致谢意！本书的出版得到了水利部国际合作与科技司、山东省水利厅、山东省水资源与水环境重点实验室、东营市各级水利部门、中国水利水电出版社等单位领导和同仁的大力支持，在此一并表示感谢！

黄河三角洲水资源适应性管理技术的研究尚需开展更多的工作，本书仍有诸多不足和局限之处，我们期待批评意见和建议。

作者

2014年8月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水资源管理理论与实践研究	1
第二节 水资源管理技术研究	5
第三节 黄河三角洲水资源适应性管理技术研究的背景及意义	10
第二章 黄河三角洲水资源时空演变特征	12
第一节 黄河三角洲的水资源与水环境	13
第二节 黄河三角洲水资源利用及存在问题	21
第三节 黄河三角洲水资源时空演变特征	27
第三章 黄河三角洲水资源脆弱性评价与承载力分析	44
第一节 水资源脆弱性评价	44
第二节 水资源承载力评价	56
第三节 水资源承载力计算分析	69
第四章 水资源适应性管理模式与关键技术体系	82
第一节 水资源适应性管理模式	82
第二节 水资源适应性技术体系	92
第五章 水系联网技术	98
第一节 现代水网系统的构成	98
第二节 现代水网构建的技术体系	100
第三节 东营市现代水网总体布局	100
第六章 水资源优化配置与调度技术	103
第一节 水资源供需平衡分析	103
第二节 研究区水资源系统概化	128
第三节 模型构建	131
第四节 配置方案集与模型输入	134
第五节 模拟结果分析	138
第七章 农业综合节水技术	163
第一节 农业用水水平调查与节水潜力计算	163
第二节 地下水位控制和农业非充分灌溉技术研究	168

第三节 综合节水集成技术	181
第八章 非常规水利用技术	183
第一节 微咸水利用技术	183
第二节 城市与农村雨水收集技术	197
第三节 再生水利用技术	203
第九章 水生态评估与生态修复技术	210
第一节 水系联网生态调度技术	210
第二节 平原河道修复模型技术方案	219
第三节 河口海岸湿地生态恢复技术	238
第四节 河道型水库海（咸）水入侵防治技术	248
第十章 水资源监测与评估技术	258
第一节 水资源监测技术	258
第二节 水资源评估技术	261
第十一章 水资源适应性信息管理系统	267
第一节 系统开发技术路线	267
第二节 系统结构设计 with 功能构成	267
第三节 系统主要功能	269
第十二章 结论与建议	298
第一节 主要研究成果	298
第二节 建议	301
参考文献	303

第一章 绪 论

第一节 水资源管理理论与实践研究

传统的水资源管理模式是将各个水资源信息采集点通过人工的监测，采集相关水资源信息，利用电话、电台等传输手段，将采集的信息向上级汇报。上级机构接到水资源信息后，人工对它进行进一步的分析、计算和处理，为做出决策提供相关依据。而这种管理模式不仅要投入相当大的人力和物力，而且水资源信息采集的完整性较差，覆盖面较小；同时信息获取和数据处理的精确度较低，信息传输的及时性得不到保证，数据的统计方式和计算方法也较为落后。传统的水资源管理方式已经不再适应新形势的要求，而新的管理方式仍在摸索中，水资源管理活动正处在探索过程中。现代的水资源管理模式是指利用GIS、RS、多媒体、数据库、GPS等先进的科学技术形成某一区域整体的水资源监测网络，对水资源信息进行自动采集和实时监测，利用信息系统将各类水资源信息集成一体，实现数据的传输和共享，利用系统的各类模型对数据进行计算和分析处理，从而使信息的时效性、准确性、完整性均得到有效保证，为科学决策提供依据。

一、水资源需求管理

水资源需求管理，是指在水资源承载能力的约束条件下，综合运用行政、经济、工程和科技等多种手段来规范水资源开发利用中的人类行为，控制需求增长，减少污水排放，促进节约用水，实现水资源优化配置和合理利用。它与传统的水资源“供给管理”相比，是管理方式的一种演变和变革。“供给管理”是单纯依赖增加供水能力解决供需矛盾的方法。它忽视经济效益和环境影响等弊病，最终不能解决供需矛盾，因而应该研究供水中的“需求”问题。以色列率先对水需求进行分析和研究，核心是节水，通过节水技术、对水需求的反复研究和合理的用水收费制度，达到合理用水的目的；加拿大由于传统的“供给管理”方式带来的基础设施损害、投资短缺、地方性缺水严重等气候环境问题，不得不强调水资源的需求管理。日本、韩国、美国、智利、新加坡、丹麦、荷兰等国家也对水需求管理进行了深入研究，通过认真分析水的需求，提出合理的需求指标和用水定额，制定合理的水价体系和价格政策，对合理用水起到了促进作用。我国的山西省、河北省石家庄市先后作为试点，对水需求进行分析研究，合理的水需求指标和用水定额，不断提高水的利用率，以缓和水的供需紧张局面。我国水行业正处于从工程水利向资源水利转变、从传统水利向现代水利和可持续发展水利转变的进程之中，通过对水资源需求管理模式的研究，建立起适合中国国情的水资源需求管理的理论框架、体制模式和方法措施，从管理领域为水资源的可持续发展提供强有力的保障。

二、虚拟水管理

虚拟水最早是由英国伦敦大学 Tony Allan 教授于 1993 年提出的创新型概念, 现在比较精确的定义是: 在生产产品和服务过程中所需要的水资源数量, 被称为凝结在产品和服务中的虚拟水量。它并不是真正意义上的水, 而是以“虚拟”的形式包含在产品中“看不见”的水, 也被称为“嵌入水”和“外生水”。Bouwer 提议成立粮食输出国组织 OFEC (Organization of Food Exporting Countries) 来保证虚拟水贸易中的粮食安全问题, 提出以全球的视角整合水资源管理。Stanley Mubako 等以美国的加利福尼亚州和伊利诺伊州两地的进出口产品的虚拟水量进行计算, 从而强调处理水资源管理要考虑水资源利用率和机会成本。在我国, 程国栋于 2003 年首次引用“虚拟水”概念, 介绍了虚拟水概念和虚拟水战略在水资源管理中的应用, 以西北五省区为例计算了消费产品的虚拟水含量。李素丽等 (2011) 把虚拟水理论用于河北省农业用水管理的战略应用分析中, 以虚拟水理论和虚拟水战略为指导, 调整农业结构, 实施粮食贸易, 以最少的水资源投入生产最大的整体经济贸易, 为河北省水资源, 特别是农业用水矛盾提供了解决手段。国内外学者大都以投入产出模型进行虚拟水研究。如 Jing Meng 等利用投入产出模型分析北京在建筑行业的虚拟水量, 提出了计算建筑业虚拟水量的框架, 使工程预算更为精确。秦昌波等 (2012) 利用投入产出模型, 对陕西省的虚拟水进行了分析, 得出农业生产环节耗水强度较大。虚拟水是不可忽视的水资源形式, 瑞典斯德哥尔摩国际水资源研究所认为, “虚拟水”对全球贸易政策等产生了重大影响, 实施虚拟水战略促使人们改进水政策和对水资源的管理, 提高了人们对水资源的利用率。

三、基于 ET 管理的水资源管理

蒸腾蒸发 (ET) 是水资源最主要的消耗量。ET 管理的理念是从 2001—2005 年发展节水灌溉项目的“真实节水”概念发展而来的。所谓 ET (evapotranspiration) 管理就是以耗水量控制为基础的水资源管理。其构建模式 (图 1-1) 要综合考虑人类社会生活、生产以及自然生态环境的用水平衡, 能够对一定时间段内 (如每月、季度或年度) 的用水实施有效的监督和控制, 有利于协调上、下游的用水; 在资源型缺水地区, ET 管理是一种缓解水资源短缺, 保护生态环境的有效手段; 可以促进高效节水与保障农业生产的双重效应。而这种模式的实施最终要具体落实到区域或流域取水量和耗水量的分配上来。赵瑞霞、李娜 (2007) 以河北省临漳县基于 EI 管理的水资源供耗分析, 实现区域水资源的可持续发展。张芳等 (2011) 根据 ET 管理理念对水资源供耗评价指标体系进行整理, 运用 SWAT 模型模拟 ET, 并以新乡县为例进行县域水资源供耗平衡分析和优化配置。毕小雪等 (2012) 以山西省潞城市开展基于 ET 技术的水资源管理方法研究, 分别从供耗平衡原理、SWAT 模型和遥感 ET 三个方面进行推算, 证明了 ET 技术可提升地区水资源管理水平。

四、最严格的水资源管理

从 2009 年实行最严格的水资源管理制度的提出, 到 2011 年中央一号文件的出台和中

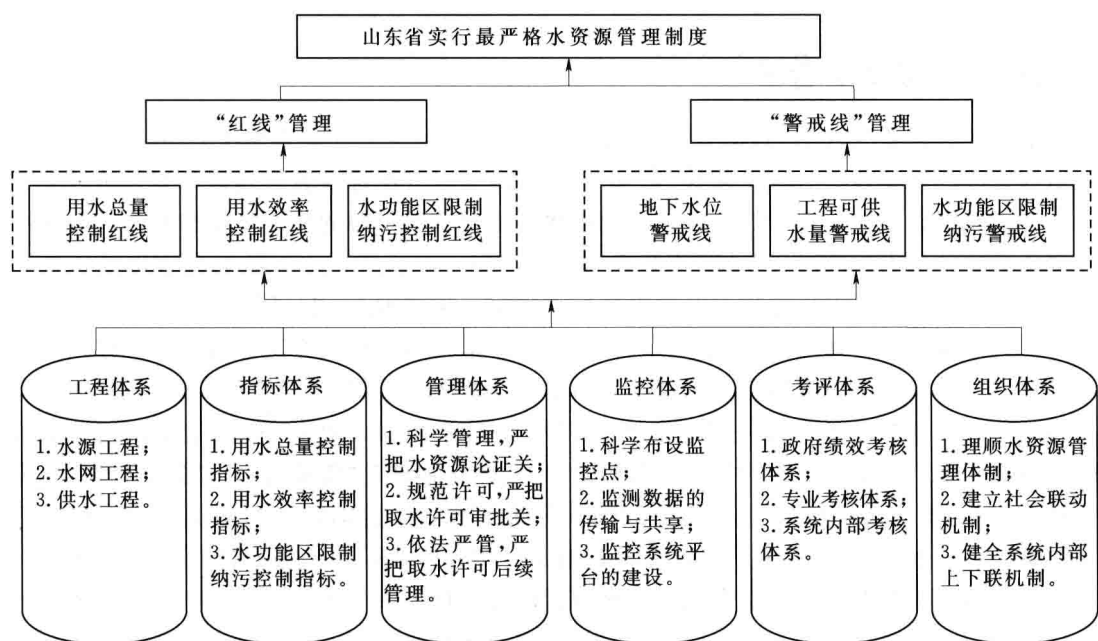


图 1-1 山东省实行最严格水资源管理制度框架体系

央水利工作会议的召开，再到 2012 年年初，国务院最终以 3 号文件发布意见，做出对实行最严格的水资源管理制度的全面部署和具体安排，实行最严格的水资源管理制度逐步成为我国破除水资源瓶颈制约的一项重大战略。其核心是划定“三条红线”、建立“四项制度”，促进水资源可持续利用和经济方式的转变，推动经济社会发展和水资源水环境承载力相协调。2011 年 1 月 1 日起，山东省为实现水资源的高效管理及水资源的可持续利用，开始实施《山东省用水总量控制管理办法》，标志着在全国率先基本构建起最严格的水资源管理的制度框架体系，见图 1-1。王浩（2011）认为严格化、精细化和系统化是最严格水资源管理的三大基本特征，为实现水资源的精细化管理，必须建立起相应的技术支撑体系，他总结了八大关键支撑技术：“自然—社会”水循环模式与社会水循环原理、全口径水资源层次化评价方法、二元水循环及其伴生过程综合模拟技术、水资源大系统多维分析技术、水资源量质联合配置技术、复杂水资源系统多目标综合调度技术、水资源信息管理与数字流域技术和水资源管理经济调节技术。陈红卫（2011）在江苏省盐城市实施最严格水资源管理制度的初步实践中，深入思考了制定最严格的地下水管理政策、试点差别水资源费与差别水价制度、实施区域水质交接与生态补偿制度、提升水资源管理和节水科研水平、严格水资源管理问责与考评制度等措施，为沿海地区加快实施最严格水资源管理制度提供借鉴。王偲、窦明等（2012）研究探讨了“三条红线”控制指标，构建了基于“三条红线”约束的滨海区多水源联合调控模型，并将该模型用于莱州市，提出了多水源联合调度方案。张建龙、解建仓（2013）分析现行管理主要不足、与实行最严格的水资源管理制度存在的差距以及实施中存在的主要问题，提出一种新的管理模式，即将水资源管理制度、监测和计量、统计、管理考核、科学理论与技术等非结构和结构化的内容进行综合

管理。

五、水资源综合管理

水资源综合管理 (Integrated Water Resource Management, 简称 IWRM) 是水资源规划与管理的新典范。全球水伙伴 (GWP) 认为: “水资源综合管理是以公平的方式, 在不损害重要生态系统可持续的条件下, 促进水、土及相关资源的协调开发和管理, 以使经济和社会财富最大化的过程”。国外学者 Don Blackmore 认为: 水资源综合管理就是要了解社区的要求, 如何保护环境, 并且管理好水资源, 有效地实现目标。孙丽娟等 (2007) 认为它实质是一种管理理念, 是综合多方面要求, 运用多学科的方法分析评估比较, 选定最适宜的方法对水资源项目进行管理, 从而实现水资源的经济和社会福利化。尽管国内外一些机构、学者对水资源综合管理进行了大量的研究和探索, 但水资源综合管理目前仍未形成明确、统一的定义, 常称为“综合管理”“一体化管理”“集成管理”“集中管理”“统一管理”等。Philippe Gourbesville (2008) 分析了当前发达国家和发展中国家所面临的水资源综合管理面临的挑战。Itay Fischhendler、Tanya Heikkila (2010) 在对以色列水政策改革的研究中发现, 面对水危机, 水资源综合管理更适应水资源管理和水政策。余元君 (2008) 根据洞庭湖水资源管理面临的一系列突出问题, 提出了洞庭湖流域综合管理。日本的 A. A. 阿古、喀麦隆的 G. E. T. 依扬和 G. E. 恩肯 (2011) 探讨了喀麦隆水资源综合管理的组织框架及其实施条件, 评价喀麦隆最近几年实施水资源综合管理的工作成效, 提出了改进措施。巴西的 A. C. 科尔霍等 (2013) 将巴西第二大流域——托坎廷斯河—阿拉瓜亚河流域作为实例研究, 验证了水资源规划与管理决策支持系统能有效支持水资源综合管理的实施。

六、水资源适应性管理

适应性管理最初的名称是适应性环境评估与管理 (adaptive environmental assessment and management), 它是由生态学家 C. S. Holling 和 Carl J. Walters (哥伦比亚大学) 在 20 世纪 70 年代提出的。它常被应用在澳大利亚和北美, 最初被应用于渔业管理, 在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初得到了更广泛的应用。Covert D. Geldof 提出用适应性的水资源管理来应对水资源一体化管理不断地变化。M. Sophocleous 提到由于流域系统复杂性及不确定现象, 流域水资源可持续管理必须建立在适应性管理基础之上。在我国, 适应性管理理论用于水资源管理有关领域的研究刚刚起步, 有待于进一步的研究。目前适应性管理的分析方法有多目标决策和层次分析法 (AHP)。夏军等 (2008) 以密云水库的适应性管理为例, 提出了多目标分析基础上的应对气候变化的水资源适应性管理对策。刘芳 (2009) 对山东省水资源适应性管理采用 AHP 方法进行水平评价, 根据定性及定量的分析结果提出了山东省水资源适应性管理的可行性对策。洪思、夏军等 (2013) 认为定量分析适应性对策的经济效益至为关键, 阐述了成本效益分析方法可应用于水资源适应性管理。水资源适应性管理就是针对区域水资源管理中的不确定性因素开展一系列行动, 包括识别、监测、评估、应对、调整等, 对水资源管理模式进行完善, 同时借助于管理实践的支撑性技术如水资源监测与评估技术、水系联网技术、水资源优化配置与调度技术、非常

规水利用技术等,并采取水资源优化配置等措施来提高水资源系统的适应能力,确保区域水资源系统与社会、经济、生态系统的协调发展,是对水资源管理的深化认识和实践进步。

第二节 水资源管理技术研究

一、水资源监测与评估技术

水资源监测是水资源管理中的一项重要的基础工作,是获得准确的水资源动态资料的技术手段,是进行水资源科学管理的前提。在发达国家,水文水资源监测技术水平较高,水文站网密度较大,为水资源管理服务的监测站也较多。如:美国地质调查局(USGS)共有 7292 个水文站,其中:装有卫星遥测设施的水文站所占比例从 1983 年的 14%增加至 1997 年的 64%;约有 4200 个水文站的数据用于了解和计算水资源量、引水量和回归水量。而我国在地表水资源监测方面采用自动监测记录方法,流量测验主要采取巡测、自动测流等技术。当流量监测断面通过测流断面整治、单值化等技术处理能建立稳定可靠的水位流量关系时,采取自动监测水位以推求流量的方法。

从 20 世纪 50 年代开始,西方一些发达国家对水质监测管理高度重视,他们把河流治理的重点放在污水处理和河流水质保护上。为恢复河流水质,政府投入了大量资金,强化污水处理和控制排放,到 20 世纪 80 年代初河流污染问题得到一定程度的缓解。而我国在水质监测管理方面是按我国重要江河湖泊水功能区监测及国家重要饮用水水源地监测为主的。其中,纳污总量控制断面实现对所有重点入河排污口的有效控制;监测断面与水文测量断面重合。缓冲区监测断面布设需考虑省际河流的上下游或者左右岸关系。

另外,随着计算机技术的发展以及现代通信技术的普及,利用先进的科学技术对水资源进行实时监控是一些发达国家水资源管理的新思潮。如:澳大利亚许多州都建设了水资源实时监控管理系统,通过对各种水资源信息的自动采集、传输、预警预报、决策支持、工程自动控制等,实现了水资源的优化配置和实时调度,同时还和收费系统相结合,做到自动收费;美国纽约州的城市供水水质实时监控系統,以纽约州城市供水水质标准为依据,实时监控城市供水的水质状况,确保水质达到饮用水标准。以上水资源监测系统的成功应用,极大提高了水资源综合管理的效率。

在水资源预测评估方面,王浩等(2006)提出了基于二元水循环模式的水资源评价理论方法。水资源质量评价也由单一指标评价发展为多指标综合评价,评价方法不断发展与创新,各种新的评价方法如水质模糊层次综合评价、灰色聚类决策模型、人工神经网络模型、多级关联分析方法等运用于水资源质量评价,使评价结果更加客观地揭示水质状况;特别是“3S”技术的出现和发展,为水资源质量评价和管理提供了新的思路和更为直接的管理。世界各地水文学家开发了许多分布式或半分布式流域水文模型。在美国和加拿大常用的模型有 HSPF 模型、HEC-HMS 模型、SWMM 模型等;在欧洲常用的有 HBV 模型、IHDM 模型等。我国研究应用较多的模型有新安江模型、TOPMODEL 模型、MIKESHE 模型、WEAP 模型、半分布式的月水量平衡模型等。总体而言,我国水资源



预测评估尚处于起步阶段。我国从国外引进了一些地下水分析的系统模型,如 MODFLOW、FEFLOW、人工神经网络(ANN)等模型,在安徽、山东、河南和河北等地进行地下水动态模拟预测,取得了较好的效果。

由于我国水资源在时空分布上的极度不均匀性,使得水资源的供需矛盾非常突出。水资源适应性管理就是针对这种不确定因素提出的,而水资源监测与评估技术是通过监测人类利用降水、地表水、地下水的情况以及人类对地表水、地下水所造成的污染状况,评价水资源状况,分析人类需水情况,预测将来的水资源变化情势,以信息系统等方式快速分析预测水资源状况。这为水资源适应性管理提供了有效的技术支撑。

二、水系联网技术

国外许多建设和管理方面非常优秀的调水工程,如美国的加州北水南调、俄罗斯的北水南调、巴基斯坦的西水东调、以色列的北水南调、秘鲁的西水东调等,这些都是比较完善的水资源网络系统。Francois Molle、Philippe Floch(2003)在《大型工程项目与社会和环境变化——以泰国“水网”为例》一文中,分析了泰国国家“水网”大型工程项目的发起、管理以及其经济和环境合理性。H. Maroukian 等(2008)研究了希腊两个地区的国家水网,分析两者之间的异同以及经济、环境的合理性。Jaroslaw Jasiewicz、Markus Metz(2011)把 GRASS GIS 用于区域水网中,分析了这种方法在水资源管理方面的合理性。目前我国水系联网技术尤其是现代水网的建设蒸蒸日上,取得了巨大的成效。赵青松、彭录业等(2004)深入分析了潍坊市白浪河水库工程的建设,提出了水系联网是解决白浪河水库水源不足的根本措施。姜成堃(2006)深入研究了青岛即墨市现代化水网的建设 and 水资源的高效开发利用。王勇、庄维刚、孔祥玲(2008)通过分析潍坊市白浪河水系联网工程,提出了建设水系联网工程,可实现洪水、弃水的跨流域调度配置,实现洪水、弃水的水资源化利用。“国家智能水网工程框架设计研究”项目组于 2012 年提出了智能水网可作为水利现代化建设的综合性载体,能有效承担起引领新时期水利现代化建设的根本任务,是推进水利现代化建设的综合性抓手。王忠静、王光谦等(2013)提出了水联网及智慧水利的概念,构建集物理水网、虚拟水网和市场水网一体的现代化水资源系统,从而提高水资源高效利用。综上所述,水系联网技术在水资源适应性管理监测、评估、水资源优化配置方面提供了技术支撑。

三、水资源优化配置与调度技术

水资源优化配置是水资源开发利用的研究热点,其研究工作最早起源于 20 世纪 40 年代 Masse 提出的水库优化调度问题,并于 20 世纪 60 年代后得到迅猛发展。近几十年来,国外学者采用线性规划、动态规划及遗传算法、蚁群算法、粒子群优化算法、模拟退火、混沌算法等智能算法对水资源优化配置的模型及方法开展了研究。线性规划法是水库优化调度中常用的最简单的规划方法,它的优点是简单易行且能够收敛到全局最优解,因此其在水库优化调度中得到了一些应用。最早提出遗传算法的是美国密执安大学的 Holland 教授,他通过建立具有选择、交叉和变异操作算子的人工自适应系统来实现。由于其具有易编码、使用简单、鲁棒性强和隐含并行性等特点,是水库群优化调度最常用的方

法之一。目前,国际上对水资源配置的研究更多的是在水资源系统模拟的框架下进行的,并开发了许多应用价值较高的相对成熟的水资源模拟软件,比较有代表性的有 Mike Basin (丹麦)、WMS (美国)、Aquarius (美国)、Riverware (美国) 和 Waterware (奥地利) 等。Letcher 等开发出澳大利亚纳奥米河流域水资源配置综合评价模型,不仅包括了水资源管理,还考虑了一系列的环境问题。

从 20 世纪 60 年代开始,我国在水资源优化配置方面做了大量工作。90 年代初,陈志恺等首次开发出基于宏观经济的水资源配置模型,研制了京津唐地区水资源规划决策支持系统。黄河水利委员会(以下简称黄委)于 1998 年进行了“黄河流域水资源合理分配及优化调度研究”,综合分析了区域经济发展、生态环境保护与水资源条件,是我国第一个针对全流域进行的水资源配置研究。王浩等在“黄淮海水资源合理配置研究”中,首次提出水资源“三次平衡”的配置思想,系统地阐述了基于流域水资源可持续利用的系统配置方法,其核心内容是在国民经济用水过程和流域水循环转化过程两个层面上分析水量亏缺态势,并在统一的用水竞争模式下研究流域之间的水资源配置问题。另外,2005 年李小明对黑河流域水资源进行了预测,提出了多套水资源优化配置的模型,在模型求解的基础上对水资源可持续承载能力进行了评价;2006 年董贵名建立了基于 GIS 的南水北调中线工程水资源优化配置决策支持系统,并利用改进的遗传算法进行了模型的求解。2011 年,许继军等对长江流域的大型梯级水库群的水资源优化配置进行了理论和方法上的研究,并利用 3D 可视化技术进行了仿真模拟。

水资源合理配置就是研究如何利用好水资源,包括对水资源的开发、利用、保护与管理。这与水资源适应性管理的理念不谋而合,在水资源管理过程中,水资源优化配置与调度技术正好能为水资源的适应性管理工作做好技术支撑。

四、非常规水利用技术

节水、苦(微)咸水淡化、海水淡化、雨洪水利用、中水利用、再生水利用、污废水处理回用等非常规水利用技术的研究、应用和推广,对于缓解世界水资源短缺问题、促进饮水安全和节水工作具有重大的意义。国外特别是发达国家对于非常规水的研究比较早,积累了很多经验。如以色列 20 世纪 60 年代就致力于海水淡化的研究;日本 20 世纪 60 年代就开始使用中水,目前经过深度处理的中水已经加到饮用水管中,同时重视再生水和雨水的利用;美国大力提倡水的再利用和再循环;德国长期致力于雨水利用技术研究和开发。澳大利亚、加拿大、瑞典、印度、巴西和墨西哥等国家采取修建小型水池、水仓、塘坝等工程措施,拦蓄雨水进行灌溉,都取得了良好的效果。Anouar Rich、Youssef Mandri 等(2012)以尼斯、拉巴特及马赛布周边的海水为例,深入研究了海水冻融技术获取淡水的参数。我国是水资源短缺的国家,所以非常规水的利用显得极其重要。2010 年“第三届全国非常规水源利用技术研讨会”讨论了苦咸水淡化技术、海水淡化技术、工业废水和生活污水回用技术、雨洪水的收集及净化技术等。参会代表参观的杭州水处理技术研究开发中心承建的舟山六横岛 10 万 t 海水淡化项目,使海水淡化项目的国产化率提高到 70% 以上,对行业技术进步产生了重大影响,实现了我国反渗透海水淡化技术和产业的跨越式发展。赵雅琦(2011)分析了沧州市咸水、微咸水、再生水、海水、雨洪水等非

常规水资源情况,论述了非常规水资源的利用技术,建议充分利用非常规水资源,以缓解当地水资源危机。曹雅、汲奕君等(2013)通过分析环渤海地区雨洪水、再生水、海水等非常规水源的利用潜力和发展前景,提出了非常规水资源开发利用的保障对策,促进环渤海地区水资源的可持续利用。何昭菊、陆燕勤、朱丽(2014)以桂林理工大学雁山校区为例,研究了高校非常规水资源优化配置。非常规水源是水资源重要的组成部分,合理的开发利用非常规水,对解决水资源短缺问题、促进水资源综合利用、实现水资源优化配置、保障社会经济可持续发展起到重要作用。

五、水资源保护与水生态修复技术

水资源的保护一般涉及到水量、水质及水生态的内容,是一项非常复杂的系统工程。国外对于水资源保护的研究探讨也非常多,美国和加拿大的水环境监测、信息收集和管理、水资源开发利用与环境保护等自动化程度,先进的科学管理技术等措施的实施使水资源得到有效保护。Krzysztof Jozwiakowski(2009)分析了应用人工湿地技术来处理污水可以有效地保护水资源。H. Habib、A. J. Anceno等(2013)结合阿富汗当地的水资源综合管理(IWRM)和战略环境评价(SEA),提出了一种新的水资源保护策略。我国的一些学者更关注水资源保护技术的研究和实施,这对于缓解水资源短缺具有重大意义。金春久、王超等(2010)分析讨论了降雨径流模型、水动力学模型、污染物传输扩散模型耦合的松花江干流水质模型在流域水资源保护管理中的应用。田志红(2010)分析了我国目前水资源保护现状,指出了水资源保护存在的问题,并提出了相应的整改对策。朱党生、张建永等(2011)针对我国水资源保护目前面临的形势和要求,提出了基于水质、水量、水生态并重的现代水资源保护规划技术体系,同时总结了当前我国亟待开展的水资源保护技术研究:水资源保护信息管理与决策分析系统研究、水资源保护及河湖健康评价指标体系及关键指标研究、入河排污口布设及设计技术、全口径污染物入河量计算及控制技术研究、水生态分区及水生态保护修复技术措施体系、湖泊水资源保护关键技术、地下水保护水位控制标准及其恢复技术、兼顾生态保护的闸坝调度关键技术研究和水资源保护补偿机制研究等。姜海萍、朱远生(2013)分析了珠江流域当前水资源开发、治理和保护的现状,提出了流域水资源保护与水生态修复体系,较好地协调了流域经济社会发展与流域治理、开发、利用、节约和保护水资源的关系。张占贵(2014)根据河北省张家口水资源的现状,从水资源的规划与管理、改革水价、促进节约用水、建立节水型农业、加强科技创新、推进水利现代化进程、建立水污染防治机制和水生态补偿机制、非传统水资源开发利用等方面提出了水资源的保护策略。水资源保护与水生态修复对于维持生态环境的自然平衡、缓解水资源短缺、维护水资源管理、促进社会经济的稳定发展都具有重大意义。

六、水资源管理信息化技术

水资源管理信息化主要是充分利用现代信息技术,深入开发和广泛利用水利信息资源,包括水利信息的采集、传输、存储和处理,全面提升水利事业活动的效率和效能。模型和信息技术在解决水问题和水资源管理实际工作中发挥了重要作用,而且在水资源管理过程中,管理决策、水资源的动态变化特征和不同管理方案总是相互作用、相互影响。倪

付燕(2007)把 MODFLOW 模型用于小南海泉域地下水资源管理中,来模拟和预测泉域地下水动态及泉流量变化。石春丽(2012)通过水资源规划与评价模型(WEAP)和流域负荷水质模型(GWLF-BATHTUB)联用初步构建了滨海新区水资源综合管理技术支持框架。V. Sempere-Payá、D. Todolí-Ferrandis 和 S. Santonja-Climent(2013)分析探讨了 ICT(Information Communication Technology)在城市水资源综合管理中的效应,并指出了在城市水管理中合理的应用 ICT 可以同时采集供水、需水数据,把现有的信息及时提供给管理者以便预测管理水平,从而制定相应的水价。

刘宁(2013)基于中国基本水情,结合在雨洪水利用、水资源战略储备以及储水空间利用等方面进行的需水侧水文水资源常态管理和应急管理探索与实践,提出了建立水资源常态与应急综合管理技术,包括:全过程水信息共享融合、水循环状态识别控制、各类水利工程联合运用、流域水资源统一调配以及涉水事务综合管理。

水资源管理决策支持系统(Water Resource Management Decision Support System, 简称 WRMDSS)是建立水文水资源学家和水资源管理者、决策者之间的桥梁,它能够将水资源管理涉及的决策问题通过水文水资源学家建立的物理模型或经验模型进行定量表达,使决策者站在科学的基础上把握决策过程,从而提高决策的效能。WRMDSS 的发展主要受到两方面因素的推动:一方面是 DSS 与地理信息系统(GIS)、遥感(RS)、专家系统、数据挖掘、人工智能等高新技术的集成;另一方面科学家对地表过程中的各种物理机制的认识逐渐加深和对物理过程模拟能力的不断增强。我国部分学者和韩国的 Hoog-kee Jee(2012)以韩国的大邱为例,把 WRMDSS 用于水资源综合管理中,取得了良好的效果。赵岩、缪琴(2009)在综合考虑水安全、水资源、水环境、水生态、水景观、水文化等涉水问题的基础上,以决策支持系统的结构为理论框架,借助理信息系统、数据库等工具,开发了具有一定通用性、可移植性和可扩展性的水资源综合管理决策支持系统。盖迎春、李新(2012)在讨论了目前 WRMDSS 的研究进展后,提出了集成综合观测系统、集成建模环境和联机协商环境的水资源管理决策支持系统框架。

以智能水网为核心的数字技术应用可以大幅提供公共机构对水系统进行精密检测的能力,大大提高系统的可靠性。美国的智能水网主要是基于国家层面的智能水网和基于州政府层面的蒸散发网络;澳大利亚典型的智能水网包括 SEQ 智能水网、维多利亚智能水网和宽湾智能水网,都取得了巨大成效;以色列形成了以全国输水系统为骨干基础,配套灵敏科学的水资源调配系统和高效集约用水系统的国家智能水网。我国的智能水网是由“国家智能水网工程框架设计研究”项目组于 2012 年提出。宋相儒(2013)阐述了智能水网是新一代的城市输水管网技术,分析了智能水网的组成,与传统水网相比,数据融合和分析层是智能水网体现“智能”的重要部分。有些学者认为建设中国智能水网需要做好以下两方面工作:一方面是有关水务水利信息资料的软件设施建设工作。即通过各种分布式的信息传感设备,采集供水管网上的流量、压力、水质、泵房、远传水表、重要节点数据,测量水文、水质、水量等水利要素,在互联网上进行信息交换和通信,实现智能化识别、定位跟踪、监测控制、模型运算、远程计算、模拟仿真、智能预测和水务管理等。另一方面是有关水利基础工程的硬件设施建设工作。包括蓄水、引水、提水、调水、地下水源、集雨,以及其他水源工程设计、规划、施工等。

RS 和 GIS 技术在实际应用中往往相互交叉、渗透。我国学者张长江、刘衍美 (2003) 总结了它们在水资源管理中的应用, 主要包括: 流域和水资源调查、水资源规划设计、洪涝灾害防治、水文模拟、水质分析及水土保持等方面, 同时 GIS 技术还可应用于地质勘察、地表水资源的空间分布和调配, 以及地下水资源勘探、规划和开发, 水利工程移民安置、灌溉面积计算、旱情分析预测、库区地质分析等方面。同时分析了 RS 和 GIS 技术在山东省水资源管理中的应用。Daoyi Chen、Shahriar Shams 等 (2009) 探讨了 GIS 的软件包在发展中国家水资源管理中不同层面的应用。Hendra Pachri、Yasuhiro Mitani 等 (2013) 把 GIS 技术用于水资源管理模型中分析了乌兹别克斯坦奇尔奇克河流域的水资源状况。段跃兰、许国仁、牛俊怡 (2013) 以黑龙江省城市水资源管理为例, 分析了黑龙江省城市水资源管理的现状和存在的问题, 探讨了黑龙江省基于 GIS 的城市水资源管理信息系统开发和应用。

水资源管理信息化技术在水资源管理中的重要性日益凸显, 借助先进的信息化技术, 全面获取水文、气象、环境、水情、险情等各种水利信息, 并将这些水利信息进行更新、处理并整合应用在水资源各项管理应用系统中, 能高效实现对水资源的有效管理。水资源管理信息化技术对于水资源管理尤其是水资源适应性管理提供了有效的技术支撑。

第三节 黄河三角洲水资源适应性管理技术研究的背景及意义

一、研究背景

黄河三角洲是我国三大三角洲中开发程度最低、发展潜力最大的区域。黄河三角洲位于环渤海经济圈和黄河经济带的交接地带, 北邻京津冀, 与天津滨海新区和辽东半岛隔海相望, 是环渤海核心区的重要组成部分和山东对接京津冀的发展的门户地区, 区位优势明显, 战略地位突出。这里不仅是我国第二大石油生产基地, 也是我国发展规划中重要的农业生产基地。同时, 也是中国暖温带最年轻、增长最快、景观变化最剧烈的地区, 也是东北亚内陆和西太平洋鸟类迁徙重要的中转站、越冬栖息地和繁殖地, 拥有最完整的湿地生态系统。但是, 黄河三角洲多为新生土地, 生态环境脆弱, 在人们不断开发利用的过程中, 特别是由于水资源的紧缺和不合理的开发利用, 生态环境受到了严重的破坏, 生境衰退、环境质量下降、生物多样性降低。

《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》《山东省半岛蓝色经济区发展规划》等专项规划的顺利完成, 标志着黄河三角洲区域经济社会发展进入一个新的阶段。而水资源与水生态环境问题是该区域经济高效生态发展的制约因素。黄河三角洲地区是山东省典型缺水区域之一, 水资源总量不足, 人均水资源占有量为 333m^3 , 远远低于国际公认的维持一个地区经济社会发展所必需的人均占有水资源量 1000m^3 的临界值, 属于人均占有量小于 500m^3 的水资源危机区。黄河三角洲区域供水水源过度依赖黄河客水水资源, 占用水总量的 90% 以上, 然而近些年来黄河来水量呈减少变化趋势, 严重影响了黄河三角洲地区可引水量, 进一步加剧了区域水资源供需矛盾。此外, 水系联网工程建设相对滞后, 在一定程度上阻碍了多水源的联合调度。一是大型平原水库建设较少, 跨季、跨年度调节能力有