

# 大沽河流域 水资源可持续管理技术研究

Sustainable Utilization and Management of Water  
Resources in Dagu River Basin

于万春 崔峻岭 黄修东 刘青勇 刘贯群 © 著



中国海洋大学出版社  
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

# 大沽河流域水资源 可持续管理技术研究

于万春 崔峻岭 黄修东 刘青勇 刘贯群 著

中国海洋大学出版社  
·青岛·

图书在版编目(CIP)数据

大沽河流域水资源可持续管理技术研究 / 于万春等  
著. — 青岛: 中国海洋大学出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-5670-0565-5

I. ①大… II. ①于… III. ①河流—水资源管理—研究—青岛市 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 051447 号

出版发行	中国海洋大学出版社	
社 址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码 266071
出 版 人	杨立敏	
网 址	<a href="http://www.ouc-press.com">http://www.ouc-press.com</a>	
电子信箱	hpjiao@hotmail.com	
订购电话	0532-82032573 (传真)	
责任编辑	矫恒鹏	电 话 0532-85902349
印 制	日照日报印务中心	
版 次	2014 年 6 月第 1 版	
印 次	2014 年 6 月第 1 次印刷	
成品尺寸	185 mm 3 260 mm	
印 张	19.625	
字 数	454 千	
定 价	49.00 元	



# 前言

PREFACE

大沽河流域位于胶东半岛西部,在东经 1208039~1208259,北纬 368109~378129 之间,发源于烟台市招远阜山,由北向南,于莱西市道子泊村北约 500 m 处入境。流经莱西市、平度市、即墨市、胶州市和黄岛区,于胶州市河西屯以南码头村入胶州湾,干流全长 179.9 km,流域总面积 6 131.3 km<sup>2</sup>,其中青岛市境内面积 4 781.01 km<sup>2</sup>,是胶东半岛的最大河流。流域内包含产芝水库、尹府水库等大中型水库 8 座,是青岛市最大、最稳定的本土水源。

大沽河流域是青岛市经济发展的重心,但是随着经济的发展和人民生活水平的提高,水资源需求迅猛增加,水资源短缺已成为制约该流域发展的瓶颈因素。随着工农业发展对水资源需求的不断增加,地下水 and 河道水污染状况较为严重,进一步加剧了该地区的水资源短缺状况。因此在滨海流域如何提高水资源利用率、开源节流、遏制海水入侵和优化配置不同水源、保护水环境、采取可持续水资源管理措施等就变得尤为重要。

本书以青岛市大沽河流域为主要研究区,通过大沽河流域水资源及其开发利用现状调查评价,全面分析了流域水资源的数量、质量及其时空分布和水资源开发利用状况,明确了水资源开发利用潜力和面临的问题、缺水类型和解决途径等,针对滨海地区水资源特性,为了改善大沽河流域水资源监测系统,形成了大沽河流域实时监控体系技术方案,完善了大沽河流域水资源实时监测功能;按照地表水和地下水联合运用、统一配置的原则,建立了大沽河流域地表水-地下水水量联合调度模型,实现了水资源的优化调度;建立了大沽河流域平原区地下水水量、水质模拟模型,运用模型预测了各种人为影响和各种开发方案产生水量和水质的变化,进行了地下水资源的合理分配;结合滨海地区水资源短缺的实际情况,开展了非常规水源利用示范研究。最后,本书提出了大沽河流域用于定量分析水管理措施产生的社会经济影响的方法体系,形成了大沽河流域水资源可持续利用管理技术体系,为实现大沽河流域的水资源可持续利用,保障青岛市社会、经济和环境的可持续发展提供科技支撑。

本书第 1 章、第 2 章、第 7 章由于万春撰写,第 3 章、第 4 章由崔峻岭、黄修东撰写,第 5 章由刘贯群、黄修东撰写,第 6 章由刘青勇、崔峻岭、徐桂民撰写,第 8 章由刘青勇、王爱芹撰写,第 9 章由于万春、刘青勇撰写。全书由于万春、刘青勇统稿和定稿。

本书的出版得到了水利部公益性科研经费专项“大沽河流域水资源可持续管理技术研究(201101058)”的资助。在此表示诚挚的感谢!

我们谨向给予本课题研究和本书关心支持与帮助的各位领导及科技人员致以衷心的感谢!并衷心期望得到读者对本书的批评指正。

本课题的研究基准年为2010年,因此书中立论都基于当时的青岛市行政区划,特作说明。



<b>第一章</b>	<b>研究背景与研究内容</b> .....	1
第一节	研究背景 .....	1
第二节	国内外研究进展 .....	2
第三节	主要研究内容 .....	10
<b>第二章</b>	<b>研究区概况</b> .....	13
第一节	自然地理 .....	13
第二节	河流水系 .....	14
第三节	区域地质及水文地质条件 .....	16
第四节	社会经济概况 .....	22
<b>第三章</b>	<b>青岛市大沽河流域水资源调查评价</b> .....	23
第一节	流域水文要素时空分布 .....	23
第二节	水资源数量评价 .....	30
第三节	水资源质量评价 .....	49
第四节	水资源开发利用情况调查评价 .....	57
<b>第四章</b>	<b>大沽河流域水资源实时监测方案</b> .....	71
第一节	地表水资源监测方案优化 .....	72
第二节	地下水资源监测站网布设及优化 .....	91
<b>第五章</b>	<b>大沽河流域平原区地下水源地水量和水质模型及其应用</b> .....	113
第一节	大沽河水源地地下水流数值模型 .....	113
第二节	地下水资源量评价 .....	135
第三节	大沽河平原区地下水源地硝酸盐数值预报模型.....	151

<b>第六章</b>	<b>流域地表水 - 地下水水量联合调度研究</b> .....	168
第一节	水资源供需平衡分析 .....	168
第二节	水资源承载力评价与分析 .....	186
第三节	流域地表水—地下水水量联合调度模拟 .....	192
第四节	模拟结果分析 .....	200
<b>第七章</b>	<b>大沽河流域节水和非常规水源利用示范工程研究</b> .....	205
第一节	大沽河流域节水和非常规水利用概况 .....	205
第二节	大沽河梯级拦河坝雨洪水利用模式 .....	207
第三节	胶州市万亩节水灌溉示范区技术和管理模式 .....	221
第四节	大沽河流域污水回用示范 .....	237
<b>第八章</b>	<b>大沽河流域水资源可持续利用管理技术体系</b> .....	246
第一节	水管理概述 .....	246
第二节	水管理措施对社会经济影响的评价指标体系 .....	250
第三节	水管理措施对社会经济影响的评价模型 .....	265
第四节	灰色系统预测模型 .....	282
第五节	大沽河流域水资源可持续利用管理方案 .....	286
第六节	大沽河流域水资源可持续利用管理技术体系 .....	291
<b>第九章</b>	<b>结论与建议</b> .....	295
第一节	结论 .....	295
第二节	建议 .....	300
	<b>参考文献</b> .....	302

## 研究背景与研究内容

### 第一节 研究背景

水是生命之源、生产之要、生态之基，既不可或缺，又无以替代，是经济社会和人类发展所必须的资源要素。水资源危机的出现和加剧与人类在经济活动中缺乏对水资源的有效保护和管理有着重要的关系。水资源是社会经济发展的重要自然资源，人类的绝大多数经济活动都要涉及水资源。可持续发展是当前和未来人类社会与经济发展的基本战略目标。关于可持续发展的定义和解释多种多样，但都基本围绕着“满足目前需要但不破坏未来发展需求的能力”这一核心思想。实现社会的可持续发展的一个重要内容就是实现水资源等自然资源的可持续利用。在人类追求可持续发展目标的前提下，实现水资源的可持续利用要求人类必须正视干旱洪涝灾害、水资源短缺、水环境污染等水资源危机，这也给水资源管理活动提出了新的要求和挑战。实现可持续的水资源利用目标必须改变传统的水资源管理活动，以可持续发展的观点、系统的观点和综合的观点构建全新的现代水资源管理技术体系。

中国是个缺水大国，水资源并不丰富，但用水浪费惊人，供求问题十分突出。这个结论，并非危言耸听。我国人均水资源占有量大大低于世界平均水平，仅列世界第 88 位。而且随着人口的迅速增长，人均水资源每年在递减。从淡水资源看，世界人均占有量为 12 900 m<sup>3</sup>，我国仅 2 695 m<sup>3</sup>，还不到世界人均占有量的 1/4。

联合国环境规划署预测，水的问题将会同 20 世纪 70 年代的能源一样，成为 21 世纪初世界大部分地区面临的最严峻的自然资源问题。联合国的分析资料指出：地球的淡水比例仅占 2.8% 左右，其中 99% 以上蕴藏在南北两极的冰雪中或在地下水，其余不到 1% 的淡水又有将近一半被土壤和空气吸收，余下的部分蕴藏在地球表面分布极不均等的江河湖泊之中。据统计，过去的 50 多年，全世界淡水使用量增加了将近 4 倍，每年高达 4 130 km<sup>3</sup>，农业用水占全部用水的 60%，因为过去的 20 余年中，灌溉面积增加了 1/3 以上。亚洲国家的用水量增长最快。据预测，亚洲的用水量将从目前占世界用水量的一半上升

到近 2/3。可持续水资源管理强调未来变化、社会福利、水文循环、生态系统保护等完整的水资源管理,可持续水资源管理已被许多发达国家接受,这方面的研究在我国尚处于起步阶段。

大沽河流域位于胶东半岛西部,东经 1208039~1208259,北纬 368109~378129 之间。干流全长 179.9 km,流域总面积 6 131.3 km<sup>2</sup>(含南胶莱河 1 500 km<sup>2</sup>),流域内包含产芝水库、尹府水库、高格庄水库等大中型水库 8 座,其中青岛市境内面积 4 781.01 km<sup>2</sup>,是胶东半岛的最大河流。流域内包含产芝水库、尹府水库等大中型水库 8 座,是青岛市最大、最稳定的本土水源。大沽河流域是青岛市经济发展的重心,但是随着经济的发展和人民生活水平的提高,水资源需求迅猛增加,水污染加重,水资源短缺已成为制约该流域发展的瓶颈因素。流域地表水资源的开发利用困难,平原区工农业用水以开采地下水为主。随着工农业发展对水资源需求的不断增加,地下水和河道水污染状况较为严重,进一步加剧了该地区的水资源短缺状况。因此在滨海流域如何提高水资源利用率、开源节流、遏制海水入侵和优化配置不同水源、保护水环境、采取可持续水资源管理措施等就变得尤为重要。

本书为水利部公益性行业科研专项项目,旨在对大沽河流域现状水资源开发利用存在问题分析的基础上,开展可持续水资源管理技术研究,优化调度水资源,提高水资源可利用率,防治地下水污染,保护生态环境,落实最严格的水资源管理制度,促进滨海流域的水资源可持续利用,保障社会、经济和环境的可持续发展。

## 第二节 国内外研究进展

### 一、水资源监测

#### (一) 国外研究现状

在地表水监测站网优化方面,由于水文存在的多样性和差异性,加之水文站网发展,不仅要考虑一个地区的地理和气候条件,还要综合考虑政治、经济、文化等诸多因素,因此,迄今为止,尚难对一个地区的站网密度界定一个具体的标准。根据不同地区水文站网发展的实际和经验,可以提出站网设计的一般性指导意见,这就是世界气象组织(以下简称 WMO)提出的容许最稀站网的水文测站密度的概念。<sup>[1]</sup>容许最稀站网是一个与当地整个发展水平基本相称,并能够在水资源开发和管理上避免发生严重缺陷的站网,这样一个站网为今后满足特定的社会需求而进行站网扩充提供了基本骨架。随着经济的发展,水文站网应该在容许最稀站网基础上不断发展,其演变反映了适应社会对水文资料不断提出新的需求的动态过程。根据 WMO 对各国平均情况推荐的最稀站网密度,可以大致评价一个地区的水文站网基本应达到的下限密度。

20 世纪 60 年代以后,水文站网规划在理论上和实践上有了重大进展,提出了一些可用于某些方面的定量技术,但至今还没有一次大规模的、考虑到资料效用的定量的水文站网优化,这种成效甚微的情况,可以说在一定程度上是由于该课题本身的难度造成的,水文站网规划的定量分析方法主要有以下几种。<sup>[2]</sup>

### 1. 卡拉谢夫法

卡拉谢夫于 1968 年提出的方法,用于确定一个流量站网中测站数量范围,要求能估出所关心区域中任意站点的长期径流平均值及各年的径流量,且要求符合预期的误差标准。其理论基础是规定流域中心点的最小距离,以便对平均流量增量的估算误差不大于预定值,同时规定流域中心间的最大距离,以限制流量的估算误差。该方法就是希望在收集资料的重复程度最小化与保持要求的内插精度之间取得平衡。

### 2. 最优内插法

由 Gandin 于 1965 年提出,能用于确定一个水文站网的观测站点的最小空间密度,使站点间的线性内插值具有预定的精度。其理论基础是用实测的水文过程空间相关结构来推导出一个确定最优权重的关系式,将这个最优权重用于实测资料,使任何未测地点的水文过程估计误差最小。而站网的几何特点决定误差最大的站点,限制最大误差是该法所采用的设计标准。

### 3. 克里格法

克里格法是根据水文过程的空间相关结构来确定最优站点位置的方法,其理论基础是根据实测水文过程的空间相关结构,推导出计算模型的最优权重,将该权重应用于实测资料的处理,使任何无实测资料的地点的水文过程估算误差最小,最优权重提供了一个误差估算的定义,而站网的几何条件确定了误差最大的站点,在图上对水文变量估算误差的改进作出主观评价是确定站点位置的准则。

### 4. 测站间测法

由于预算或其他方面的原因要压缩测流活动时,这种方法利用两个流量站记录的相关关系,将保留的测站的资料转换到中断的测站,关于平均流量或年洪水的信息,对每个测站都作使用或不使用资料的估算。根据减少测站后的站网的相对信息量最大来选择要减测的测站。

### 5. NARI 法

NARI 用流量特征值与自然地理特征值的回归关系作为区域化的手段。回归关系的真正精度与测站数目及用来进行回归分析的记录长度的关系,是造成时间、空间和模型误差的原因,这些误差是区域性回归分析中固有的,也是记录站间相关的原因。对这种误差分量中的不确定性用贝叶斯统计方法进行处理。

### 6. 方格法

方格法是利用降雨径流的分布模型,并考虑了时间、空间和测量的误差来控制区域化的精度,其基于的假设是误差源是迭加的而不是相互影响的、基本模型是足够精度的对于区域化没有多大的误差。

Matalas (1976) 讨论了利用回归关系进行流量站网规划的一些问题。Carrigan 和 Golden (1975) 在蒙大拿、伊利诺斯和乔治亚州进行了精减地表水站网的工作,方法是采用整数规划来解决站网规划问题。<sup>[3]</sup> Hughes 和 Lettenmaier (1981) 用克里格法在参数估计和站网规划应用中对资料的需求进行了研究,表明在与水文有关的典型样本大小范围内,克里格法对站网规划可能比资料分析具有更大的应用潜力。近几年,站网优化理论

方面的成果不多见,而在经济效益指导站网规划和优化方面的工作得到了世界各国的重视。在地下水监测站网优化方面,20世纪50年代,前苏联B. H. 波波夫以水文地质分析法为基础给出地下水动态的监测及组织办法(B. H. 波波夫,1958)。<sup>[4]</sup>60年代,国际科学水文协会 IASH(1965)在加拿大的魁北克和瑞士的伯尔尼(1966)以监测网规划为主题召开学术讨论会。国外对地下水监测网研究的重视真正起始于70年代中期,缘由是美国政府在这一阶段陆续颁布了一系列有关水环境保护法规,例如《洁净水法》(*Clean Water Act*, 1972),《安全饮用水法》(*Safe Drinking Water Act*, 1973),《有毒物质控制法》(*Toxic Substances Control Act*, 1976),《资源保护与恢复法》(*Resource Conservation Recovery Act*, 1976)等,促使政府加大了水资源和环境保护研究的力度。布朗等对确定区域监测井网位置的原则和结果进行了讨论(布朗等,1972)。联合国粮农组织在《地下水污染》中详细论述了设计地下水质量监测系统的原理(1979,罗马)。科瓦列夫斯基(1982)和戈德堡(1984)对从某一区域监测网获得的监测数据进行了讨论。<sup>[5]</sup>Marios S, James E P及 Olea R. A. 用 Kriging 法研究了美国 Kansas 州地下水监测网设计,认为可将现有的327口监测井减少至241口,而不影响现有监测网获取水文地质信息的精度(Marios S等,1982)。Van Geer 从理论上提出了地下水监测网设计的卡尔曼滤波技术,该方法既考虑了地下水系统的特征,又考虑了输入、输出的动态特征(Van Geer, 1982)。R. H. 布朗等基于水文地质分析法给出不同地区地下水监测网的定位原则(R. H. 布朗等,1983)。Van Braekt 和 Romijn 把 Kriging 法应用于荷兰 Gelderland 省地下水位基础监测网的设计(Van Braekt 等,1985)。B. C. 科瓦列夫斯基从水文地质分析法出发,概括了地下水监测项目(B. C. 科瓦列夫斯基,1987)。H. A. Loaiciga 开发出混合整数规划技术,用于地下水水质监测网优化,使地下水动态网优化与经费总预算结合起来(H. A. Loaiciga, 1989)。90年代,Loaiciga H A 等对 Kriging 系列方法在地下水水质取样点网的评价与设计中的应用的研究进行了概述与展望分析。<sup>[6]</sup>Timothy B S 和 Lucila C 提出了两种地下水水质监测网设计方法,即标准统计技术和地质统计技术,地质统计技术能确定出网的密度。Wokdt 等提出用多重标准决策和地质统计方法来优化监测网点的数目。Orab 等利用 Kriging 法来研究监测点数目的多少与污染物质量和浓度方差信息的得失关系。Cameron 等利用全局 Kriging 加权方法来确定冗余监测点的位置,并通过解释 Kriging 方差的变化来检查信息的丢失状况。

## (二)国内研究现状

新中国成立以前,我国仅有各类水文站353处,其中水文站148处,<sup>[7]</sup>测站设备一般很简陋,记录残缺不全,资料缺少整编刊印,并且分布极不合理。新中国成立后,1955年开始全国性的站网规划原则研究,主要是学习、移用前苏联的经验,即大江、大河按直线原则布设,中小河流按区域代表性原则布站,小河以站群原则布设。这项工作于1957年结束,并于1959年编印了《全国水文基础站网规划报告》,规划内容包括:流量、泥沙、水位、蒸发、水化学、试验站等7个方面。到1960年,已建成水文站3365处。这些被规划的站点绝大部分是目前我国水文站网中的骨干。1978年根据当时水文站网存在的问题,在全国范围内开展了第三次水文站网规划工作,但由于各种原因,这次规划全国实际只完成了40%左右。1980年,在水利部水文局的领导和组织下,建设了一批站网专题试验基地,如江西雨量站密度试验区、站队结合试点区等,同时分专题进行站网规划方面的研究探索。

这些专题为:① 湿润、干旱两个中小河流站网规划协作组,对站网规划的原理和方法进行了全面系统的研究,在站网分析方面有所创新;② 受水利工程影响的水文站网部署组,通过实验和研究,在 1988 年编写湿润区受调节河流水文站网调整部署和观测方法,提出了一套可行的判断水利工程影响程度的定量指标和站网调整对策;③ 平原地区站网布设原则协作组,提出了在平原水网区水文测验的对象是水平衡区,将水平衡区分成大区、小区、代表片 3 级进行站网规划;④ 水库水文站网研究组,经过多年的努力,提出了将水库站作为基本水文站的挑选条件,并刊印出水库水文站观测部署及水库水文规律的技术总结。1992 年水利部发布了《水文站网规划技术导则》,这对推动我国水文站网事业的发展具有深远的意义。<sup>[7]</sup>

周仰效将 Kriging 法应用于郑州市地下水监测网优化研究。<sup>[8]</sup> 宋儒等在格尔木河流域地下水监测网优化设计中应用了 Kriging 法(宋儒, 1991)。1992 年任彦卿等应用 Kriging 法进行陕西两华地区地下水监测网的优化,提出了地下水流系统确定—随机数值模型,研究地下水动态监测网密度、位置及频率,同时优化设计问题,开发了适用于微型计算机的 FEMKAL 软件包(任彦卿, 1992)。<sup>[9]</sup> 古利培用模糊聚类分析原理,对哈密市历年地下水监测数据加以整理并进行优化分析,以信息量损失最少为原则将水质性质相似的多点并为一类,将原来的 8 个点位优化为 6 个,以较少监测点位数,并能代表城市地下水总体的污染水平和变化趋势,结果较为符合实际(古利培, 1994)。<sup>[10]</sup> 李劲等应用聚类分析方法研究对安阳市地下水监测点位进行了优化。他们利用聚类分析(Q 型)来优化监测点位。即将 35 眼井作为样本,将上述地下水中 8 种主要污染物质的 5 年平均浓度作为样本的变量进行了优化(李劲等, 1997)。<sup>[11]</sup> 2000 年任彦卿提出一种地下水流系统有限元与卡尔曼滤波耦合的模拟算法。该算法考虑了地下水运动的确定性和随机性特点,可用于地下水监测网的优化设计,并应用该算法对大庆地区地下水动态监测网进行了分析。任彦卿等对淄博市大武水源地监测网进行优化时在对岩溶地下水流系统分析的基础上,建立了地下水流系统确定性—随机性数学模型,运用有限元与卡尔曼滤波耦合的模拟递推算法,对大武水源地地下水监测网进行了优化设计(任彦卿、边方农, 2003)。<sup>[12]</sup> 陈植华应用信息熵法进行河北平原区域地下水监测网的优化研究,利用信息熵理论和技术来评价每一个监测孔数据的信息含量大小,计算每一对监测孔之间的信息传递大小,判断空间上监测孔的冗余性的基础,最后的对比结果证明,即使将目前监测孔的数量减少 26% 后,对现有监测网提供信息的能力几乎没有影响(陈植华、丁国平, 2001; 陈植华, 2002)。<sup>[13-14]</sup> 刘志明等运用 BP 神经网络方法构建了地下水动态监测网的质量评价模型,并以甘肃省武威盆地的地下水位监测网为例进行了实例研究,得出在武威和清源附近地下水监测点密度大于 0.09 眼 /km<sup>2</sup> 的三个区域,需要进一步调整地下水监测点结构。武威以东、双城以南的地下水位漏斗区和武威以西的山前地带,需要增加地下水监测点。其他地下水监测点密度小于 0.03 眼 /km<sup>2</sup> 的地区,则需要根据实际情况而决定(刘志明等, 2006)。<sup>[15]</sup> 董殿伟在北京市地下水水位监测现状基础上,采用编制地下水动态类型图的方法,对北京平原地下水监测网的监测密度和监测频率进行了优化设计。优化后,北京平原共有监测孔 400 眼,其中新设计监测孔 100 眼,手工监测频率由原来的每月 6 次优化为每月 1 次(董殿伟等, 2007)。<sup>[16]</sup> 王庆兵等采用编制地下水动态类型图的方法优化设计了济南岩溶泉域

地下水水位监测密度,通过对地下水水位多年变化趋势的分析确定了手测监测频率(王庆兵等,2007)。<sup>[17]</sup>朱瑾等对乌鲁木齐河流域区域地下水水位监测网进行密度优化时采用了基于 ARCGIS 技术的叠加合成地下水动态类型分区图的方法,采用时间序列分析方法确定了地下水水位监测频率(朱瑾等,2007)。<sup>[18]</sup>

## 二、地下水水量和水质模型模拟研究

从 1950 年开始,采用数值法研究复杂条件下的地下水运动规律逐渐盛行。随着计算机技术的迅猛发展,数值模拟的应用愈加广泛,技术更加成熟,是定量评价地下水资源的主要手段之一。<sup>[19]</sup>当前的地下水数值模拟研究集中在以下方面:① 在地下水资源开发利用中,与地下水水量问题有关的数值模拟研究;② 为了提高用水质量,保护水源、避免污染、减少危害,数值模拟有关地下水水质问题的研究;③ 使用数值模拟方法解决管理方案,监测开发利用等方面的问题,用来规划水资源,充分发挥水资源的最大作用;④ 数值计算方法的改进,软件的升级,用以提高计算精度。

### (一)国外研究现状

在国外,数值模拟领域所做的工作侧重于地下水系统数值模拟软件的开发,为了适应不同尺度变化的研究,这一环节也是数值模拟法的薄弱环节。<sup>[20]</sup>

Anderson 等<sup>[21]</sup>(1992)指出地下水系统数值模型工作程序所包括的内容,为数值模型建立的正确性提供了保障。Porter 等<sup>[22]</sup>(2000)使用 DFM(Data Fusion Modeling)量化水文学、地质学和地球物理学的数据与模型的不确定性。Mazzia 等<sup>[23]</sup>(2002)研究数值计算方法的改进,提出了一种特别的数值方法求解高盐度地下水运移。Mehl 等<sup>[24]</sup>(2002)使用新的插值和误差分析的方法,用于二维局部网格细分法的有限差分地下水模型,提高数值模型模拟结果的可靠性。

地下水系统数值模拟软件功能多样,具有可视化、求解方法多样化、模块化、交互性等特点,尤其是(MODFLOW)得到广泛使用。Juan 等<sup>[25]</sup>(1996)运用 ARC/INFO 和 MODFLOW 建立了美国 Jackson Hole 地区水流模型,进行了水均衡评估。Nielsen 等<sup>[26]</sup>(1987)用有限差分法建立了丹麦哥本哈根大区域地下水水流模型,评价了地下水与地表水之间的增补关系。BAUER 等<sup>[27]</sup>(2006)建立了博茨瓦纳 Okavango 三角洲区域地下水与地表水联合模拟模型,模拟上游来水和当地用水之间的关系。BRAVO 等<sup>[28]</sup>(1991)在美国弗吉尼亚州滨海平原建立了地下水三维流模型。

地下水数值模拟也有很多的水质模拟方面应用。CROWE 等<sup>[29]</sup>(2004)在加拿大安大略湖 Point Pelee 湿地建立了地下水流及水质污染物运移模型,评价湿地与地下水间相互作用和污染物腐殖质的运移情况。在美国内布拉斯加州 Ogallala 市,ISLAMM 等<sup>[30]</sup>(1998)建立了地下水三维流与溶质运移模型。美国明尼苏达州政府(1999)为了明尼阿波利斯—圣保罗市区的污染物运移问题,开发了覆盖 7 800 km<sup>2</sup>,名为 Metro Model 的大型区域地下水流模型。<sup>[31]</sup>RIVERA 等<sup>[32]</sup>(1996)就人类活动对地下水垂向流动方向盐分浓度的变化影响作了研究,建立了德国 Konrad 放射性废物填埋场地下水流及溶质运移模型。

### (二)国内研究现状

国内在该领域也做了大量的工作,主要是使用数值模拟方法解决实际问题,深入理论

研究,不断提高模拟结果的精度与可靠性。

卢文喜<sup>[33]</sup>(2003)就边界条件对数值模型的影响进行了分析,在分析各种耦合效应之前先对边界条件进行预报。吴剑锋、朱学愚<sup>[34]</sup>(2005)对 MODFLOW 的特点和求解方法等做了详细论述,指出 MODFLOW 的实用性代表了未来地下水流数值模拟软件的发展趋势。邓彬、顾小芳<sup>[35]</sup>(2005)研究了裂隙岩体渗流,分析了不同介质模型的优缺点。陈彦、吴吉春<sup>[36]</sup>(2005)提出了非均质含水层的地下水数值模拟的处理方法。陈劲松等<sup>[37]</sup>(2002)针对 MODFLOW 中 PCG2 与 SIP 法求解方法进行了分析,SIP 法相比 PCG2 精度不佳。

地下水数值模拟软件 MODFLOW 在国内使用的实例也很多。余维、王博等<sup>[38]</sup>(2006)应用 MODFLOW 对三河市地下水进行了模拟。周念清等<sup>[39]</sup>(2000)较早地将 MODFLOW 应用于宿迁市地下水资源评价中。贾金生等<sup>[40]</sup>(2002)用 Visual MODFLOW 建立了栾城县地下水流模型,定量评价了地下水位对不同开采量的响应。张斌等<sup>[41]</sup>(2004)建立了三江平原地下水三维流数值模型,用于确定各单元及全区的地下水补给量和评价可开采量。丁飞等<sup>[42]</sup>(2008)应用 Visual MODFLOW 软件模拟研究了沈阳石佛寺水库中蓄水高度与地下水之间的影响关系,并提出不同的布井方案,预测水库不同蓄水高度情形时的地下水可开采量。邵景力等<sup>[43]</sup>(2003)在黄河下游河南段建立了地下水三维流数值模拟模型,计算了地下水多年平均补给资源量和可开采量。马驰等<sup>[44]</sup>(2006)在西华水源地使用 MODFLOW 进行了地下水资源的模拟与预报。钱家忠等<sup>[45]</sup>(2001)回顾了近几十年来地下水资源评价与管理模型方面取得的研究成果,重点评述了参数识别及其尺度效应问题、地下水资源管理模型的求解等。

在水质方面,程东会<sup>[46]</sup>(2007)用数值模拟研究了北京城近郊区地下水硝酸盐氮,考虑反硝化作用,建立了硝酸盐氮三维运移模型;金咪等<sup>[47]</sup>(2003)将 Visual MODFLOW 用于地下水流场及水质模拟。刘建霞、袁西龙<sup>[48]</sup>(2006)建立青岛市大沽河平原区地下水流模型,并在此基础上建立了水质模型,经过识别验证,模拟了地下水中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{Cl}^-$  等的变化趋势并分析治理对策。张翠云、马琳娜等<sup>[49]</sup>(2007)研究了石家庄的水文地质情况,建立了二维潜水水流模型,并在此基础上建立了硝酸盐运移模型。李宏卿等<sup>[50]</sup>(2003)采用 Visual MODFLOW 对长春城区的地下水位、 $\text{Cl}^-$  浓度进行模拟和预报,在此基础上,应用 Visual MODFLOW 软件,建立了长春城区地下水开采预警系统。

### 三、地表水、地下水联合调度技术研究

#### (一)国外研究现状

##### 1. 线性规划模型

第一次在联合运用系统加入线性规划是由 Castll 和 Lindebory 在 1961 年解决地表水与地下水在水量分配过程中应用的。5 年后, Draup 根据参数线性规划法,确定规划流域水资源开发利用,以满足农业灌溉用水的要求。1970 年以后, Feinerman 和 Yaron 共同提出了一个联合使用的混合灌溉水含盐量不同程度的线性规划模型。<sup>[51]</sup> 1987 年, Willis 解决了一个地表水—地下水运行管理问题,主要包括四个地下水含水单元和一个地表水库,采用了线性规划法,同时,他又在这个基础上,与 SUMT 法相结合求解了水库与地下水含水层的联合管理问题。<sup>[52]</sup>

## 2. 动态规划模型

动态规划方法是一种适用范围非常广的数学方法,主要应用在最优化技术中,它可用于分析系统的多阶段决策过程,为了实现整个系统的最好决策方案。在研究地表水与地下水联合调度时,综合考虑地表水库不同季节的水量问题及阶段多样等特性,采用动态规划模型会较好地模拟与分析。<sup>[53]</sup> 20世纪60年代,国外学者 N. Buras 和 W. A. Hall 最早将动态规划引入到地面水和地下水的联合运用系统,建立了一个地面水和地下水联合运用模型。1969年, Herman 和 Buras 建立了考虑水质因子的动态规划模型,但是这些研究都没有解决多种水源联合运用问题的维数障碍,于是 Noel 在 1982年应用动态系统最优控制理论将联合运用问题表达为离散时间、线性二次控制问题进行求解。<sup>[54]</sup> 1993年, Nathant 和 Buras 在复杂水资源系统中,包括由多个流域、水库和河流组成的,也使用了地表水系统优化控制模型。<sup>[55]</sup>

## 3. 模拟技术

数学模拟方法最早被应用与解决联合运用问题是在 20世纪60年代初,由美国哈佛大学水资源规划小组完成的。1972年, Young 和 Bredhoeft 提出了由水文模型和经济模型组成一个模拟模型。<sup>[56]</sup> 1986年, Morel 和 Seytoux 分别推导了河流系统、含水层系统以及复合系统的离散积分核函数和卷积形式,合并后的系统有严格的物理描述,该方法解决单位脉冲响应空调系统的物理模型系统的响应。<sup>[57]</sup> 针对集中参数系统的河流含水层联合管理问题,1992年, Hantush 和 Jenkins 应用迭加原理反映了河流对含水层开采的响应,并引入了一个河流水量损失函数 SDF。

## 4. 随机优化技术

1974年, Madock 提出一种河流含水层系统在随机需水条件下的运行管理问题。1978年 Dudley 和 Burt 考虑了随机河流含水层系统的流动条件。1980年 Jimshidi 使用了机遇约束方法并提出了多级随机管理模型。1995年 Pera, Ita Cantiller 和 Terry 在阿肯色流域东北部采用连续静态优化方法,以流域地下水、地表水总供水量最大为最终目标,将各时段、各单元地表水可供水量和地下水可供水量设定为决策变量,建立了地表水和地下水模拟优化(S/O)模型。<sup>[58]</sup>

## 5. 其他方法

1969年, C. S. Revell 首先提出了机遇约束,经过多次研究模拟又提出线性规划相结合模型。<sup>[59]</sup> 1973年, Johnstone 等根据动态规划与模拟技术,对地表水、地下水和地表水库、地下水联合系统进行测定,以确定最优容积, Chaudhry 通过使用优化技术来确定最佳的水库库容、渠道供水能力和引水能力。<sup>[60-63]</sup> 1986年, S. A. Sloiman 在结合许多优化方法的基础上提出了在离散变量空间下的优化模型。J. H. Yen (2001)根据需水预测和可供水量分析对我国台湾省南部的地下水和地表水联合运行进行了研究。<sup>[64-65]</sup>

## (二)国内研究现状及进展

### 1. 动态规划法

1989年,曾赛星和李寿声在内蒙古河套灌区地表水与地下水联合调度优化中采用动态规划方法确定各种作物灌溉定额及灌水次数。1991年,林学钰等人运用动态规划方法

对平顶山市白龟山水库进行了地表水与地下水的联合调度。<sup>[66]</sup> 1992年,唐德善以黄河中游某灌区为例,采用分层动态规划法,确定工业和农业之间的水资源分配比例。<sup>[67]</sup>

## 2. 线性规划和非线性规划方法

1983年,李寿声等根据史密斯教授模型和我国的实际情况拟定了地表水资源和地下水资源联合运用的线性规划模型。1986年,李寿声在徐州欢口灌区建立了一个既考虑灌溉排水和降低地下水位的要求,同时又考虑水资源联合调度的非线性规划模型,以确定最佳的种植模式和作物需水的供应比例。<sup>[68]</sup> 1993年,郭元裕等以扩大灌溉面积为目的对湖南白沙灌区地表水与地下水联合调度进行了研究,最终得到了需要的扩大供水的方案。

## 3. 模拟技术

1982年,袁宏源、马文正等对地表水与地下水联合运用都进行了一系列的研究和建模。1991年初,在国外的一些设计方法的基础上,我国首次研制成功了水资源系统模拟模型——HBSIM模型。1999年方生主要采用由灌溉需水量模型与潜水含水层水量调控模型组成的组合模型模拟和计算了地表水和地下水联合运用。<sup>[69]</sup> 2003年,倪深海等在模拟水资源系统的基础上,通过计算机数据处理,完成了对地表水和地下水联合调度模拟模型的建立。<sup>[70]</sup>

## 4. 多目标优化理论

1987年,程玉慧和茹履绥分别对灌区地表水与地下水联合调度进行了目标优化和重迭分解。1993年,刘建民等在京津唐地区建立了水资源大系统供水规划和调度优化多目标模型,并得到了如何使模拟技术和优化技术结合起来的方法,同时对已经建好的地表水库群和地下水含水层进行了优化调度。<sup>[71]</sup> 20世纪90年代初,谢新民等利用系统理论、模糊数学、应用数值模拟以及矩阵方法,以解决地表水—地下水资源系统和模糊决策问题,建立多目标联合经营管理模式的水库群和地下水资源系统,提出了一种目标——坐标计算方法。<sup>[72]</sup> 1995年,朱文彬、周之豪等根据大系统递阶优化控制理论,把区域内供水系统和用水系统看作整体进行研究,根据供水和需水的特点,对大规模地表水—地下水联合系统进行分解,将若干个子系统分别进行研究并建立各子系统的优化管理模型,依据各子系统之间的相互关系与整个水资源系统的管理目标,在最高阶上设置总协调级模型,协调各子系统之间的关系,进而实现较满意的优化结果。<sup>[73]</sup> 1995年,沙鲁生等建立的微山湖水资源多目标系统模拟模型得到了较好的效果,主要是采用了模拟技术,这一技术属于应用系统分析。<sup>[74]</sup> 时隔一年,石玉波等根据系统的响应函数理论,提出了适应于地表水与地下水联合管理方面问题的广义响应函数的概念,使复杂的联合管理问题进行简化处理。<sup>[75-81]</sup> 齐学斌等在1999年采用大系统分解协调算法,对试验区建立黄河流域地表水与地下水联合调度的分层管理模型。<sup>[82]</sup> 同年向丽等根据分解和协调原则,建立了一个分布模型的水资源优化配置的方法,提出了层次模型,选择合理的解决方案来解决多水源、多用户和多保证率的问题。<sup>[83]</sup>

## 5. 其他方法

近年来,遗传算法、对策论、存贮论、动态规划逐次渐近法、模糊理论及决策支持系统等方法越来越多地应用到地表水与地下水联合运用系统中。20世纪90年代初,黄冠华等

针对灌溉面积的规划与线性规划管理中的一些模糊问题,提出了模糊线性规划的应用程序来解决这个问题,并对两个例子进行分析,结果表明:模糊线性规划是解决灌溉面积和规划管理的一种有效方法,对灌区的水资源规划和管理具有非常好的指导意义。同年,颜志俊又提出了一种多年联合使用地表水—地下水的算法,即在一系列的时间间隔计算的基础上,在对水库的水资源分配和地下水位动态变化的过程中,最终使各用水单元在早期与后期的地下水埋深的调节是平衡的,也对它们的动态过程进行收敛,使得地下水位长期保持一个动态平衡。<sup>[84]</sup> 1995年薛松贵等在研究水资源规划时,提出了一种系统模拟,是以最小费用最大水量的方法,这种模拟相比其他模拟方法具有非常明显的优势,得出在对水资源可持续利用规划进行建立模拟模型时,使用此方法可以满足和解决遇到的相关技术问题。<sup>[85]</sup> 1995年,蔡喜明等将区域水资源规划归入到宏观经济范畴中,解释了基于宏观经济条件下的区域水资源系统概念,在此基础上又基于宏观经济模型和其他模型对区域水资源规划进行多目标集成系统的建立,将系统各个要素当成一个整体,形成系统的总体控制模型。1995年10月,延耀兴等在水资源系统多目标决策中加入了系统工程中的限界搜索法,使决策中的模糊决策问题得到了解决。<sup>[86]</sup>

### (三) 发展趋势

综上所述,国内外几十年来在地表水与地下水联合调度的应用中,都取得了长足的进展,并且得到了不少有价值的成果,这些成果不仅在提高流域(或区域)经济效益和社会效益方面发挥了作用,在理论上也有不少创新。

地表水与地下水联合调度发展趋势主要体现在以下几个方面:①从单一目标发展为多目标;②采用人工智能技术、决策支持系统、专家系统、灰色模糊系统等技术方法;③水量模型和水质模型耦合成一体,以流域水环境生态效益最优为目标;④多种模型的组合;⑤大系统优化理论的应用;⑥注重理论与实践的结合,从多角度进行水资源联合调度研究。

## 第三节 主要研究内容

### 一、研究目标

通过大沽河流域水资源及其开发利用现状的调查评价,全面分析流域水资源的数量、质量及其时空分布和水资源开发利用状况,明确水资源开发利用潜力和面临的问题、缺水类型和解决途径等。按照地表水和地下水联合运用、统一配置的原则,建立大沽河流域地表水—地下水水量联合调度模型,实现水资源的优化调度;建立了大沽河流域平原区地下水源地水量、水质模拟模型,运用模型预测各种人为影响和各种开发方案产生水量和水质的变化,进行地下水资源的合理分配;研究节水和非常规水源利用技术并开展非常规水源利用示范研究;针对滨海地区水资源特性,改善大沽河流域水资源监测系统,形成大沽河流域实时监控体系技术方案,完善大沽河流域水资源实时监控功能。在全面完成项目各个专题的基础上,提出大沽河流域用于定量分析水管理措施产生的社会经济影响的方法体系,形成大沽河流域水资源可持续利用管理技术方案,为实现大沽河流域的水资源可持