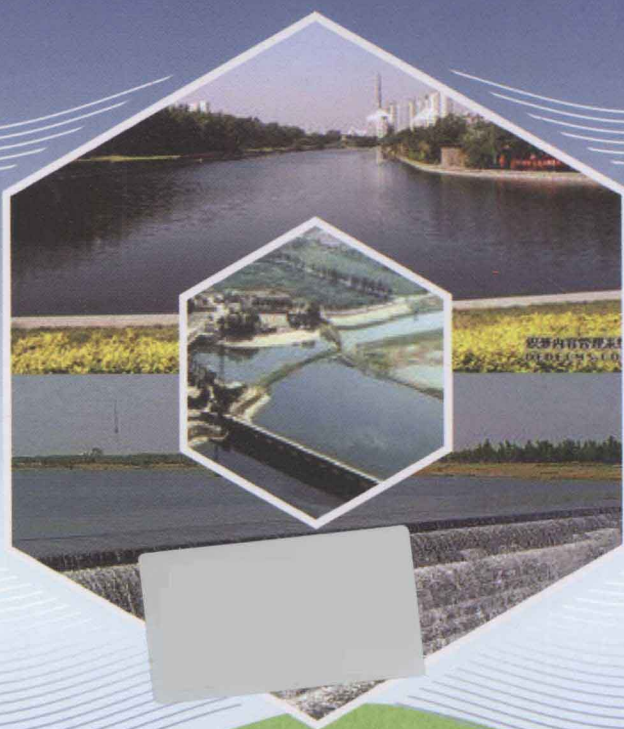


生态友好的 流域闸坝调度与灌溉模式研究

徐建新 陆建红 张仙娥 著



科学出版社

生态友好的流域闸坝调度与 灌溉模式研究

徐建新 陆建红 张仙娥 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对我国北方地区水资源短缺、污染严重、生态退化等问题,以北运河流域为例,在满足河流生态需水要求的条件下,开展河流闸坝调度及生态友好的清污轮灌模式研究。本书提出河流生态调度概念,进行了流域生态调度的理论研究,制定出分时期的闸坝生态调度准则与控泄方案,通过耦合水动力学、水质模型构建了北运河闸坝生态调度模型,模拟北运河不同频率年的常规和生态调度工况,分析其水动力学特性和水质特性。针对通用 SWAT(soil and water assessment tool)模型存在的不足进行了修改与完善,并在此基础上构建了研究区农田非点源污染模型。根据研究区的灌溉现状、灌溉制度等制定不同的灌溉情景,利用改进的 SWAT 模型对所设定情景进行模拟计算,研究农田氮磷流失特征,得到北运河生态友好的清污轮灌模式。针对流域农业生产活动中普遍存在的化肥施用过量并已造成农田非点源污染的现状,制定出当地控制农田非点源污染的适应性对策。建立河流闸坝调度和清污轮灌模式的综合评价指标体系和模糊综合评价模型,对北运河闸坝生态调度和生态友好型清污轮灌模式的综合效益进行了评价。

本书可供农业水土工程、水文水资源、生态环境、水环境等方面研究的科技人员和高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

生态友好的流域闸坝调度与灌溉模式研究/徐建新,陆建红,张仙娥著.
—北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035851-6

I. ①生… II. ①徐… ②陆… ③张… III. ①河流环境-流域环境-区域生态环境-环境保护-研究-北京市 ②河流污染-污水灌溉-研究-北京市
IV. ①X522.06②S273.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 252982 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:钟 洋
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 9 月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:196 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国北方地区存在水资源短缺、污染严重、生态退化、清水资源不足、再生水利用率偏低等问题,在满足河流生态需水要求的条件下,开展河流闸坝调度及生态友好的清污轮灌模式研究具有重大的现实意义。本书针对北运河流域,开展河流闸坝生态调度与生态友好的清污轮灌模式研究,有助于保护流域水环境质量、维护河流生态健康、高效利用各类水资源,实现水资源可持续利用和经济社会可持续发展的目标。本书主要研究内容与成果如下:

(1) 研究河流闸坝生态调度理论,建立北运河闸坝生态调度模型。提出了河流生态调度概念,针对北运河现状调度方案及存在问题,进行闸坝生态调度的理论研究。建立了河流水动力学模型和水质模型,通过耦合这两个模型构建了北运河闸坝生态调度模型。

(2) 制定北运河闸坝生态调度方案,研究北运河闸坝生态调度模式。在阐述北运河闸坝生态调度的意义与可行性的基础上,制定出分时期(丰水期、平水期、枯水期)的闸坝生态调度准则与控泄方案。利用建立的北运河闸坝生态调度模型模拟北运河现状年、丰水年、平水年、枯水年和特枯水年的常规和生态调度工况,分析其水动力学特性和水质特性,进而得出闸坝生态调度对流域水生态环境的改善起到积极作用的结论。

(3) 改进通用 SWAT 模型,构建农田非点源污染模型。收集研究区域基础数据资料,构建 SWAT 模型所需空间数据库和属性数据库。针对本书研究内容,分析了通用 SWAT 模型存在的不匹配性,并运用 C# 语言进行了改进,建立了北运河下游的农田非点源污染模型。

(4) 制定不同的清污轮灌情景,研究北运河下游生态友好的灌溉模式。在广泛调查研究区农业灌溉现状和灌溉制度的基础上,综合考虑多种因素,制定当地主产作物和主要种植模式下的清污轮灌情景。利用改进的 SWAT 模型模拟不同灌溉定额条件下的清污轮灌情景,研究农田氮磷流失特征,得到北运河下游现状灌溉水源情况下的生态友好型清污轮灌模式。

(5) 制定非点源污染的适应性对策。针对北运河流域农业生产活动中普遍存在的化肥施用过量并已形成农田非点源污染的现状,提出从源头控制、过程阻断、末端治理三方面入手,制定出控制农田非点源污染的措施。

(6) 北运河闸坝调度与清污轮灌模式综合效益评价。构建河流闸坝调度与清污轮灌模式综合效益评价模型。建立河流闸坝调度和清污轮灌模式的综合评价指

标体系,采用层次分析法确定指标权重,结合模糊数学理论和 Delphi 法构建模糊综合评价模型。并对北运河闸坝生态调度和生态友好型清污轮灌模式的综合效益进行了评价。

全书共 9 章。第 1 章综述了水资源配置、河流生态调度、污水灌溉和农田非点源污染的研究进展与发展趋势;第 2~8 章分别介绍了流域生态调度的理论、河流闸坝生态调度模型与农田非点源污染模型、研究区概况、北运河闸坝生态调度研究及其应用、生态友好的清污轮灌模式研究、农田非点源污染的适应性对策研究、基于生态友好的北运河闸坝调度与清污灌溉模式综合效益评价;第 9 章对全书作了总结,并对有待进一步研究的问题作了展望。

第 1 章由徐建新撰写,前言和第 2~9 章由陆建红、张仙娥撰写。全书由陆建红统稿。

本书是在国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209)——北运河水系水量水质联合调度关键技术与示范研究课题子课题 4——基于分质水资源优化调配的北运河河流水系生态适应性管理模式研究等科研工作的基础上撰写而成的。

本书的出版得到了华北水利水电学院省级重点学科——农业水土工程学科及国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209)的支持,在此表示感谢。

在项目研究和本书的撰写过程中,得到了华北水利水电学院陈南祥教授、马建琴教授、谷红梅副教授所给予的各方面的无私帮助和指导,在此向他们表示诚挚的谢意。同时也非常感谢闫旖君博士、赵鹏和刘宏利硕士等为本书相关研究所做的工作。在本书正式出版之际,特向有关领导、专家及为本书付出劳动的各位同仁表示由衷的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 水资源配置研究	3
1.2.2 河流生态调度研究	6
1.2.3 污水灌溉研究	9
1.2.4 农业非点源污染研究	11
1.3 研究方案	14
第 2 章 流域生态调度	17
2.1 传统闸坝调度的弊端	17
2.2 闸坝生态调度的目标	18
2.2.1 生态调度的要求	18
2.2.2 生态调度的内容	18
2.3 河流闸坝生态调度准则	19
2.3.1 生态调度的基本准则	20
2.3.2 生态调度原则	20
2.3.3 不同时期调度的影响和要求	21
第 3 章 河流闸坝生态调度模型与农田非点源污染模型	23
3.1 河流闸坝生态调度模型	23
3.1.1 河流水动力学模型	23
3.1.2 河流水质模型	25
3.1.3 河流闸坝生态调度模型	27
3.2 农田非点源污染模型	28
3.2.1 SWAT 模型的发展概况	28
3.2.2 SWAT 模型的结构和原理	30
第 4 章 研究区概况	43
4.1 自然地理概况	43

4.2	水系结构	43
4.3	水文气象特征	45
4.4	社会经济概况	46
4.5	污染源特征分析	47
第5章	北运河闸坝生态调度研究及其应用	48
5.1	闸坝生态调度的理论研究	48
5.1.1	北运河闸坝生态调度的意义与可行性	48
5.1.2	北运河闸坝生态调度目标	54
5.1.3	北运河闸坝生态调度准则	54
5.1.4	北运河闸坝生态调度控泄方案	55
5.2	北运河闸坝生态调度模型	56
5.2.1	基本方程	56
5.2.2	方程离散与求解	56
5.2.3	初始条件和边界条件处理	59
5.2.4	内边界条件处理	61
5.3	北运河闸坝生态调度模型的应用	63
5.3.1	平水年各处闸坝的流量变化过程	63
5.3.2	平水年各处闸坝的水位变化过程	65
5.3.3	平水年各处闸坝的流速变化过程	67
5.3.4	平水年各处闸坝的 COD 变化过程	69
5.3.5	平水年各处闸坝的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 变化过程	69
5.3.6	其他工况各处闸坝的水质变化过程	70
第6章	生态友好的清污轮灌模式研究	75
6.1	资料收集与数据库的构建	75
6.1.1	空间数据库的构建	75
6.1.2	属性数据库的构建	78
6.2	研究区 SWAT 模型的建立	82
6.2.1	子流域的划分	82
6.2.2	水文响应单元的分配	84
6.2.3	气象数据信息输入	84
6.2.4	数据库的编辑输入	84
6.3	SWAT 模型运行设置	85

6.4	SWAT 模型的不足与改进	85
6.4.1	模型的不足	85
6.4.2	对模型的改进	86
6.5	模型的率定和验证	92
6.5.1	径流参数率定	92
6.5.2	营养物参数率定	93
6.6	灌溉情景制定	95
6.6.1	灌溉情景制定依据	95
6.6.2	灌溉情景制定	96
6.7	生态友好的灌溉模式研究	97
6.7.1	北运河降雨和径流特征	97
6.7.2	不同灌溉情景下氮流失特征	99
6.7.3	不同灌溉情景下磷流失特征	106
6.7.4	不同灌溉情景下氮磷流失特征	109
6.7.5	生态友好的灌溉模式选择	115
6.8	基于河流闸坝生态调度的生态友好型灌溉模式研究	116
第 7 章	农田非点源污染的适应性对策研究	118
7.1	北运河流域农田非点源污染现状	118
7.2	农田非点源污染的适应性对策	118
7.2.1	化肥农药施用量调控措施	119
7.2.2	农业种植耕作措施	120
7.2.3	化肥农药流失量控制措施	121
7.2.4	流失化肥农药净化措施	122
7.2.5	建立监测、检测和环境评价体系措施	122
7.2.6	完善相关法律法规政策	123
第 8 章	基于生态友好的北运河闸坝调度与清污灌溉模式综合效益评价	124
8.1	基于生态友好的北运河闸坝调度与清污灌溉模式综合效益评价模型	124
8.2	河流闸坝生态调度综合效益评价	125
8.2.1	河流闸坝调度综合评价指标体系的构建	125
8.2.2	评价指标权重的确定	127
8.2.3	模糊评价矩阵的确定	130

8.2.4 闸坝调度的模糊综合评价模型	133
8.2.5 闸坝生态调度的综合效益评价	133
8.3 生态友好型灌溉模式综合效益评价	135
8.3.1 生态友好型灌溉模式综合评价指标体系的构建	135
8.3.2 评价指标权重的确定	135
8.3.3 模糊评价矩阵的确定	136
8.3.4 生态友好型灌溉模式的综合效益评价	137
第9章 结论与建议	139
9.1 主要结论	139
9.2 问题与建议	140
参考文献	141

第 1 章 绪 论

本章首先对研究背景和意义进行了阐述，在总结水资源配置、河流生态调度、污水灌溉和农田非点源污染的研究进展与发展趋势的基础上，针对目前水资源短缺、生态环境恶化等问题，制定本书的具体研究内容与技术路线。

1.1 研究背景与意义

水是生命之源、生产之要、生态之基。水是人类生存、生产活动不可缺少的基本物质要素，是不可替代的重要自然资源；水利是现代农业生产不可或缺的首要条件，是经济社会发展不可替代的重要支撑；水是河湖生命健康的重要因子，是生态环境改善的保障系统。水资源问题不仅关系到防洪安全、供水安全、粮食安全，而且关系到国家安全、生态安全、经济安全。

随着世界人口与经济的不断增长，人类社会对水资源需求量的不断增加，加之人类对自然资源的不合理开发利用，致使水资源日趋紧缺，水环境不断恶化。目前世界上有 80 多个国家，40% 的人口面临缺水问题（王浩，2006）。水资源危机已成为 21 世纪全球面临的人口、资源与环境问题这三大危机中的核心，引起了国际社会的极大关注。1997 年 1 月，联合国发布的《世界水资源综合评估报告》指出：水问题将严重制约 21 世纪全球的经济和社会发展，并可能导致国家间的冲突。20 世纪后半叶困扰世界的中东战争、印巴战争和非洲社会动荡等，实质上大都由水问题引起，水资源已成为影响世界经济发展、社会安定的重要因素。

我国水资源总量为 28124 亿 m^3 ，在世界上仅次于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印度尼西亚，居第 6 位，但人均水资源仅为 2170 m^3 ，约为世界平均水平的 27%，排名第 121 位（喻泽斌，2004）。由于气候、地理等因素的影响，水资源时空分布不均，降水在地域上表现为东南多、西北少，山区多、平原少，与生产力布局不相匹配；同时，降水量年内分配也极不均匀，冬春少雨，夏秋多雨，汛期雨量过于集中，利用难度大，非汛期又往往缺乏水量；另外，降水量的年际变化大，丰水年与枯水年的水量相差悬殊，极易造成水、旱灾害（刘昌明等，1998）。

随着我国经济社会的发展，水资源面临许多突出问题（刘旺，1999；冯尚

友, 2000; 刘昌明等, 2001; 陈志恺, 2002; 左其亭等, 2003; 吴泽宁, 2004; 郑德凤, 2005; 新华社, 2009): ①洪涝干旱灾害频繁。近年来, 气候复杂多变, 干旱和洪涝等灾害频发、多发、重发。2010年, 西南地区发生特大干旱, 多个省份遭受洪涝灾害, 部分地方突发严重山洪泥石流灾害, 造成了巨大损失。2011年, 继年初北方冬麦区发生严重干旱之后, 长江中下游五省区又发生了罕见的春夏连旱, 部分地区人畜饮水困难, 问题突出; 6月南方大部分地区发生大范围强降雨过程, 据统计上半年洪涝灾害造成农作物受灾面积 $259.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 成灾 $115.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 受灾人口 3673 万人, 直接经济损失 432 亿元。②水资源短缺。目前全国年缺水总量约为 300 亿~400 亿 m^3 , 水资源短缺已成为我国社会经济可持续发展的主要约束因素。尤其在北方地区, 水资源短缺问题更为严峻, 水资源不足成为制约其发展的瓶颈, 而且已经开始造成一系列的环境灾害问题。地表水的过度开发, 使得资源性缺水的北方地区呈现出河道断流、湖泊干涸、河口淤积、湿地减少、土地沙化、水域污染、田地龟裂的恶劣生态状况。③水污染日益严重。从 1998~2008 年, 全国污水排放量逐年上升, 从 593 亿 m^3 增长到 758 亿 m^3 ; 2008 年的城市污水处理率仅为 65%, 很多污水未经处理直接排入江河湖库水域, 加重了水体的污染。农药和化肥的使用也加剧了水质污染。由于河流水质恶化导致供水困难, 同时由于过量开采造成地下水位下降, 为废污水的加速渗入创造了条件, 导致地下水污染严重, 使有限的水资源的可利用率降低, 加剧了水资源危机。④生态环境用水不足, 生态系统破坏严重。在当前工业化和城市化进程中, 由于对水资源掠夺式开发及不合理利用等, 造成生活用水和工业用水挤占农业用水, 农业用水又挤占生态环境用水的不合理局面, 从而造成河水断流、河床泥沙淤积、生物多样性锐减、地下水大面积超采、土地沙漠化、自然植被衰退等生态环境破坏问题。⑤流域水资源系统调控能力偏弱。人们对河流流域的治理开发做了大量工作, 取得了很大成绩, 但缺乏统一规划和综合治理, 流域水资源在生活、生产和生态环境用水过程中不能统筹协调, 水资源和水环境容量在各区域之间、各用水部门之间没有得到合理配置。加强水资源规划和管理, 建立科学合理、高效协调的水资源管理体系, 统一调度和管理流域或区域内的水资源, 规范各类水事行为, 从而才能维持水资源的可持续性。以上这些问题已严重制约了我国经济社会的可持续发展。

北运河属于海河流域, 流经北京市、河北省、天津市, 干流总长 142.7 km, 流域面积为 6166 km^2 。流域水资源紧缺, 再生水开发利用程度低。2006 年北京市用水 34.3 亿 m^3 , 污水排放量 12.9 亿 m^3 , 处理污水总量 9.6 亿 m^3 , 利用再生水 3.6 亿 m^3 , 其中利用市区再生水 3.45 亿 m^3 。按照产业利用分类, 农业利用再生水 1.99 亿 m^3 , 工业利用再生水 0.89 亿 m^3 , 三产利用再生水 0.15 亿 m^3 ,

环境利用再生水 0.75 亿 m^3 。相对于北京市水资源的紧缺程度,再生水开发利用水平较低,由于缺乏必要的工程措施,市区现有再生水大都就近排入下游河道,最后绝大部分归入北运河。北运河流域多年平均降雨量 561mm (水利部海河水利委员会水文局, 2007),降雨主要集中在 6~9 月,约占全年的 80.3%;多年平均径流量为 4.81 亿 m^3 ,其中山区年均径流量为 1.29 亿 m^3 、平原为 3.52 亿 m^3 。多年平均出境水量(含废污水)为 9.03 亿 m^3 。出境水量主要是城区涝水和废污水。随着经济社会的快速发展,北京城市工业废水和生活污水排放量不断增加,而且控污力度不够,大量污废水直接排入河道沟渠,再加上地表水资源的过度开发,河道水量逐年减少,水体自净能力降低,致使目前全区一二级河道水质绝大部分为 V 类水或劣 V 类水质。

综上所述,针对北运河流域城市化和半城市化作用下水污染严重、清水资源不足、再生水利用率偏低、河流生态退化严重、河流功能水量保障条件脆弱、河道综合管理能力尚需有效提高等问题,开展河流生态调度与生态友好灌溉模式研究,保护流域水环境质量,促进北运河绿色生态走廊建设,具有深远而重大的现实意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水资源配置研究

自 20 世纪 40 年代以来,通过各国水利专家和学者的不懈努力,在水资源配置的理论和方法研究方面取得了很多成果。

1. 国外研究现状

在 20 世纪 40 年代, Masse 最早提出水库的优化调度问题。1953 年,美国陆军工程师兵团针对美国密苏里河流域水库的运行调度问题最早提出水资源模拟模型。1955 年,美国哈佛大学“哈佛水资源规划组”提出了将水资源和环境系统统一考虑的设想,并于 1962 年将系统分析引入水资源规划,开始研究水资源配置模型。1960 年,科罗拉多的几所大学开始了水资源优化配置的研究 (Brnus, 1983)。

20 世纪 70~80 年代,伴随数学规划技术的发展和应用,水资源优化配置的研究不断深入。1982 年,在美国召开了“水资源多目标分析”会议,水资源管理多目标决策技术得到了推广应用 (Haimes et al., 1982)。荷兰学者 Romijn 和 Tamiga (1982) 建立了水资源量分配的多层次模型,在体现水资源配置问题多目标特点的同时,体现了层次结构的特点。Yeh (1985) 把系统分析在水资源领

域的应用分为线性规划、动态规划、非线性规划和模拟技术等,并对系统分析方法在水库调度和管理中的研究应用做了全面综述。Willis 等(1987)应用线性规划方法求解了地表水库和地下含水单元构成的地表水和地下水联合运行的管理问题。Dudley(1997)将作物生长模型和具有二维状态变量的随机动态模型相结合,对灌区的季节性灌溉用水量分配进行了研究。

20 世纪 90 年代以来,由于水污染和水危机的加剧,国外开始在水资源优化配置研究中注重水质约束、水资源环境效益和水资源可持续利用问题。Afzal 等(1992)针对 Pakistan 某个地区的灌溉系统建立了线性规划模型,优化了不同水质的水的使用问题,在一定程度上体现了水质水量联合优化配置的思想。Fleming 等(1995)建立了以经济效益最大为目标、以地下水开采量为决策变量的地下水水质水量管理模型,考虑了水质运移的滞后作用,并采用水力梯度作为约束条件来控制污染扩散。David 等(1995)介绍了一种伴随风险和不确定性的可持续水资源规划模型框架,建立了具有两个阶段的水资源联合调度模型。Wong 等(1997)在需水预测中考虑了当地地表水、地下水、外调水等多种水源的联合运用,提出支持地表水和地下水联合运用的多目标多阶段优化管理的原理和方法,并考虑了地下水恶化的防治措施,体现了水资源利用和水资源保护之间的关系。Hamalalnen 等(2001)针对芬兰的 Kymijoki 流域,探讨了多准则水资源管理和多用户协商决策支持系统的框架。Yamout 等(2005)针对黎巴嫩的 Greater Beirut 地区,建立了一个多部门水资源合理配置模型与水资源管理的决策支持系统。

21 世纪以来,随着新的优化算法,如遗传算法、基因算法、模拟退火算法、灰色模拟等的不断完善,这些优化算法开始应用于水资源优化配置;同时,水资源管理模型与地理信息系统、水文模型和经济模型等进行耦合。Minsker 等(2000)利用遗传算法建立了不确定性条件下的水资源配置多目标分析模型。Mckinny 等(2002)利用面向对象技术把水资源管理模型与地理信息系统进行有机地结合,并用来模拟流域水资源分配。

2. 国内研究现状

我国水资源配置方面的研究始于 20 世纪 60 年代,吴仓浦于 1960 年首次提出年调节水库最优运用的动态模型,在微观层次上提出了水资源优化配置的思想(吴泽宁等,2004)。80 年代初,华士乾等研究了北京地区的水资源利用系统工程方法,考虑了水量的区域分配、水资源利用效率、水利工程建设次序和水资源开发利用对国民经济发展的作用,成为我国水资源系统中水量合理分配的雏形(王浩,2006)。进入 80 年代以后,我国学者系统地开展了水资源配置的理论与应用研究,特别是在水资源优化配置的基本概念、优化目标、基本平衡关系、供

水管理、需求管理和各主要模型的数学描述等方面(李雪萍, 2002)。在我国正式提出“水资源优化配置”是在1991年(潘家铮等, 2001)。我国水资源配置方面的研究起步虽然比较晚, 但发展很快。

曾赛星等(1990)在对内蒙古河套灌区的地表水和地下水联合优化调度中, 采用动态规划方法确定各种作物的灌水定额和灌水次数。唐德善(1992, 1994)应用多目标规划的思想, 建立了黄河流域水资源多目标分析模型, 提出了大系统多目标规划的求解方法。翁文斌等(1995)提出了区域水资源配置的多目标宏观决策分析方法, 以BOD排放量最小为优化目标, 实现了水资源配置与区域经济系统的有机结合, 体现了水质水量统一配置的思想, 是水资源优化配置研究思路上的一个突破。黄强等(1999)针对西安市市区供水水源优化调度问题, 建立了多水源联合调度的多目标优化模型, 提出了多目标模型的求解思路和方法。徐建新(2000)建立了有限水资源在多种作物间优化分配的水资源优化动态规划模型, 采用实时修正方法解决了灌区水资源优化研究中只能利用以往数据进行模拟优化, 在实际边界条件(包括降雨、来水)发生变化时难以处理的问题, 使成果在研究思路和成果实用性方面都取得了很大的进步。王浩等(2003)和杨小柳等(2003)针对西北生态脆弱地区的水资源配置问题, 建立了与干旱区发展模式和生态环境保护准则相适应的生态环境需水量的计算方法。徐建新等(2004)以彭楼灌区为例建立了基于大系统分解协调理论的灌区地表水、地下水联合优化的三层谱系结构模型, 对提高水资源利用效率, 缓解灌区水资源短缺和控制地下水超采等问题具有很强的适用性。马建琴等(2004)建立了包括作物非充分灌溉制度的多目标优化模型、农业种植结构的多目标模糊优化模型和多目标大系统分解协调模型的灌区水资源多目标综合优化管理模型。邱林等(2005)将GIS与灌区水资源调度模型集成, 实现了灌区调度管理的可视化, 更好地发挥辅助决策作用, 并结合工程实例阐述了GIS在灌区水资源管理中应用的原理和方法。陈南祥(2006)完善了复杂系统水资源配置的理论和方法, 建立了复杂系统水资源多目标优化配置模型, 提出了水资源配置优化模型与模拟模型的有机耦合技术。徐建新等(2007)根据南水北调中线工程河北省受水区的水资源特点, 以充分利用外调水、提高重点供水目标保证率、促进区域水资源供需状况相对平衡为目标, 建立了区域水资源优化配置模型。梁团豪等(2009)运用运筹学和规则模型方法, 构建了面向经济耗水与生态耗水总量控制的基于优化技术的水资源配置模型和基于规则的水资源配置模型。

3. 发展趋势

随着人水和谐思路的提出与可持续发展战略的实施, 涉及社会、经济、技术和生态环境等诸多因素的水资源复杂大系统问题面临新的挑战。笔者认为, 在新

形势下水资源优化配置的研究重点应从以下几方面着手。

1) 水质水量联合配置和调度

根据前述,已有研究成果较少考虑水资源配置过程中水量和水质之间的联系和影响;少数成果虽考虑了水质问题,或从水质管理角度出发,或在优化目标中考虑污水或某种污染物排放量最小,却没有充分反映水量和水质与经济社会发展之间的联系,造成有限的水资源没有得到充分高效利用。在未来发展中,水质导致的水资源危机大于水量危机。基于可持续协调发展战略的水资源配置和调度应考虑水资源系统中供需各方的水量和水质情况,充分体现水资源的“优水优用、劣水劣用”的分质供水思想,解决水资源短缺问题,改善和保护生态环境。

2) 充分体现可持续协调发展战略

已有研究成果在建立水资源优化配置模型时,没有充分考虑社会经济-水资源-生态环境的协调发展。目前,如何体现社会经济-水资源-生态环境协调发展的思想以使综合效益最大已成为研究目标,需从理论和技术上体现水资源配置与社会经济发展、生态环境改善、人口发展的协调性,以水资源可持续利用支撑和保障经济社会的可持续发展,是必须解决的问题之一。

3) 加大考虑生态环境需水要求

在已有的水资源优化配置模型中,多以经济效益最大,或供水量最大、缺水量最小等为目标,很少考虑生态环境的需水要求。因此,基于人水和谐思想,进行考虑生态环境需水的水资源优化调度研究势在必行。

为了促进水资源的可持续协调发展,维持生态环境健康,需对各类水资源进行科学合理的系统调配,遵照生态、高效和公平的原则,以水资源的可持续利用、生态环境的稳定、经济社会的可持续发展为目标,对有限的、不同形式的水资源,通过各种工程和非工程措施在生活用水、生态需水、灌溉用水、生产用水等用水对象之间进行科学的调度和配置。

1.2.2 河流生态调度研究

河流闸坝生态调度属于水资源调度的一种形式。水资源调度根据目的不同,可以分为防洪调度、供水调度、水库调度、航运调度、水沙调度、生态调度、水质调度等,其中后3类主要是通过水量的调节来解决泥沙、生态环境和水质问题(阮仁良,2003)。随着人们对生态环境的重视和环境问题的日益严重,针对河道水质和生态环境改善而开展的水资源调度工作,日益受到人们的重视。

生态调度是从河流生态安全的角度提出的。目前,学术界对“生态调度”还没有给出十分明确的统一的定义。例如,Johnson等(2004)提出,为减轻闸坝

对河流生态造成的影响,应在一定时期内,致力于改变水库调度方式,保护河流生态。蔡其华(2006)提出,在满足坝下游生态保护和库区水环境保护要求的基础上,充分发挥水库的防洪、发电、灌溉、供水、航运、旅游等各项功能,使水库对坝下游生态和库区水环境造成的负面影响控制在可承受的范围内,并逐步修复生态环境系统。董哲仁等(2007)提出水库多目标生态调度是在实现防洪、发电、供水、灌溉、航运等社会经济多种目标的前提下,兼顾河流生态系统需求的水库调度方式。

笔者认为河流生态调度是指在保证工程和防洪安全的前提下,通过河流闸坝联合调度,以维持水量、改善水质、维护河流生态健康为重点而进行的流域水资源调度形式。闸坝生态调度的核心内容是将生态因素纳入到现行的闸坝工程调度中去,并将其作为必需因素,根据具体工程的实际特点制定相应的生态调度方案。生态调度是闸坝调度发展的新阶段。

1. 国外研究现状

国外生态调度研究始于20世纪40年代,从满足航运流量到保护水生生物流量,逐步发展到维持河流生态系统完整性的流量管理(Richter et al., 1997; Johnson et al., 2004),相继研发了生态需水计算最小连续30d平均流量法、Tennant法、7Q10法、R2CROSS法、河道湿周法和IFIM法等。

最早进行引水调度改善河道水质的是日本,在国际上更多的是利用水库、水闸控制河道流量来确保河道的水质目标,通过闸坝调度使得水体流动起来,以提高水体自净能力,改善水质。北美洲、欧洲、非洲等国家均开展了生态调度实践研究。在乌克兰(魏什涅夫斯基,1994),德涅斯特河针对河流无机氮化合物污染率高的情况,于1987~1992年在德涅斯特罗夫水库进行了若干次生态性放水试验,确定4月底到5月初水库加大放水后,能显著改善水质,恢复生态环境。Petts(1996)研究了生态需水量和水生物生长、繁殖与河流流量的关系。Hughes等(1998)建立了满足生态需水的水库调度模型。美国大古力水坝和哥伦比亚流域水库为充分满足维持或增强溯河产卵的鱼类种群的寻址需求而开展调度;乌克兰德涅斯特河水库以防止水华为目标而进行调度;南非水库(Hughes et al., 2003)为管理整个流域的生态需水量而进行调度。

2. 国内研究现状

目前,国内大型水利工程的调度主要以防洪、发电和改善航运为主,适当兼顾水产、旅游及改善中下游水质等功能(钮新强等,2006)。水库调度的优化决策系统主要考虑以上述目标作为决策变量,专门的调度要求考虑较少。目前生态调度在国内处于理论探讨及初步实践的研究阶段。20世纪80年代国内

学者开始研究各种鱼类的最适合生长温度,并关注水库水温分层现象对生态的影响。贾海峰等(2001)以北京密云水库为研究背景,分析了水库的水质分布特征,并在此基础上研究了水库调度与富营养物质削减之间的关系。傅春和冯尚友(2000)探讨了可持续发展中的水资源持续利用(如生态水利)的基本原理,给出了水资源持续利用的概念、定义及内涵,表述了原理内容及其关键的整体、协调、优化和良性循环四个环节的意义与关系,提出了水资源持续利用的数学模型。董哲仁(2003a, 2003b)提倡水利工程学应吸收、融合生态学的理论,建立和发展生态水工学。于龙娟和夏自强等(2004)针对生态水文的实际情况,结合现有国内外的各种最小生态径流计算方法,提出了逐月最小生态径流计算法和逐月频率计算法。余文公和夏自强等(2006, 2007)提出水库为了保持河流适宜流量要建立生态库容,并计算了新疆大西海子水库的生态库容。夏军等(2008)和张永勇等(2008, 2009)以变化环境下流域水循环为基础,研究了闸坝群影响下河流水量的变化机理,探讨了闸坝对河流水质影响评价的理论基础,提出了基于流域水循环过程认识和模拟的闸坝影响评价体系及“耦合-分离”系统分析方法。郭正鑫(2009)以温榆河 SWAT 模型为基础,对比分析了全流域内有闸、无闸等情景下河流水文情势和水环境过程的变化。张永勇等(2010)将闸坝水量水质联合调度模型、遗传算法耦合到流域综合管理模型 SWAT 中,从流域尺度上探讨了闸坝的合理调度模式,并在北京市温榆河流域进行了实例研究。王昭亮等(2010)针对多闸坝河流水污染事件多发的环境问题,建立了水量水质耦合调度模型,分析了闸坝对河流水质的物理调节作用。左其亭等(2011)以淮河流域为例,探讨了闸坝对河流水质水量影响评估及调控能力识别技术研究所面临的关键科学问题,为闸坝水质水量联合调度提供了理论支持。

3. 发展趋势

总的说来,闸坝生态调度目前还是国内外较新的研究课题,也是今后水资源调度发展的趋势。对于闸坝生态调度尽管已有一些相关研究并取得了一定的成果,但闸坝对水质改善作用的研究仍需进一步深化、细化,尤其是在城市化半城市化河道中有多座闸坝参与调度的闸坝群生态调度,其调度准则和调度方式还没有系统的理论研究,定量描述闸坝对河流水质改善作用的大小还需深入探讨。

生态系统建设是新时期水利工作的重要任务,优美的环境、良好的生态系统是社会进步的迫切需要,是经济社会可持续发展的必然要求。在治水实践中,既要考虑生活用水、经济用水,又必须充分考虑生态环境用水,必须坚持人与自然和谐共处的原则。因此,如何维持河流生态系统的正常功能,修复受