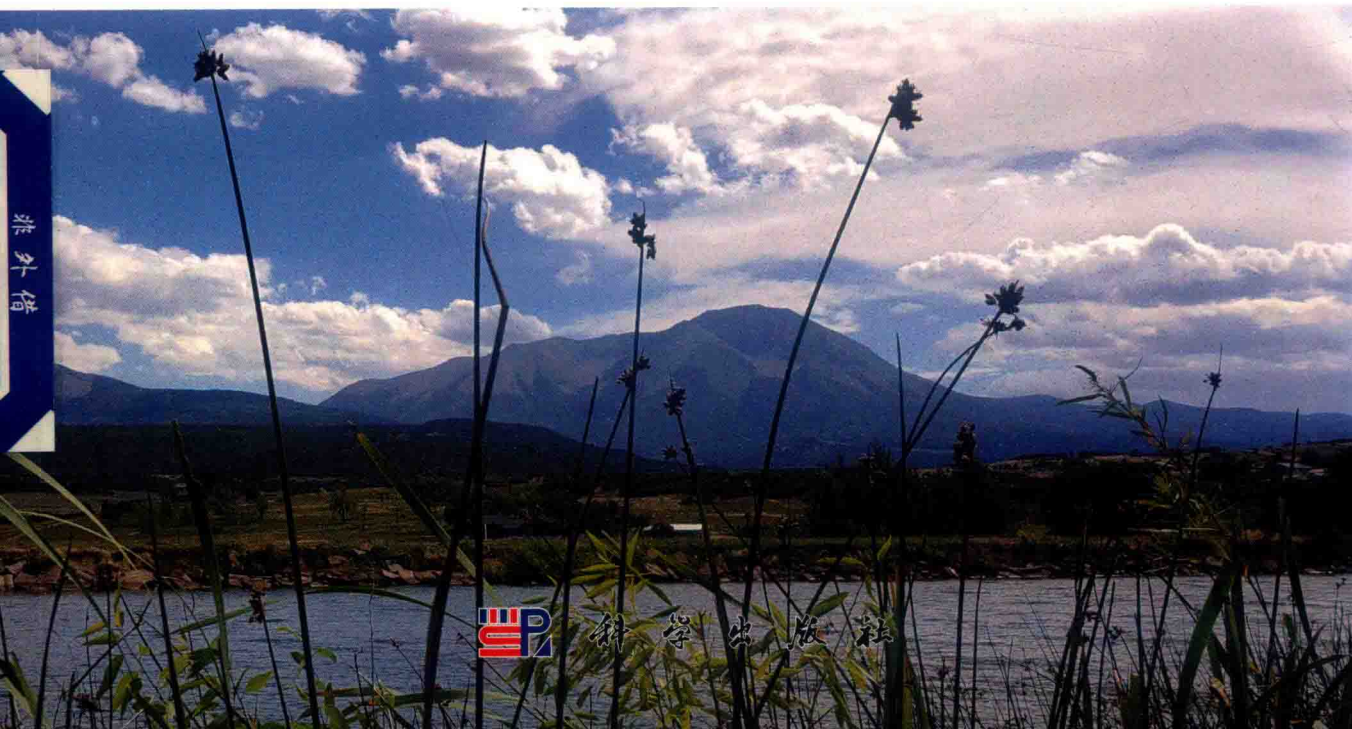




闸控河流水文生态效应 分析与调控

左其亭 梁士奎 陈 豪 李冬锋 等 著



非
外
借



科学出版社

闸控河流水文生态效应 分析与调控

左其亭 梁士奎 陈 豪 李冬锋 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以闸坝数量众多、水资源和水环境问题较为突出的淮河流域一级支流沙颍河为例,系统地介绍了闸控河流水文生态效应分析的理论基础、关键技术、野外实验、数学模型、调控与保障体系,是作者2009~2018年持续开展沙颍河水文生态研究工作的系统总结,主要内容包括:①闸控河流生态水文效应分析、水生态系统健康评价相关理论与方法研究;②闸控河流水量-水质-水生态实验研究;③闸控河流水量-水质-水生态模型研究;④闸控河流水量-水质-水生态调控研究及保障体系构建。本书介绍的多闸坝条件下河流水量-水质-水生态调控能力识别、生态水文效应实验与分析、调控模型构建及应用、水生态和谐调控、生态需水调控等内容,对于提高闸控河流水安全保障能力和水资源保护与水生态系统健康水平有着重要的参考价值。

本书可供研究和关心河流水文、水资源与水生态的各专业人士参考,也可供从事水资源、水生态、水利工程、地理科学、资源环境及有关专业的科技工作者和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

闸控河流水文生态效应分析与调控/左其亭等著. —北京:科学出版社, 2019.9

ISBN 978-7-03-062215-0

I. ①闸… II. ①左… III. ①拦河闸-影响-河流-水文环境-生态效应-研究 IV. ①X321 ②TV66

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第182806号

责任编辑:杨帅英 赵 晶 / 责任校对:何艳萍

责任印制:吴兆东 / 封面设计:图阅社

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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019年9月第一次印刷 印张:12

字数:280 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

通过修建闸坝的方式进行河流水资源的开发利用,对于支撑经济社会发展具有重要的意义。闸坝的建设运行对保障生产生活用水起到了重要作用,与此同时,对河流自然状态的改变也引发了一系列水资源及生态环境问题。随着河流综合开发与联合调度工作的不断开展和深入完善,人们对于河流水环境问题发生的机理和闸坝作用规律的科学认识逐步提高,针对闸坝建设对河流生态系统的影响,研究水文过程中的各种机理与规律,进行科学的闸坝水量-水质-水生态综合调控,对于协调水资源开发利用和河流生态系统保护之间所存在的矛盾,不断改善和修复受损的河流水生态,保障河流水环境和区域水安全具有重要意义。

郑州大学水科学研究团队自 2009 年以来,选取以多闸坝为特色的淮河水系沙颍河流域作为研究示范区,针对人类高强度活动影响下的河流水资源和水环境问题,基于现场调查和实验观测,深入开展了理论研究和技术应用,积累了丰富的基础资料,取得了一系列研究成果。针对沙颍河区域水资源和水环境问题的研究方面,其先后承担并完成了国家重大水专项专题、国家自然科学基金、高等学校博士学科点专项科研基金、水利部重大项目专题等多个项目;以沙颍河区域相关研究为主要内容,培养了 5 位博士研究生、12 位硕士研究生。自 2012 年开始,本研究团队在沙颍河流域持续开展水生态调查实验(每年度两次),在沙颍河干流槐店闸开展闸坝调度现场实验(每年度一次),为河流水资源和水环境研究积累资料,保障和推动相关科研工作的持续开展。本书是研究团队对沙颍河研究系列成果的系统总结,聚集了所有参与者的智慧,是集体智慧的结晶。主要内容概括如下。

(1) 多闸坝河流水文生态环境效应量化及评估研究

基于收集的长序列水文资料及在研究区沙颍河流域 2012~2016 年开展的水生态环境调查实验,深入探索与分析研究区水量、水质、水生态特征,并采用客观、适宜的评价方法,对研究区水体富营养化、水体污染程度、水生态健康状况进行科学、可靠的评估,分析闸坝建设对河流生态系统的影响。

(2) 闸控河流水量-水质-水生态相互作用机理分析

从定性的角度,依据迁移-转化理论、能量流动与物质循环理论、生态效应理论,对闸控河流水量-水质、水质-水生态、水量-水生态两两作用分析深入到水量-水质-水生态三者相互作用分析。以研究区水生态环境调查实验数据为基础,以闸控河流水量-水质-水生态相互作用机理为支撑,识别影响水生态环境特征的关键因子,构建闸控河流水量-水质-水生态相互作用的量化方程与模型。

(3) 闸控河流水量-水质-水生态模型研究

结合在淮河及沙颍河流域开展的水污染联防实践,在沙颍河槐店闸开展闸坝调控试

验, 构建闸坝作用下的水动力-水质模型, 分析闸坝对河流水质、水量的作用; 提出闸坝防污调控的概念和内涵, 并构建“兼顾兴利、防洪、防污需要”、基于模拟-优化的闸坝防污调控模型, 采用多目标遗传算法和模糊优选方法对模型进行求解, 研究闸坝优化调控方案; 提出闸坝防污限制水位的概念和内涵, 构建闸坝防污限制水位模型, 并应用该模型开展多场景模拟, 分析单一闸坝和闸坝群对河流水质、水量的作用。

(4) 闸坝河流水生态健康和谐调控模型体系构建

基于开展的流域水生态调查实验, 结合对水体理化指标和生态指标时空分布特征的分析, 优选出适合于闸控河流的水质生态学评价方法; 提出闸控河流水生态健康的概念及内涵, 识别出影响河流水生态健康程度的关键因子, 从而构建闸控河流水生态健康评价指标体系, 提出水生态健康综合指数评价方法; 基于和谐论理论, 以改善河流水生态健康程度为目标, 构建“面向水生态健康程度最大化、考虑闸坝作用能力约束和水质-水量-水生态互动关系”的闸控河流水生态健康和谐调控模型。

(5) 闸控河流水量-水质-水生态综合调控保障体系

基于闸坝条件下的生态水文效应分析, 考虑水资源优化配置需求, 构建基于生态水文响应机制的闸控河流生态需水调控方法体系框架, 构建考虑自然水流情势的闸坝生态调度多目标模型; 以典型闸坝调控实验为基础, 分析短期调控与长期调控对河流水量-水质-水生态造成的影响, 采用已构建的闸控河流水量-水质-水生态相互作用量化模型, 演算闸坝调控影响的演变特征, 并构建闸坝生态调控模型, 对典型闸坝进行优化调控。

本书由左其亭、梁士奎、陈豪、李冬锋、刘静、罗增良撰写。另外, 还有多位研究生参与了实验和研究工作, 主要有博士研究生韩春辉、李佳璐、张修宇、赵衡、郝明辉, 硕士研究生高洋洋、胡瑞、王园欣、刘子辉、陈耀斌、梁静静、郭丽君、陶洁、李来山、许云锋、毛翠翠、崔国韬、魏钰洁、刘军辉、李可任、王园欣、张志强、杨会明、臧超、靳润芳、郭唯、宋梦林、刘欢、王亚迪、石永强、史树洁、韩春华、王妍、纪璿芯、郝林钢、王豪杰、王鑫、李佳伟、李东林、韩淑颖、吴滨滨、李星、宋玉鑫、刁艺璇、冯亚坤等, 以及博士后张伟、甘容。

本书得到国家自然科学基金(51709238、U1803241、51779230)和郑州市水资源与水环境重点实验室的经费支持。向支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢, 感谢科学出版社同仁为本书出版付出的辛勤劳动。此外, 作者参阅了大量的参考文献, 并尽可能在引文处标注相应的参考文献, 其中有些内容可能属于表述上雷同, 但不是直接引用, 或者很难查到最早的出处, 所以很难准确标出所有的参考文献, 在此谨向这些文献的作者一并致谢。

由于本书涉及知识面广, 受资料及作者水平所限, 虽几经改稿, 书中疏漏和不足之处在所难免, 欢迎广大读者不吝赐教。

作者
2019年4月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 河流水资源开发利用	1
1.2 河流水生态问题	2
1.3 闸坝建设的水文生态效应	3
1.4 需要研究和解决的关键科学问题	6
1.5 研究状况及成果创新	8
第2章 理论基础与关键技术	12
2.1 河流生态水文效应分析	12
2.1.1 河流生态水文系统及其特征	12
2.1.2 河流生态水文效应关键因素	14
2.1.3 闸控河流及其特征	15
2.1.4 闸控河流生态水文效应量化方法	17
2.2 河流水生态系统健康评价	20
2.2.1 闸控河流水生态健康的概念及内涵	20
2.2.2 闸控河流水生态健康评价指标体系构建	21
2.2.3 水生态健康关键影响因子识别	25
2.2.4 水生态健康评价方法及标准	27
2.3 闸坝调控能力识别	29
2.3.1 闸坝调控能力内涵与定义	29
2.3.2 闸坝调控能力评价指标体系	30
2.3.3 闸坝调控能力计算方法	32
2.3.4 闸坝调控能力应用途径	33
2.4 闸控河流水质-水量模拟	34
2.4.1 闸坝对河流水质水量影响机理	34
2.4.2 闸坝对河流水质水量影响模拟	36
2.5 闸控河流水资源-水生态和谐调控	38
2.5.1 闸控河流水生态健康和谐调控概述	38
2.5.2 闸坝生态调控的类型	39
2.5.3 调控体系与模型框架	40
第3章 沙颍河流域水生态系统状况调查	42
3.1 沙颍河流域概况	42

3.2	流域水系结构及特征	43
3.3	流域水文状况分析	46
3.4	流域水质状况分析	47
3.5	流域水生态状况调查分析	49
3.6	流域水生态系统问题分析	53
第4章	闸控河流水文生态效应分析与评价	55
4.1	闸控河流水文生态相互作用机理	55
4.1.1	水量-水质相互作用	55
4.1.2	水量-水生态相互作用	55
4.1.3	水质-水生态相互作用	56
4.1.4	水量-水质-水生态相互作用	56
4.2	闸坝运行的水文效应分析	57
4.2.1	闸坝运行对水文情势的影响	57
4.2.2	闸坝运行的水环境效应分析	64
4.3	闸控河流水生态系统健康评价	66
4.3.1	流域水生态调查	66
4.3.2	水生态健康关键影响因子识别	70
4.3.3	水生态健康评价指标体系构建	78
4.3.4	水生态健康状况评价结果分析	80
第5章	闸控河流量-水质-水生态实验研究	86
5.1	实验区概况	86
5.2	槐店闸水量-水质调控实验	86
5.2.1	2010年3月和10月实验	86
5.2.2	2013年4月实验	91
5.3	闸坝调控水环境实验	99
5.3.1	实验设计	99
5.3.2	水质特征状况分析	100
5.3.3	水生态特征状况分析	104
第6章	闸控河流量-水质-水生态模型研究	107
6.1	闸坝水量-水质防污调控模型	107
6.1.1	单一闸坝作用下的水动力-水质模型	107
6.1.2	闸坝群作用下水动力-水质模型	112
6.1.3	基于模拟-优化的闸坝防污调控模型	119
6.2	闸控河流生态需水调控模型	121
6.2.1	闸控河流生态需水的调控准则	121
6.2.2	闸控河流生态需水的调控目标	122
6.2.3	基于水文情势需求的闸坝生态调度模型	124
6.3	闸控河流水生态健康和谐调控模型	126

6.3.1 调控体系与模型构建.....	126
6.3.2 模型求解方法.....	128
第7章 闸控河流水质-水质-水生态调控研究.....	131
7.1 面向河流水质改善的闸坝防污调控.....	131
7.1.1 单一闸坝对河流水质水量作用分析.....	131
7.1.2 闸坝群对河流水质水量作用分析.....	134
7.1.3 基于模拟-优化的闸坝防污调控.....	139
7.2 面向河流健康的生态需水调控.....	142
7.2.1 生态需水调控与闸坝运行管理.....	142
7.2.2 沙颍河流域典型闸坝生态调度模拟.....	144
7.3 面向河流水生态改善的水生态健康和谐调控.....	146
7.3.1 模型参数率定与模型验证.....	146
7.3.2 调控情景及结果分析.....	150
7.3.3 闸控河流水生态和谐调控措施研究.....	157
第8章 闸控河流水环境综合调控保障体系.....	162
8.1 河流生态需水管理体系构建.....	162
8.1.1 河流适应性管理理论.....	162
8.1.2 生态需水调控的适应性管理.....	164
8.2 河流生态系统需水保障机制体系构建.....	165
8.2.1 河流生态用水管理制度分析及优化.....	166
8.2.2 河流生态需水储备机制分析.....	170
8.2.3 河流生态需水安全预警机制分析.....	172
8.2.4 河流生态补偿机制分析.....	175
8.3 沙颍河流域水资源综合调控管理措施体系.....	176
8.3.1 沙颍河流域生态调度的适应性管理需求.....	176
8.3.2 沙颍河流域水资源和谐调控措施研究.....	178
参考文献.....	180

第 1 章 绪 论

1.1 河流水资源开发利用

水与环境紧密相连，作为基础性的自然资源和物质条件，共同支撑和影响着人类社会的发展。随着人类文明进程的不断向前，对水资源的开发利用程度和技术水平逐步提高，人水关系也随之发生演变。近几十年来，伴随着现代文明的快速发展，人口增长、经济发展和水资源短缺的矛盾不断呈现并日益突出，水资源短缺条件下的经济社会用水与生态环境需水之间的竞争，使得生态用水状况难以得到保证，由此造成河流、湖泊、湿地等水生态系统受到严重干扰和破坏，进而引发一系列的生态环境和社会问题，对区域经济社会的可持续发展造成影响和制约。基于水资源利用与经济社会可持续发展的相互影响，构建和谐的人水关系已成为水资源开发利用的首要任务和重要目标。

水库、闸坝等水利工程设施作为人类对河流水资源开发利用的重要途径，被大量兴建于河流之上，用于进行防洪排涝、蓄水兴利等。从建筑物特征上来看，“水库”具有特定的库容和坝体，“闸坝”兼有水闸和大坝的特点，均具有水量存蓄和调节的功能；从水利工程的功能与性质来看，特定的水库和闸坝可以满足不同条件下的防洪、供水、发电、通航等功能，实现水资源的综合利用。围绕闸坝等水利工程的建设发展，我国水利行业目前大致经历了 3 个阶段（左其亭，2015）：第一阶段为水资源问题尚未凸显的工程水利阶段，时间为 1949~1978 年，该阶段以农业生产的需求为水利建设的基准，水利建设受农业生产的布局、特点影响极大；第二阶段为水资源供需矛盾加剧的资源水利阶段，工程水利明显开始向资源水利转变始于 1997 年前后，资源水利主张把水资源纳入经济社会大系统，以水资源的供需平衡为目标，最终实现水资源的优化配置，相比于工程水利，资源水利的发展是以水资源可持续利用为基础的经济社会可持续发展的必然选择；第三阶段为水环境问题严重制约经济发展的生态水利阶段，随着经济的快速发展以及水环境问题对经济发展制约的愈加明显，近年来，水利行业发展的指导思想在不断发生新的变化，生态水利阶段水利发展的主旨是尊重、维护生态环境，并以人口、资源、环境和经济的协调发展为指导，科学合理地开发、管理水资源，实现当代人和后代人永续发展的用水需求，保障可持续发展。当前阶段，水资源的开发利用和水利工程建设运行及管理，均很注重水量、水质和水生态的平衡与协调发展。按照目前水利发展的总体趋势，随着治水科技的不断进步，经济社会的持续快速发展，我国未来水利发展阶段将进入以“智慧水利”为主的新水利时代，在今后水利事业发展过程中，将充分利用以往成功的水利经验，依托网络通信技术及空间虚拟科技，促进传统水利向智能水利的转变和发展。

水利事业取得的快速发展，在很大程度上同水利工程的大规模建设紧密相关，我国

在自然地理条件复杂多样、经济社会发展用水需求不同的状况下,通过众多闸、坝工程的修建,进行拦蓄、调控和配置水资源,有效缓解了我国水资源分布不均、区域水资源短缺、洪涝灾害与地区干旱等问题,为经济社会可持续发展提供了重要支撑。根据第一次全国水利普查数据,截至2011年,我国已建成水库9.8万多座,总库容达9323亿 m^3 ,过闸流量在 $5\text{m}^3/\text{s}$ 以上的水闸9.7万多座。近些年来,水利基础设施的建设发展仍在不断加大,根据2017年全国水利发展统计公报数据,截至2017年,全国已建成流量在 $5\text{m}^3/\text{s}$ 及以上的水闸10.3万多座,其中大型水闸893座,已建成各类水库9.8万多座,总库容9035亿 m^3 ,其中大型水库732座,总库容7210亿 m^3 ,占全部总库容的79.8%。以“闸坝众多”著称的淮河流域,在2003年之前,流域内已经拥有各类水库5674座、各类水闸5427座,近年来不断有新的闸坝投入运行,2006年位于沙颍河上的耿楼闸开始运行、2009年位于沙颍河上的郑埠口闸开始运行,这使得流域实际的闸坝数量远远不止这些,闸坝建设有力地保障了区域水资源需求,减少了洪涝灾害带来的损失,支撑了流域经济社会的快速发展。

1.2 河流水生态问题

河流是水资源的重要载体,随着水体的不断循环和自然条件的持续演变,形成了包括陆地河岸、河道、湖泊、湿地及河口等一系列子系统的河流生态系统(赵银军等,2013)。从河流结构与功能来看,河流是纵向上物理、化学特性和生物过程的连续统一体,具有自然功能、生态功能和社会功能。在维持物质流动和能量循环的同时,河流为人类提供生产、生活和生态等各类用水,是重要的生命和环境支撑。

河流生态系统中的各生境要素通过水循环过程联系在一起,由河流地貌、水文、水环境、水生态几部分组成统一的结构和功能,在各要素相互作用下,在不同时空尺度上,各要素表现出不同的形式及生态功能。人类活动通过改变生境、生态系统结构和生物地球化学循环等方式对生态系统的服务功能产生影响,这些影响包括人类合理开发和维护生态系统的积极影响,也包括水土资源的过度开发利用所带来的一系列生态环境问题等。例如,闸坝修建、取水退水等不断加剧的人类活动,提供了经济社会发展必要支撑条件的同时,不可避免地引发了河流水文情势变化、水环境恶化、水体生物多样性减少等诸多影响和破坏河流生态系统自然状态的问题。水资源的开发利用在提供经济社会发展用水需求的同时,对生态系统的水循环造成影响,进而导致水生生境受到破坏,生态系统服务功能下降,最终导致洪旱灾害加剧、湖泊湿地萎缩、水体环境恶化、水质污染严重、物种类型减少等诸多问题。

我国地域广阔,河湖众多,地貌类型复杂多样,气候、植被、水文等自然地理条件时空分异显著,不同地区社会经济布局差异较大,水生态系统类型丰富,水生态问题复杂多样。江河、湖泊及湿地是我国水生生物栖息和繁衍的重要场所,众多生物的生长、发育和繁衍是水生态系统良性循环、水生态系统类型丰富多样的基本特征。自20世纪90年代以来,随着经济社会的快速发展,河流湖泊的水资源开发利用程度不断加剧,水生态状况逐步恶化,部分江河源区过度开发导致水生态服务功能衰退,水源涵养能力降

低,水土流失造成土地退化、湖库淤积,并加剧水体富营养化。闸坝、水库等水利工程的修建,严重影响鱼类的生存环境,改变了鱼类的区系和种群结构,如葛洲坝、三峡大坝的修建使得长江特有鱼类中华鲟、白鲟的自然繁殖和生长受到严重影响,围垦导致江河湖泊浅水区消失,严重缩小鱼类等水生生物的生存空间;外来物种入侵,威胁本地水生生态系统安全;江河沿岸天然湖泊、湿地面积萎缩,洪水调蓄能力减弱,水污染威胁人类和其他生物健康,造成水生态状况恶化;部分地区水资源过度或无序开发,导致生态用水被挤占,超过水生生态系统承载能力;等等。一系列生态环境问题凸显了我国水生态环境现状不容乐观,同时也反映出水资源保护工作急需加强。

1.3 闸坝建设的水文生态效应

闸坝的修建在一定程度上实现了兴水利、除水害的作用,对沿岸地区经济的发展,特别是对农业的发展产生了积极的影响。早期水利工程的目标可以简单归结为“治水”和“用水”两类,在抵御洪涝和发展农业灌溉的目标之下,尚未认识和关注到河流生态系统的健康问题,在河流上修建大量水利工程的主要目的是对取水用水和洪涝的防治。但是,过多闸坝的存在客观上降低了河流的连通性,改变甚至破坏了河流的天然径流状态,削弱了河流水体的自净能力,对河流水质产生了极大的影响,河流的水文状况相对于自然状态进行了大幅度改变的同时,河道内的水体污染问题不断加剧、水质恶化问题日益突出。人类对水资源的掠夺性开发,破坏了河流生态系统中原有的各类平衡,使得河流水生态环境日益恶化,逐步引起人们对传统水利工程开发模式的反思,开始探索修复河流自然环境的途径。

随着以闸坝为主要形式的水利工程所带来的负面生态效应不断呈现,以及其对经济社会可持续发展的不利影响日益突出,河流的水生态问题受到社会普遍关注。20世纪50年代,德国发展出了“近自然河道治理工程学”理论,提出要促进传统工程设计理念和技术方法的改革,吸收生态学的知识和相关原理,在河流整治工作中尽量满足植物化和生命化的要求(Laub and Palmer, 2009)。1962年,美国生态学家Odum等提出了生态工程的概念,并将其定义为“人类仅凭借少量辅助而对以自然能为主的系统开展的环境控制”(Mitsch, 2003)。70年代以来,筑坝建闸所引起的水生态环境问题逐步引起了全社会的重视,人们开始更加辩证地看待闸坝的建设和影响,对于闸坝建设和调控对水环境影响的研究进一步深入,主要涉及闸坝对下游能量、物质(悬浮物、生源要素等)输送通量以及对河道结构(河道形态、河流演变、泥沙淤积、冲刷等)的影响等诸多方面。法国、澳大利亚、南非等诸多国家都开展了大量研究,提出河流生态流量的概念,试图了解鱼类生存繁衍与河流流量等因素的关系,探究了流量、流速对鲑鱼等鱼类、大型无脊椎动物、大型水生生物生存繁殖过程的影响。1978年,美国大坝委员会环境影响分会总结归纳了20世纪40~70年代有关修筑闸坝对生态环境造成影响的相关研究成果,并出版在*Environmental Effect of Large Dams*(《大坝的环境效应》)一书中,涉及领域包含大坝运行产生的社会经济效应以及对浮游植物、藻类的影响状况,闸坝蓄水形成的上游水库蒸散发情况,闸坝对下游河床、水质等方面的影响。国外相关学者针对水利

工程的不利影响,逐步开展了水工建筑物对生态环境影响的研究,初期研究方向主要集中在河流泥沙沉积以及大型底栖无脊椎动物群落特征,经过多年的发展,现今的研究方向已经逐步拓宽至局地气候状况、水文情势、河流水质、生物多样性、河道地形地貌以及经济社会等方面。随着闸坝对河流水环境和水生态系统的影响研究的不断深入,西方一些发达国家的学者认为,要恢复河流原始形态,就应该拆除闸坝等水利工程,力图通过拆除河流上所有的闸坝设施来恢复河流的原始形态,这又进一步激化了闸坝建设和生态保护之间观点的冲突。随后,世界水坝委员会(World Commission on Dams, WCD)的组建和《水坝与发展》调查报告的发布将闸坝利、弊的争论推向了顶峰。McCully(1996)对闸坝的影响进行了分析,并将闸坝对水环境的作用分为“闸坝修建”和“闸坝调控”两类。

针对闸坝工程建设对河流水资源开发利用所带来的一系列问题,国际上许多专家学者认为可以通过合理的闸坝调控使闸坝发挥更多的积极作用,减少其负面影响。国际上开展闸坝调控的研究始于20世纪20年代,1926年,苏联莫洛佐夫提出水电站水库调配调节的概念,并形成以水库调度图为指南的调度方法,自此以后国际上许多专家学者对闸坝优化调控开展了大量研究。从60年代开始,人们逐步重视闸坝对河流水环境和水生态系统的影响研究,该方面的问题也成为国际水文生态领域的研究热点。70~80年代,闸坝调控对生态环境影响方面的研究得到了快速的发展,并开始侧重研究闸坝对河流水生生物、水体纳污能力和生态系统多样性等方面的影响。同时,随着闸坝对河流水质影响程度的增加和对河流生态环境影响研究的不断深入,一些发达国家认为应该拆除闸坝等水利工程,以便于恢复河流的天然形态,这更加深了人们对闸坝对河流生态环境负面影响的认识。人们普遍认识到闸坝在为社会创造巨大经济、社会效益(如抵御洪水、水力发电、供水灌溉等)的同时,也会导致水生生态系统的严重退化。例如,在加利福尼亚,大坝阻断大马哈鱼和虹鳟大部分的重要产卵地,导致溯河产卵鱼类的减少。对此,国外学者在避免闸坝负面影响方面开展了大量研究。进入21世纪后,闸坝调控和管理可以避免闸坝对河流水环境和水生态的负面影响,使其发挥更大的积极作用,其成为国外学者研究的重点内容。

我国开展闸坝调控的研究和应用始于20世纪60年代,中国科学院等联合编译出版的《运筹学在水文水利计算中的应用》标志着我国开始闸坝优化调控方面的研究;董子敖(1982)应用系统工程多目标决策和增量动态规划与分析相结合的方法,给出具有长期预报的水库供水期最优调度的一般规律;谭维炎等(1982)提出若干水电站在电力系统中联合运行的最优调度图,该阶段研究成果主要侧重于单一闸坝在防洪、发电、供水和航运等方面的优化调控研究。进入80年代后,随着经济社会的发展,河流上兴建了大量的水库或水闸,这些闸坝在除水害、兴水利方面发挥着巨大的作用,但是也对河流生态环境产生负面影响。1982年,治淮委员会研究了蚌埠河段内闸门启闭时间长短及河道径流变化对有机污染变化的影响,这些研究的开展表明我国学者已经意识到闸坝对河流生态环境的负面影响,但是由于基础资料、技术条件等限制,该阶段只是初步开展一些实验和理论方面的探索。进入90年代后,国内学者进一步对闸坝调控对河流水环境等方面的影响开展研究,方子云和谭培伦(1984)将闸坝调度分为3类情况,即闸坝合理调度改善水质、引水改善水质、水体循环改善水质;鲍全盛等(1997)进行沙颍河闸

坝调控与淮河干流水质的风险管理研究。进入 21 世纪后, 闸坝调控对河流生态影响的理论研究不断深入, 加强闸坝等水利工程对河流健康影响方面的研究, 众多学者开始关注流域闸坝工程对水量、水质和水生态的影响, 并开展评价方法及模拟模型研究, 分析闸坝对重污染河流水质、水量的作用规律, 并评估闸坝对河流水质、水量的影响, 陈豪等 (2014) 研究槐店闸浅孔闸在不同调度方式下的水体、悬浮物及底泥污染物变化规律; 左其亭等 (2015) 选取沙颍河槐店闸为研究对象, 设计并开展多次现场实验, 分析不同闸坝调控方式下河流水质参数的时空变化规律, 探索闸坝调控对河流水质的作用机理。此外, 闸坝管理部门也开展闸坝调控改善河流生态环境的实践研究, 如水利部淮河水利委员会于 2002 年 12 月~2003 年 6 月在沙颍河开展水闸防污调控实践。

近年来, 闸坝工程对河流水生态环境产生的影响作用备受生态领域及水利领域相关学者的关注, 大量学者从不同切入点积极探索河流水生态环境在闸坝工程影响下的响应规律。在理论方法研究方面, 董哲仁 (2003) 辨析了基于“水工学”的治水工程的缺陷及其对河流生态系统的负面作用; 陈庆伟等 (2007) 基于分析水利工程设施对河流生态的负面影响, 阐述了水库生态调控方法与技术; 喻光晔等 (2015) 从闸坝调控能力综合评价的角度出发, 重点讨论基于淮河流域水质、水生态联合调控的闸坝调控能力评价指标, 对多闸坝、水库群水质、水量、水生态联合调控准则的制定进行了探讨。在实验实践方面, 赵长森等 (2008b) 从淮河流域全局出发, 通过对淮河典型河段的水生态和水环境进行现场调查与室内分析, 对流域内水生态环境现状进行了综合评价。在模拟量化与评估方面, 肖建红等 (2007) 根据水坝对河流生态系统服务功能影响的特点, 建立了评价指标体系, 评估了全国水坝对河流生态系统服务功能的影响; 夏军等 (2008) 通过分析水生态指标与同期水质指标之间的关系, 将水文循环、环境污染、河流生态三者结合在一起, 建立了水文-水质-生态耦合模型, 提出一种水生态评价方法; 刘玉年等 (2008) 以不同生物指数法对淮河流域典型闸坝断面的生态系统健康现状进行了综合评价; 赵长森等 (2008) 利用改进的生态水力半径法合理地计算河流生态需水与生态水位, 为闸坝的合理调控提供了科学理论支撑; 董哲仁 (2009) 提出了河流生态系统结构与功能整体模型以描述非生命与生命变量之间的关系; 胡巍巍 (2012) 采用 IHA 法和 RVA 法, 研究蚌埠闸及其上游闸坝对水文情势的影响程度, 同时估算分析闸坝对淮河河流生态水文条件的影响, 为蚌埠闸开展生态系统管理、生态修复以及进行生态调控提供理论支持; 米庆彬等 (2014) 为探求闸坝对河流水质-水生态过程的驱动作用和浓度变化规律, 基于 MIKE 11 模型平台构建了闸控河段水质-水生态数学模型, 模拟分析了不同水闸调控情景下水体中水质指标和水生态指标的变化; 陈艳丽 (2014) 从水文水资源、水环境状况、河流的物理形态、生物状况和社会环境等方面综合考虑影响河流生态状况的因素, 通过模糊评价得出河流水生态状况, 确定影响河流水生态状况的主要因素; 左其亭等 (2016b) 为探讨闸坝工程对河流水生态环境的影响效应, 在沙颍河流域持续进行实地闸坝调控实验, 监测河流水质指标在不同调控方式下的空间变化, 并调查水生态指标, 探讨了长期和短期的调控干扰对河流水生态环境的影响特征。

针对受人类活动影响程度较大的多闸坝河流, 科学辨识人类活动的影响状况、合理确定生态用水需求、有效控制水质目标、改善河流水环境, 逐步成为水资源管理工作中

所面临和需要解决的重要问题。为辨识人类活动对河流生态系统的影响，“河流健康”的概念被提出，并逐步成为当前河流开发及管理的研究热点（Norris and Thoms, 1999）；为量化和科学评估河流及其生态系统的健康状况，“生态需水”作为最基本的指标被提出，并逐步发展成为河流管理的重要目标（王西琴等，2002）；为实现河流及其生态系统的健康，需要通过一定的技术手段来实现生态水量的有效配置，由此，“生态调度”理论与方法研究和实践逐步开展，为河流健康维护和受损河流修复提供了重要支撑（陈敏建，2007a）。随着人类认知和技术水平的不断提高，“河流健康”、“生态需水”及“生态调度”的问题识别和相关研究逐步从单一水量到包含水质并发展到涵盖水生态等方面，相关概念不断拓展，评估和量化理论与方法不断丰富，技术应用和实践普遍展开。目前，闸坝对河流环境影响的前沿研究已经深入全面综合的阶段，涉及诸多学科的交叉融合，对闸坝建设的水文效应及水生态系统影响研究可以归结为：闸坝对下游水质、水量以及水生态的影响；闸坝对河流径流形态、泥沙淤积等河道结构的影响；闸坝对某指示生物包括种群数量、物种数量、栖息地等信息在内的影响进行实验与观测；闸控河流水量-水质-水生态作用机理研究、影响模拟与综合调控等。

闸坝对河流水量-水质-水生态的影响及闸坝调控方面的研究，随着技术进步在不断地深化和推进。在闸坝对河流水质、水量影响研究方面，随着水循环综合模拟技术不断完善，模拟精度不断提高，对水质、水量变量的识别和监测技术更加准确，随着对闸坝负面影响的认识越来越深刻，以经济发展为目标的闸坝调控也在向以生态-环境协调发展为目标的闸坝调控转变。由于国外闸坝、水质等情况与国内的差异，国外的研究或从宏观上进行研究，或针对某一具体河段、污染物、水质状况等进行研究，具体针对闸坝调控能力的研究仍然较为少见，尚未形成成熟、完善的研究框架及可以推广的技术体系。在闸坝对水生态系统的影响机理研究及调控实践中，受前期对水生态监测短缺和资料积累不足的影响，闸坝调控方面的研究仍多针对闸坝调控对河流水质、水量方面的影响，对河流水生态的影响考虑较少，闸坝调控对河流水环境、水生态的影响研究尚处于进一步深化阶段，缺乏闸坝调控对河流水生态健康影响方面的定量研究，需要结合闸控河流水环境治理和水生态保护需求，不断加强面向河流水生态健康的闸坝影响及调控机理等方面的研究。

1.4 需要研究和解决的关键科学问题

对应和受限于不同阶段的经济社会发展水平，人类与河流之间的关系演变历程包括原始自然阶段、工程控制阶段、污染治理阶段和生态修复阶段。在水问题，尤其是河流水环境问题日益严重的情况下，基于闸坝对河流水质、水量影响作用相关研究成果，从闸坝对河流水质、水量调控能力的角度出发，研究闸坝调度对河流水质、水量的影响作用，对于解决相关水问题，尤其对实现通过闸坝调度来改善河流水质具有较大的启发，因地制宜不断探索各类条件下的水资源和水环境问题的解决途径，对于实现闸坝联合防污调度以避免重大水污染事故的发生具有重要意义。

当前，在河流水资源开发利用和综合管理工作进程中，河流生态系统健康理念已被广泛认知，对水利工程生态效应的研究得到重视，生态需水调控研究取得进展，水资源

和水环境保护与修复正在全面展开,但是在实际应用中,由于不同区域或河流的水资源条件和生态环境问题有其独特性,诸多河流水生态相关的研究成果难以普遍适用,存在诸多问题和困难,影响着河流可持续管理目标的实现,主要体现在以下方面。

(1) 对水利工程的生态-水文效应认识不足

科学辨识水利工程的生态水文效应是进行水资源可持续管理的前提。水量-水质-水生态相互作用关系错综复杂,对其进行定性或定量化研究均面临很大的挑战。国内外对水利工程的生态水文效应的研究包含水文、水质以及生物变化等多个方面(姚维科等,2006),多侧重于河流水量、水质、水生态单一对象或两两对象耦合作用的分析与量化,水量-水质-水生态是一个庞大而又复杂的耦合巨系统,单一对象的分析或两两对象的定性或定量研究很难准确揭示河流各子系统之间复杂的相互作用关系。河流的生态需水评估大多关注河流生态系统对流量大小的单一水文要素需求,对河流水文情势与生态过程的内在关系不够重视(王俊娜,2013)。从研究内容来看,针对各方面建立了较多的评价指标体系与方法,在河流生态效应的量化方面应用较少,缺乏可以适用的水利工程生态效益评估量化指标,需要针对特定区域开展典型区研究;缺乏具体的水生态监测实验数据来定量表达闸坝调控对河流水质-水量-水生态的影响。由于缺乏闸坝影响下的河流水生态调查野外实验,没有客观的数据来定量反映闸坝对河流水质、水量、水生态的影响,需要考虑水量、水质、水生态多方面要素,从水量-水质-水生态整体、综合的角度进行相互作用关系的定性与定量化探索(左其亭等,2011)。

(2) 闸坝调控对水环境的影响机理不清

纵观国内外研究现状,闸坝修建和调控对河流水环境影响的相关研究已经取得一定的成果,但是针对污染河流,国外关于闸坝修建和调控对水环境影响方面的研究多侧重于自然河流水量、水质、水生态特征的研究,然而,对于闸坝调控背景下的河流水量-水质-水生态变化规律的研究还较为匮乏。国内关于闸坝修建和调控对水环境影响方面的研究尚处于定性研究阶段,不能满足当前经济社会发展对污染河流治理的需要,亟须进一步进行深化研究,主要表现在:缺乏具体的实验数据来定量表达闸坝调控对河流水质、水量的影响作用。目前,国内外尚且缺乏对污染河流的实地闸坝调控实验,没有客观的数据来定量反映闸坝对河流水质的影响。闸坝对污染河流水质、水量的作用的研究不足,不能较清晰地提出闸坝对污染河流水质、水量的调控策略。缺乏污染河流闸坝的防污调控研究,不能合理地依据不同的来水条件对闸坝群进行动态调控,合理分配闸坝所拦蓄水体中污染物总量,减轻闸坝对河流水环境的负面影响。对闸控河流水生态健康影响因子识别和评价指标体系构建的研究较少,且因子识别方法中运用较多的是德尔菲法或理论分析法等主观方法,这在一定程度上会降低结果的客观性。因此,需对水生态健康关键影响因子识别方法开展研究。

(3) 面向河流健康的水量-水质-水生态调控实践缺乏

生态调度的开展具有鲜明的阶段性特征,生态调度已经融入流域综合管理。国内调

度实践主要通过行政手段应对洪水灾害或水污染问题。因为生态调度的目标多而宽泛,无法形成完整的理论体系,服务于生态调度目标的工程布局、管理长效机制尚未建立,制约着生态调度的可持续性,缺乏科学合理的闸坝调控措施研究,科学、合理的闸坝生态调控研究有待深入。国内外已对闸坝调控对河流水量和水质方面的影响开展大量的研究工作,但是对于闸坝调控如何对河流水生态健康产生影响,如何通过闸坝调控等措施实现河流水生态健康的良性发展,这些问题都需要开展相应的研究。如何科学、合理地进行闸坝调控以实现闸控河流水生态环境的良性循环是研究的难点。生态调控是通过实施适宜的调控方案以维护和改善闸控河流生态系统健康的一种新兴调控方式,然而,如何根据实际的调控目标,在满足“水量-水质-水生态联动关系”的调控约束条件下,构建科学、适用的闸坝生态调控模型是需要解决的关键问题。

总的说来,闸控河流的水量-水质-水生态相互作用及综合调控,涉及社会、经济、环境等不同方面的需求,国内外并没有形成一套有效的规划、方案设置、情景模拟、效果评估的技术体系,均处于不断发展过程中,尤其是闸坝调控变化前后的水生态响应(栖息地、生物多样性等)处于探索阶段。同时,现有闸坝调控研究中,尚未形成闸坝生态调度的理论体系,闸坝调控实施急需加强。结合当前生态需水的理论研究和生态调度实践,从不断发展的水资源管理需求来看,需要不断加强生态需水量基础理论研究,探索典型区域条件下的生态需水机理分析、调控体系(左其亭等,2010);针对水资源和水环境问题突出的河流或地区,以维持生态系统健康、促进社会和环境和谐发展为主要研究目标,综合考虑各方面因素开展河流生态健康评价评估,在生态系统健康评价、需水量评估、水资源优化及管理理论和技术方法方面开展生态需水研究。其中,针对受人类活动影响程度较高的多闸坝河流,探索闸坝生态水文效应研究,研究河流的健康需水要求,开展河流闸坝调控实践,是当前水资源研究的热点问题。

1.5 研究状况及成果创新

沙颍河是淮河的重要支流,沙颍河流域地理位置优越,经济社会高度发展,区域水资源压力突出,经过多年的水利建设,形成了以众多闸坝设施为主的防洪减灾和水资源开发利用体系,其对河道径流有着较高的控制能力。多年来,受气候变化、上游来水、入河排污、闸坝调控等方面因素的影响,流域水资源短缺,水体污染严重,河流水生态系统急剧退化,造成诸多环境和社会问题。沙颍河流域内的经济社会状况、水资源条件和水环境问题具有典型的代表性,流域的水资源开发利用状况和水环境治理成效得到流域管理学界的关注。

沙颍河所在的淮河流域经济社会发展程度高,对河流的持续开发利用形成了闸坝众多的特征,受多种因素的影响,许多闸坝常年关闭蓄水,使下游河道无水断流等,这些极不合理的闸坝运行方式导致了水污染事故频频发生,尤其在汛期首次开闸放水时,枯水期闸前蓄积的大量污染物随着下泄污水团集中下泄,极易造成水污染事故。据统计,淮河流域自20世纪90年代以来已先后发生了十几次严重的因污水团下泄引起的水污染事故,严重影响了流域内的供水安全和人体健康,加剧了用水、防洪和防污之间的矛盾,

并对河流生态系统造成了严重破坏。而其中发生于 1994 年、2001 年、2002 年、2004 年等年份的突发性水污染事故,更是给两岸的生活、生产、环境造成严重影响,其产生原因就包括汛前开闸放水或其他水文事件导致闸坝前长期蓄积的污水团突然下泄,形成突发性水污染事故。而在最大程度上降低突发性水污染事故造成的损失的过程中,闸坝调控发挥了一定的作用,如闸坝可以拦截污水团使水污染不至于进一步扩大影响,或者让拥有较好蓄水水质的闸坝开闸放水,对污水团进行稀释,以降低污染物的浓度进而减少水污染事故的影响等。针对流域的水资源与水环境问题,流域和各地管理部门先后开展了一系列的水资源配置、水污染防治等工作,并取得了显著成效,流域水污染趋势得到有效控制,使流域治理步入生态恢复阶段。在实践方面,1999 年水利部淮河水利委员会水文局(信息中心)与中国科技大学合作,开展了科学技术部 863 计划“淮河流域防洪防污智能调度系统”的研究工作;2002~2003 年太湖流域实施了引江济太水质水量联合调度实验,经过两年的调水实验,望虞河沿线及太湖水体水质得到了明显的改善;清华大学、淮河流域水资源保护局 2008 年进行了“淮河流域生态用水调度研究”;左其亭等(2010)进行了闸坝调度对重污染河流水质影响实验研究等。基于独特的区域经济发展状况,河流水污染治理和生态恢复仍是当前河流管理的重要目标。近年来,国家在水资源管理的一系列政策和措施中,强调水的生产、生活和生态基本功能,要求贯彻生态文明理念,提出开展河湖水系连通工程建设,推动水生态保护和水资源管理,以改善水环境质量、恢复水生态系统功能等。在此背景下,针对多闸坝条件下的河流水资源与水环境问题开展相关研究,可为提高与加强水资源的科学管理提供理论支撑与技术参考。

自 2006 年以来,郑州大学水科学研究团队将区域水资源和水环境管理作为主要研究方向之一,选取以多闸坝为特征的淮河水系沙颍河流域作为研究示范区,针对人类活动影响下的河流水资源和水环境问题,基于现场调查和实验观测,深入开展理论研究和技术应用,积累了丰富的基础资料,取得了一系列研究成果。

郑州大学水科学研究团队开展的研究工作主要包括:《气候变化对水域水质和水生态影响研究》(2008 年),《淮河流域水生态分区及水生态保护与修复对策研究》(2010 年),《闸坝调度对污染河流水质水量的作用模拟与评估研究》(2011 年),《闸坝对河流水质水量影响评估及调控能力识别技术研究》(2013 年)等。本书主要研究内容和技术创新包括以下几个方面。

(1) 多闸坝河流水文生态环境效应量化及评估研究

基于收集的长序列水文资料及在研究区 2012~2016 年开展的水生态环境调查实验,深入探索与分析研究区水量、水质、水生态特征,并采用客观、适宜的评价方法,对研究区水体富营养化、水体污染程度、水生态健康状况进行科学、可靠的评估;基于沙颍河多闸坝特征,结合区域水资源和水环境管理研究基础,确定典型闸坝和关键水文断面,采用水文改变度指标分析方法对闸坝工程的水文效应进行分析,识别和量化水利工程的生态水文效应,分析闸坝建设对河流生态系统的影响;提出了闸控河流生态水文效应的量化方法体系,该体系是基于闸坝对河流生态水文效应的产生和发展机理分析,提出从水文、水质、水生态 3 个方面进行闸坝生态水文效应量化的方法;进行了以水文情势变