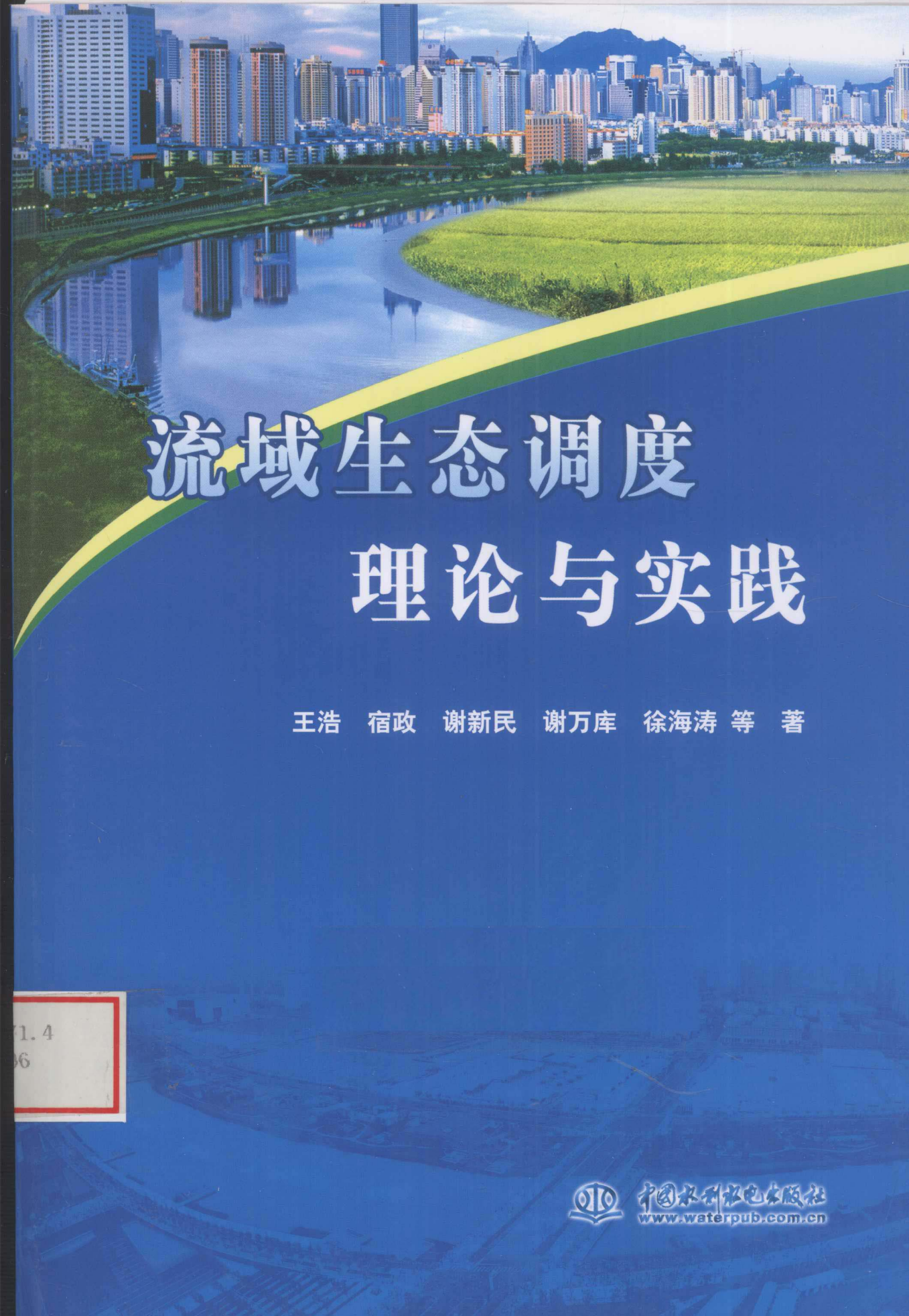




流域生态调度 理论与实践

王浩 宿政 谢新民 谢万库 徐海涛 等 著

1.4
06



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家水体污染控制与治理科技重大专项课题 (2008ZX07207-006) 资助

流域生态调度 理论与实践

王 浩 宿 政 谢新民 谢万库 徐海涛 王志璋
刘圣金 宋继林 柴福鑫 武宝志 魏传江 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是在吉林省饮马河流域生态调度研究成果的基础上撰写而成的,主要内容
包括水资源及其开发利用形势、社会经济发展及“三生”需水预测、生态调度模型
与计算软件系统、生态调度方案与效益分析、生态调度保障措施与补偿机制等成
果,形成了一套流域生态调度理论技术体系,反映了目前我国流域生态调度方面的
前沿研究动态和最新成果。

本书可供水利(水务)、农业、城建、环境、国土资源、规划设计与科研等部
门的科技工作者、规划管理人员以及大专院校有关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

流域生态调度理论与实践 / 王浩等著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2010. 3
ISBN 978-7-5084-7288-1

I. ①流… II. ①王… III. ①流域—生态环境—环境
保护—研究 IV. ①X171.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第037232号

书 名	流域生态调度理论与实践
作 者	王浩 宿政 谢新民 谢万库 徐海涛 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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字
版 次	2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前言

目前,全世界已建成的水库可调节全球 $1/3$ 以上的河川径流量。我国是世界上水库数量最多的国家,截至 2006 年底已建成各类水库 8.59 万座,总库容达到 5974 亿 m^3 ,控制着全国 $1/5$ 以上的河川径流量。这些水库在防洪、城乡供水、灌溉、发电、航运和水产养殖等方面发挥了巨大作用。虽然水库建设在 20 世纪取得了巨大成就,但其负面影响也引起了社会的广泛关注和深思。尤其是近 10~20 年来,随着城市化和工业化、产业化的快速发展,水资源的供需矛盾日益突出,地区之间和行业之间争水、生产用水大量挤占生态环境用水等现象日趋严峻,已造成一些较严重的生态环境问题。如何在发挥水库防洪、城乡供水、灌溉与发电等功能基础上,通过合理调整水库运行调度方式,更好地发挥水库的“除害、兴利”和“保护生态环境”的功能,已经引起我国各级政府和社会各界的高度关注。

众所周知,河流是物质、能量、物种输移的通道,水库大坝阻隔改变了水体流畅的自然通道,导致了河流形态发生变化,进而引发整条河流上下游与河口的水文特征发生改变。水库通过人工调节河流径流为人类所利用的同时,也深刻地改变了河流系统的边界和径流条件。目前,我国现行的水库调度方式,一方面保障了经济社会发展的用水需求;另一方面也产生一些负面影响,使河流健康受到损害,引发河流生态环境危机。因此,根据科学发展观和党的十七大提出的生态文明建设总体要求,通过科技创新和合理调整水库现行的调度方式,全面实施流域生态调度,科学调控河川径流、泥沙运移,逐步改善和恢复河流生态系统功能,确保河流生命健康,具有重要理论与实践意义。

《流域生态调度理论与实践》一书,是在吉林省饮马河流域生态调度研究成果的基础上编写而成的。饮马河流域地处东北黑土带的核心区,人口密集,工农业发达,是吉林省经济中心区,已发展成以长春为中心的城市群,为全国重要的工业基地,已形成以汽车、石化、农产品加工、医药、电子信息等五大产业为主导的工业支柱产业群,是振兴东北老工业基地的重点地区和国

家主要商品粮基地。但该流域水资源总量不足、时空分布不均匀、供需矛盾突出，工业与城镇用水大量挤占农业用水、生产用水大量挤占生态环境用水的现象严重，加剧了城乡和谐发展的用水矛盾，并导致河道经常干涸、断流和生态环境不断恶化。为此，吉林省水利厅及时启动了“吉林省饮马河流域生态调度研究”课题。根据党的十七大报告精神和吉林省老工业基地振兴、生态省建设及增产百亿斤粮食基地建设的总体要求，针对饮马河流域生态文明建设和可持续发展面临的严峻挑战，以省政府组织实施的吉林省中部城市引松供水工程规划建设为契机，以构建饮马河流域人水和谐的生态文明社会和安全供水保障体系为目标，坚持以人为本、人水和谐与《松辽流域水资源综合规划》相衔接、与《吉林省生态省建设总体规划》相协调和统一的原则，利用新思路、新观点、新资料、新理论、新方法，统筹协调生活、生产、生态环境用水需求，以及当地水与外调水、地表水与地下水、传统水源与非传统水源供给，通过全方位多视角综合对比分析，提出一整套面向饮马河流域可持续发展和生态文明建设的生态调度推荐方案、生态调度线和补偿机制等系列成果。总之，该项成果不仅建立了一整套较完备的流域生态调度理论技术体系，而且为饮马河流域实施生态调度提供了重要依据，并将对饮马河流域安全供水保障体系建设产生重大而深远的影响，使“民生水利”和“生态水利”理念落实到具体行动，将有力地推动吉林省乃至全国的生态调度研究和实践。

《流域生态调度理论与实践》由中国水利水电科学研究院、吉林省水利厅、吉林省水利水电勘测设计研究院、吉林省水文水资源勘测局等单位的专家撰写完成。全书共分为八章，分别为：绪论、概况、水资源及其开发利用形势、社会经济发展及“三生”需水预测、生态调度模型与计算机软件系统、生态调度方案与效益分析、生态调度保障措施与补偿机制、结论与建议等。其中第一章由王浩、宿政、谢新民、谢万库、徐海涛、王志璋、刘圣金、宋继林、扎西和叶勇执笔；第二章由宋继林、齐文彪、柴福鑫、万叶妮、贾志国、梁卫东和孙立新执笔；第三章由谢万库、齐文彪、武宝志、万叶妮、徐海涛、梁卫东、孙立新、叶勇、李征、徐坚和魏传江执笔；第四章由刘圣金、贾志国、武宝志、张古彬、张军、高威、丛远飞、杨连俊、王军海、李强、徐坚和叶勇执笔；第五章由王浩、王志璋、魏传江、宋继林、柴福鑫、齐文彪、谢新民、武宝志、叶勇、缪纶、张古彬、梁卫东和贾志国执笔；第六章由谢新民、王志璋、徐海涛、刘圣金、宋继林、齐文彪、柴福鑫、张古彬、万叶妮、叶勇、贾志国、魏传江、宿政、缪纶、王浩和谢万库执笔；第七章

由宿政、谢新民、谢万库、徐海涛、魏传江、宋继林、柴福鑫、孙立新、孙秀芬、万叶妮、贾志国、徐坚、梁卫东、缪纶、刘圣金和王浩执笔；第八章由徐海涛、王志璋、谢万库、武宝志、梁卫东、万叶妮、扎西、宿政和王浩执笔。全书由谢新民、徐海涛和王志璋统稿。

在项目完成及本书编写过程中，得到了水利部水资源管理司、水利部松辽水利委员会、吉林省科技厅、吉林省林业厅和长春市水利局、长春市水资源管理办公室、新立城水库管理局、石头口门水库管理局等单位领导和专家的大力支持与帮助。同时，很荣幸地得到了陈志恺院士、刘兴土院士、林学钰院士和翁文斌教授、张德新、王教河、白效明、田竹君、董郁林等专家和支持的领导的支持与帮助。该书的出版还得到了国家水体污染控制与治理科技重大专项课题（2008ZX07207-006）的资助。在本书正式出版之际，特向支持和帮助过本书撰写出版工作的有关单位领导及专家一并表示衷心的感谢！

受时间和作者水平所限，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正！

作 者

2009年8月于北京

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 研究目的和意义	1
第二节 必要性和紧迫性	3
第三节 国内外研究与实践	5
第四节 研究总体思路	9
第二章 概况	11
第一节 自然地理条件	11
第二节 社会经济情况	11
第三节 设计水平年和保证率	14
第三章 水资源及其开发利用形势	15
第一节 水资源条件	15
第二节 水资源开发利用现状	17
第三节 水资源开发利用中存在的问题	21
第四章 社会经济发展及“三生”需水预测	23
第一节 战略地位与发展机遇	23
第二节 人口与城镇化进程预测	24
第三节 宏观经济与发展战略	28
第四节 宏观经济发展预测	29
第五节 生态环境保护目标及发展指标	34
第六节 “三生”需水预测	35
第五章 生态调度模型与计算软件系统	64
第一节 生态调度目标与任务	64
第二节 生态调度模型	68
第三节 生态调度计算软件系统	85
第六章 生态调度方案与效益分析	89
第一节 水文系列与需水方案	89

第二节	基准年生态调度分析	90
第三节	未来不同水平年生态调度分析	109
第四节	投资估算与效益分析	155
第七章	生态调度保障措施与补偿机制	161
第一节	我国研究现状	161
第二节	生态调度保障措施	162
第三节	生态调度补偿机制	175
第八章	结论与建议	179
第一节	主要结论	179
第二节	建议	183
附表		184
参考文献		210

第一章 绪 论

第一节 研究目的和意义

水库是人类为解决水患和蓄水而出现和发展起来的水利工程,是一种具有特殊形式的人工和自然结合的“人工湖泊”,体现了人类利用和改造自然的智慧。目前,全世界已建成的水库可调节全球河川总径流量的 1/3 以上。我国是世界上水库数量最多的国家,截至 2006 年底,我国已建成各类水库 85874 座,总库容达到 5974 亿 m^3 ,控制着河流 20% 以上的径流量。这些水库在防洪、城乡供水、灌溉、发电、航运和水产养殖等方面发挥了巨大作用。2006 年我国水库等蓄水工程为城乡供水 1623.8 亿 m^3 , 占总供水量的 34.5%。水库承担了防洪和城乡供水、灌溉与发电等重要功能,其运行调度对于发挥水库的“除害和兴利”功能具有决定性的作用,对水资源的合理开发和高效利用等具有重要意义。

水库大坝建设是人为改变了河流原有的自然演进和变化过程,进而改变了河流生态系统的生态功能。筑坝对河流生态系统的影响途径可以简单归纳为以下四种情况:通道阻隔、水库淹没、人为径流调节、水温结构变化。河流是由水体流动形成的,是物质、能量、物种输移的通道,大坝阻隔改变了水体流畅的自然通道,导致了河流形态发生变化,进而引发整条河流上下游与河口的水文特征发生改变。众所周知,不设过鱼设施的大坝对于洄游性鱼类是不可逾越的障碍;水库淹没损坏了河流的部分生态功能;要使河流正常发挥作用,维持自然特征如森林覆盖的河岸,完整无损的漫滩和充足的湿地是至关重要的。水库对河流径流进行人工调节,使水资源为人类所用,大规模地改变了江河系统的边界、径流条件。不过现行水库调度方式在保障经济社会发展的同时,也引起了一系列的河流生态环境问题,产生了一些负面影响,致使河流健康受到损害和威胁,引发河流生态环境危机。如因库区下游流量减小甚至断流、流速变缓等而导致河流水环境容量减小、主河槽萎缩、依赖于河流的生态系统严重衰退、生物多样性减少、水环境恶化和水景观遭到破坏等,不仅严重制约了流域的人水和谐和经济社会的可持续发展,也使人类文明和水文化的延续受到严峻挑战。深刻认识现行水库调度方式对河流生态环境的影响,以及水库运行中河流健康的要求,是我国面向生态环境的流域水资源可持续管理及科学开发利用的迫切需求。“人水和谐”的理念和可持续发展理论,要求我们重新认识 and 正确处理水库与河流的关系,对水库等水利工程与河流生态系统之间的相互关系重新定位,迫切需要建立水库运行管理的新模式和生态调度的新方式,实现“河流健康、人水和谐、工程生态调度、可持续发展”的目标。

目前,国内外学术界对“生态调度”还没有给出明确的定义。这里所说的生态调度是指通过调整水库调度方式从而减轻水库对生态环境的负面影响,可细分为生态调度和环境调度。其中生态调度以改善水生态状况和生物多样性为主要目标,环境调度以改善水环境

质量为主要目标,两者既各有侧重又相互联系,因此将两者笼统地称为生态调度。以改善水生态状况和生物多样性为重点的水库调度是指针对水库工程对水陆生态系统、生物群落的不利影响,并根据河流及湖泊水文特征变化的生物学作用,通过河流水文过程频率与时间的调整来减轻水库对生态系统的胁迫,从而改善河流生态系统状况,确保生物多样性;以改善水环境质量为重点的工程调度是指水库在保证工程和防洪安全的前提下多蓄水,增加流域水资源供给量,保持河流生态环境需水量;通过湖库联合调度,为污染物稀释、自净,创造有利的水文、水力条件,从而改善河流的水环境质量。总之,水库生态调度是以“人水和谐”理念和可持续发展理论为指导,以河流健康为终极目标,促进人与自然是和谐相处,实现人类可持续发展。水库生态调度的基本目标在于利用水库的调蓄能力,完善水库调度方式,合理蓄水、泄水,减小或消除建坝对河流健康的负面影响,维持河流生态环境基本用水,服务目标多元化。生态调度包括两层含义:一是利用水库适时适量地调节下泄流量,应对径流在时间上分布的不均匀性,满足流域生物种群(不仅仅是鱼类)生存发展动态平衡的要求,最大限度地降低或消除水库对流域生态的负面影响;二是利用水库调节流量,改善水库内及下游水流水质,维持河流连续、完整的健康系统,保障下游地表水、地下水适量补给,最大限度消除水库对流域环境的负面影响。

总体来看,目前我国水库生态调度的研究才刚刚起步,多数成果仅限于宏观定性方面的论述,而在微观定量方面还缺乏实质性的工作。对于改善水库调度方式以适应珍稀动植物的生存、修复和改善生态环境等方面,尚未见有系统的研究报道。不过可以肯定的是,在未来一定时期内,水库生态调度必将成为我国部分水库调度工作的重点。水库生态调度作为一门新兴的管理技术,正是兼顾人类生存与发展行之有效的非工程措施,探索兼顾河流生态系统健康的水库生态调度方式已成为解决人类生存与发展的重要研究课题。因此,在饮马河流域开展生态调度研究,除了兼顾传统的兴利与防洪目标外,还将考虑调控河道断流、调节泥沙、改善水生态环境和水景观以及维持河流生态系统健康等目标,是一种创新性很强的研究工作,具有重要的理论意义和广阔的应用前景。

1999年国家将吉林省列为全国生态建设示范省,吉林省政府制定了生态省建设总体规划,明确提出到2030年地表水水质达标率达到90%以上、城市人均绿地面积大于 15m^2 、农村自来水普及率达到80%以上。为了实现吉林生态省建设的总目标,建设人水和谐、生态文明的全面小康社会,应当在有条件的流域尽快实施生态调度,及时恢复和增加生态环境用水量,改善和修复河流的生态功能、环境功能和景观功能,推进全省的生态建设和可持续发展。

饮马河流域是吉林省经济中心区,工农业发达,处于东北黑土带的核心区,是振兴东北老工业基地的重点地区和国家主要商品粮基地之一,已发展成以长春为中心的城市群,为全国重要的工业基地,聚集了能源、医药、机械、化工、冶金、纺织、建材、粮食加工等行业,已形成以汽车、石化、农产品加工、医药、电子信息等五大产业为主导的工业支柱产业群。其中加工制造业在国内具有明显的区位优势,尤其是机械交通设备制造业,增加值占全省制造业增加值比重高于全国平均水平15个百分点;医药、电子等产业在国内占据举足轻重的地位。据多年统计,饮马河流域工业增加值占全省工业增加值的40%以上;第三产业增加值占全省第三产业增加值的50%以上。该流域是吉林省的精华所在,

人才、资金、技术、信息等要素的集聚能力强,对周边地区具有很强的辐射和带动作用。但该流域水资源时空分布不均匀,缺水问题日益突出,水资源开发利用程度过高,目前水资源开发率已高达73%,远高于国际公认的40%合理极限值。随着流域水资源供需矛盾的日益加剧,工业与城镇用水大量挤占农业用水、生产用水大量挤占生态环境用水的现象日趋严重,进一步加剧了城乡和谐发展的用水矛盾和解决“三农”问题的难度,并严重影响了饮马河流域生态环境质量,导致河道经常处于干涸、断流和水环境容量减少、水生态不断恶化等严峻的生态环境问题。因此,饮马河流域修建的众多水利工程,一方面为国民经济发展提供了大量宝贵的供水量;另一方面也诱导出一系列较严重的生态环境问题,并已对21世纪饮马河流域可持续发展构成了严峻挑战。

基于饮马河流域所存在的问题,根据国务院2007年原则同意的《东北地区振兴规划》(国函〔2007〕76号)和国务院批复中的要求,即“要坚持以改革开放和自主创新为动力,加快推进经济结构调整和增长方式转变,加强资源节约和环境保护,着力改善民生,促进社会和谐,努力将东北地区建设成为综合经济发展水平较高的重要经济增长区域,具有国际竞争力的装备制造业基地,国家新型原材料和能源保障基地,国家重要的商品粮和农牧业生产基地,国家重要的技术研发与创新基地,国家生态安全的重要保障区,实现东北地区经济社会又好又快发展”,目前迫切需要在以人为本、人水和谐和可持续发展理论的指导下,开展饮马河流域生态调度研究工作,为饮马河流域水利工程的科学管理和合理调度提供科技支撑,确保吉林省中部地区老工业基地振兴和人与自然的协调、可持续发展。

第二节 必要性和紧迫性

根据国内外已建水库对河流生态系统造成的影响,需要重新认识水库与河流之间的关系。河流是自然环境的血管血液,是陆地水循环的主要途径,是陆地和海洋进行物质和能量交换的主要通道。泉、洼、淀、湿地、湖泊等是这一通道的天然组成部分。随着人类社会的快速发展和不断扩大的水资源开发利用规模,河流上逐步修建了蓄引提等各类水利工程。其中水库对河流生态系统的影响大致可以概括为以下几个方面:

(1) 水库影响了流域陆地水文环境,使库区河道水深增加,河面变宽,固体物质沉积,稀释扩散作用变弱;水库淹没了部分森林、沼泽及其野生动物的栖居地,改变了河道形态,原有沙洲、河滩湿地面积萎缩甚至消失,使生物物种数量大量减少,有些特有物种灭绝;河流被大坝拦截后,泥沙沉积使河床抬高,形成回水三角洲挤占库容,回水升高威胁库区上游安全。

(2) 水库改变了天然河流的水沙运动规律,致使下游河道萎缩给水库下游防洪带来压力;水库拦水拦沙,沉积物减少,对河口形态造成严重影响,明显减弱填海造陆和抵御海水入侵作用,使咸淡水界面向陆地推移;降低了对河口海水的冲洗作用,延长了污染物在河口的滞留时间,增加了河口污染物浓度。

(3) 水库大坝阻隔了河流水系的空间联系,切断了河流水系生命网络间的联系;下游河道水位不依流域降水量的差异变化,而是随水库下泄量或发电量的变化而变化,破坏了

流域生态系统对河流丰水、枯水和季节性的水文循环的适应性。

(4) 水库对河口生物聚落造成严重影响, 河口淡水减少削弱了对河口蒸发损失的补充, 从而使河口水质变咸, 河口原有生物群落遭到破坏, 严重威胁到三角洲的生物种群。

(5) 水库影响地表水与地下水的交换补给关系。水库 (尤其是平原水库) 补给地下水充足, 地下水位升高, 水库附近易出现盐渍化; 远离水库的下游地区, 由于河川径流减小, 原有湿地、湖泊面积减小甚至消失; 同时也影响水库下游区域生活、生产和生态用水。

(6) 水温的变异使水质恶化, 影响水中所含的溶解氧及悬浮物的数量, 从而影响水生物的生命周期、繁衍生息和人类生活及工农业生产用水。

(7) 水库改变河流流态后, 水库的水温出现垂直分层; 水深增加、流速减小会使河流中有机物增加和水藻化, 甚至出现异重流和热成层。受水库下泄水流的影响, 下游河道水温年内变化幅度减小, 加剧了河流热污染, 对于某些生物具有致命的威胁。

(8) 其他影响, 如水库的引水灌溉还使河流水质盐化等影响。

河流是有生命的, 是一种开放的生态系统, 具有完整生命形态, 但其核心是水, 是拥有一定数量、质量和能量的水。河流生命是河流水系遵循特定方向和路径的水循环过程, 沿河流水系奔腾不息的河川径流是河流生命的主要表现方式。其生命特征的五大要素是: 河流水系、水量、水质、水能、流域生态环境。“一条健康的河流, 是流淌的, 是清澈的, 是鱼水相容的, 是人水和谐的!” 河流生命存在的基本标志表现在容纳水流的河床、基本完整的水系和连续而适量的河川径流等三方面。河流健康生命是指河流能健康 (正常) 地完成它的正常功能, 健康地为人类服务, 能够与人类和谐相处 (潘家铮, 2006 年)。其标志是连续的河川径流、通畅安全的水沙通道、良好的水质、可持续的河流生态系统和一定的水资源供给能力。从自然角度看, 水库像湖泊、湿地、洼、淀等一样, 与河流水系的关系是器官与身体的关系, 河流健康生命必须是器官功能健全, 器官之间协调工作, 和谐共存。从系统角度看, 水库是河流水系的一个子系统, 水库的功能与河流密切相关, 并具有突现性。维持河流健康生命要求水库调度必须实行健全的生态调度方式。

目前, 我国水库现行的防洪和兴利调度方式可以概括为: 汛前腾出库容, 汛中削峰泄洪, 汛后兴利多利用。水库调度主要围绕防洪、发电、灌溉、供水、航运等综合利用效益而进行, 因此现行的水库管理和调度主要任务是处理、协调防洪与兴利的矛盾以及各种兴利任务之间的利益。从河流生态系统保护的角度分析, 现行的调度方式存在以下主要问题:

(1) 大多数水库调度方案, 没有考虑水库大坝下游的生态保护和库区水环境保护的要求, 特别是引水式电站和调峰运行的电站, 造成下游河段的减水和脱水, 直接威胁着下游水生态。对于高坝大库, 水库下泄低温水, 直接影响了下游水生生物的生存和繁殖。水库泄洪可使下泄水流中气体过饱和, 使下游鱼类, 尤其是鱼苗发生“气泡病”。

(2) 受水库调度方式的影响, 造成库区局部缓流区, 使水质下降, 特别是在支流回水区, 由于流动变缓, 加之污染物的累积影响, 出现不同程度的富营养化。

(3) 水库调度中, 清水下泄, 影响下游河流湖泊关系、河床的稳定以及河口的形态, 以至影响到下游生境。

(4) 河流水位随水库发电、航运等要求而变的模式加速了对下游河谷的侵蚀, 交替地

暴露和淹没鱼群产卵的浅水栖息地。鱼类是河流健康与否的指标之一，水库大坝对鱼类洄游的影响是致命的，如珍稀中华鲟溯河产卵因大坝阻断深受影响。

(5) 流域内缺乏水资源统一调度与管理，以各自的经济效益为目的进行调控，造成对下游生态环境的严重影响。

党的十七大报告在阐述实现全面建设小康社会奋斗目标的新要求时，第一次明确提出建设生态文明。生态文明是人类在发展物质文明过程中保护和改善生态环境的成果，它表现为人与自然和谐程度的进步和人们生态文明观念的增强。但严酷的现实是，作为资源型缺水的饮马河流域，其水污染状况也十分严重。如 2006 年饮马河流域主要河流水质监测评价结果表明，Ⅰ类、Ⅱ类水只占 1.3%，Ⅲ类水占 9.1%，流经城市的河段 90% 为Ⅳ类至劣Ⅴ类水，19% 的城市地下水均不同程度地遭到污染，部分淡水湖泊、水库水体富营养化也比较严重。生态环境的恶化和水体的污染进一步加剧了其水资源紧缺状况，严重影响了饮马河流域经济社会的可持续发展。

由于饮马河流域长期处于严重缺水状态，水资源供需矛盾十分突出，地区之间和行业之间争水问题、工业用水无偿挤占农业用水、生产用水大量挤占生态环境用水等现象日趋严峻，加之全球气候变化和高强度的人类活动，导致流域水资源的过度开发利用，并引发了下游河道断流、水环境容量下降，水污染加剧以及河流生态系统严重退化等问题。其主要表现为：①河流水动力条件与河道形态发生变化，生物多样性受到严重影响；②下游河道断流、河道径流及时程和水环境变化剧烈、环境质量恶化严重，对流域生态环境安全、水景观构成严重挑战；③地下水超采严重，造成一方面地下水排泄补给河流的水量减少，另一方面地下水大量袭夺河水，进一步加剧河道断流、河流生态功能退化、水环境容量下降和地下水污染等问题。因此，在节水、治污和调整产业结构的基础上，实施生态调度已成为解决饮马河流域缺水和改善、修复生态环境的必然选择。

总之，为了实现生态省建设总体目标，将饮马河流域建设成人水和谐的生态文明流域，应当恢复和合理增加饮马河流域河道内与河道外的生态环境用水额度，改变和调整流域内大中型水库现行的调度方式，全面实施生态调度，即除了满足传统的防洪和兴利目标外，水库调度还要考虑对水库下游生态保护和库区水环境保护等问题，还将肩负着控制河道断流、调节泥沙、改善水环境与水景观以及维持河流生态系统健康等任务，将是十分必要和紧迫的。

第三节 国内外研究与实践

一、国外情况

河流是与人类关系最为密切的生态系统之一。面对水库对流域生态系统造成的负面影响，国内外学者进行了大量探索和研究。其中欧洲和北美洲于 20 世纪 40 年代就率先对河流开展保护行动；欧洲和澳大利亚、南非等国家，自 20 世纪 70 年代以来先后开展了关于鱼类生长繁殖、产量与河流流量关系等方面的研究，提出了一些生态流量的计算和评价方法。如 Narayanan 等（1983 年）建议用河道某段时间内的多方面需求来评估河道流量，将某段时间内各种流量需求的最大值作为河道的生态流量值。欧美一些发达国家的管理和

决策部门,自 20 世纪 80 年代中期开始为减少大坝的不利影响,对水库的调度运行方式进行了调整,在保证航运、防洪、发电等原有重要功能的同时,在区域水质改善、娱乐和经济发展方面发挥了重要作用。

在国外,水库生态调度已从研究步入了实践和应用阶段。大古力水坝(GCD)是美国哥伦比亚流域水工程 CBP 的主要项目,1942~1948 年间 GCD 的运行,首先是为了满足发电,而没有防洪任务;1948~1972 年 GCD 更多地是为了控制洪水,哥伦比亚河流域的能源管理从单个工程起决定作用过渡到以工程系统为主;1973 年以后,发电和洪水控制行动被提高到流域尺度;1983 年提出的鱼类和野生动物项目,认为考虑溯河产卵鱼类问题是流域管理的主要问题;从 1980 年开始 GCD 和哥伦比亚流域其他水利工程的调度主要集中在充分满足维持或增强溯河产卵的鱼类种群的寻址需求;1995 年美国海洋渔业局提出的生物学意见成为了决定工程调度的主要因素。

1996 年,美国联邦能源委员会(FERC)在水电站运行许可审查过程中,要求针对生态环境影响制定新的水库运行方案,包括提高最小下泄流量、增加或改善鱼道、周期性大流量泄流和陆域生态保护措施等。Malin Falkenmark(2003 年)基于水与生态系统之间的联系,提出“人—水”一体化水资源管理的理论框架,并提出了“蓝水与绿水”(Blue Water and Green Water)的概念,形象地描绘了水、人类社会和自然三者之间关系;Nilsson 等研究了大坝对大型河流系统健康的影响表明,受大坝影响的流域面临着更大的水问题。

美国加利福尼亚州中央河谷工程(CVP)始建于 20 世纪 20 年代,包括大约 20 座水库。1937 年美国农垦法提出 CVP 大坝与水库:首先用于调节河流,改善航运和防洪;其次用于灌溉和生活用水;第三用于发电。最近,CVP 修改了 1937 年法规并专门指出,CVP 大坝与水库现在应当:首先用于调节河流、改善航运与防洪;其次用于灌溉与生活用水,并满足鱼类与野生动物需要,致力于保护与恢复河流良好生态的目的;第三用于发电和增加鱼类与野生动物。

1991~1996 年美国田纳西流域管理局(TVA)对 20 座水库通过提高水库泄流的水量及水质,以下游河道最小流量和溶解氧标准为指标,对水库调度方式进行了优化调整。具体技术措施包括:通过适当的日调节、涡轮机脉动运行、设置小型机组、再调节堰等提高下游河道最小流量,通过涡轮机通风、涡轮机掺气、表面水泵、掺氧装置、复氧堰等设施提高水库泄流的溶解氧浓度,对改善下游水域生态环境起了重要作用。2004 年 5 月 TVA 董事会批准了一项新的河流与水库系统调度政策。这项政策将 TVA 的水库调度视点从简单的水库水位升降调节转移到运用其所管理的水库来管理整个河流系统的生态需水量,提出在原有主要调度目标的基础上,要求水库为水质、娱乐目标进行调度。美国州和联邦政府相关机构、水库股东和社会公众广泛参与了 TVA 技术目标和方案的制定,对于调度优化的效益、成本、环境影响进行了详细咨询和评估。

1995 年日本河川审议会提出了《未来日本河川应有的环境状态》,并指出“推进保护生物的多样生息、生育环境”、“确保水循环系统健全”、“重构河川和地域的关系”的必要性。1997 年日本对其河川法作出修改,不仅“治水、疏水”,而且“保养、保全河川环境”也写进了日本的《新河川法》。筑坝使下游河流水流稳定而丧失活力,导致河床形态

改变和浸水频率减少,沙石供给减少使河床下降、河床材料粗粒化,多种生物的栖息地将减少。为此,日本通过弹性管理大坝对下游放水、将蓄沙堰临时沉积的泥沙还原给大坝下游,通过设置排沙闸提供泥沙等。另外,为了减少低水位区域而下游放流以维持下游流量,尽可能使因泥沙供给和移动造成的对自然环境的冲击得到恢复。此外,巴西 Tucuri 水电站在其水库调度规程中明确提出:“为了在允许大坝下游航运条件的情况下避免给堤岸生态群落造成伤害,保护堤岸斜坡和水库四周的稳定性,并且避免溢流远高于以前的纪录,水电站运行规定了水位不能超过 72.00m”。在非洲南部津巴布韦,研究人员在 Odzi 河的 Osborne 水库观测站开展研究,运用 Desktop 模型,估算河流的生态环境需水流量,为水库调度提供了切实可行的指导。在澳大利亚,要求每个州和地区都要对“水依赖的生态系统”作出评价,并且提出水的永续利用和恢复生态系统的分配方案。水的分配方案必须要考虑到 5~10 年之后可能出现的情况,通过一些数据来指导重新调整径流的季节变化特征,以达到最佳的生态状态。

从以上国外大型水库调度情况来看,不难得出以下几点认识:

(1) 在以美国为代表的西方发达国家,实施水库调度时均考虑到众多因素的影响,除了发电、防洪、灌溉、改善航运、提供生活用水以外,还包括下游堤岸保护、维持或增强溯河产卵的鱼类种群的寻址需求、生物栖息环境、水质保护、湿地改良、旅游休闲等因子。如 CVP 甚至将保护恢复鱼类与野生动物需求放在发电需求之先考虑。这足以说明,历史发展到现阶段,生态因子在制定水库调度规程中应该具有十分重要的地位,而不再是可有可无。

(2) 水库调度不再是从前所认为的、简单的水库水位的升降问题,而是关系到全流域、尤其是坝下区域生态的重大事件。水库调度必须从河流系统整体出发,充分考虑河流生态环境需水量要求。在建有梯级水库的河流上,各水库之间要在统一规划的基础上,实行联合调度,共同承担河流系统的生态需水量的释放。

(3) 水库调度规则(调度线、调度规程)应该由多方参与制定,以协调各方利益,包括政府部门、流域管理机构、电力部门、渔业部门以及公众利益相关方等共同讨论制定适宜的调控方案。

(4) 生态调度在国外也有一个被认识和被接纳的过程。最初的水库调度无一不是从直接的需求(如发电、灌溉、防洪等)出发,追求的是经济利益的最大化。但随着时间的推移,大型水利工程对河流生态系统的负面影响凸现之后,解决筑坝河流的生态受损问题得到了重视,水库调度方案也因之而进行了修订。

二、国内情况

国内大型水库的调度,也并不是完全忽视生态问题的存在,只不过在巨大的防洪和供水压力以及持续不断的电力需求情况下,相比国外,河流生态问题没有引起有关管理部门应有的重视。以长江三峡水库为代表,目前国内大型水利工程的水库调度基本上是以防洪、供水、发电和改善航运为主,适当兼顾其他如水产、旅游以及改善中下游水质等要求。水库调度决策也仅是以上述目标作为决策变量,一般不考虑专门的生态调度要求。生态调度在国内目前仍停留在理论探讨以及初步的尝试阶段。

近年来,生态调度在国内学术界及水资源管理部门屡屡被提及,但是对其概念内涵的

理解,在不同论述中并不一致,归纳起来大致包括以下几方面的内容:①大型水利工程的生态调度,即是在强调水利工程经济效益与社会效益的同时,将生态效益提高到应有的位置;②水库调度要保护河流生态系统健康,并对筑坝给河流带来的生态环境影响给予补偿;③河流水质变化也是水库调度必须要考虑的重要问题,水利工程调度生态准则是保证下游河道最小生态环境需水量等。

目前,国内学者在河流生态功能、水利工程生态效应、水利工程生态补偿、湖泊水库调度效果及优化等方面开展了一些理论和技术方法研究。如傅春、冯尚友 2000 年提出了生态水利的概念,并建立了水资源持续利用数学模型;邵东国等 2000 年针对洋河水库建立了水量水质统一调度模型,将水库水量水质管理问题分解为兴利、防洪、水质三个子系统的优化问题进行求解;贾海峰等 2001 年对水库调度和营养物削减关系进行了探讨,从而实现了防洪调度兼顾库区富营养化的控制;陈守煜等 2003 年以大连市水资源开发利用与宏观经济协调可持续发展为研究背景,建立了大连市宏观经济水资源发展规划多目标群决策模型;王好芳、董增川 2004 年建立了基于量与质的面向经济发展和生态环境保护的多目标协调配置模型,用以解决水资源短缺和用水竞争性的问题。2005 年 12 月在北京由中国水利水电科学研究院和美国自然遗产研究所、全球水伙伴(中国)联合组织召开《通过改进水库调度以修复河流下游生态系统》的研讨会,探讨了通过改进水库调度和水利设施管理以修复河流下游生态系统和改善人类生活的可行性,这次会议的召开标志着我国水资源优化调控研究迈入了一个全新的发展阶段。

在利用水库合理调度改善生态环境等实践方面,我国近期也进行了积极有益的探索。如为了改善后修复黑河下游生态环境,自 2000 年实施统一调度以来,水利部根据国务院批准的黑河分水目标,在流域内各省(自治区)、各有关单位的支持配合下,黄河水利委员会(以下简称黄委)及所属黑河流域管理局在缺乏控制性调蓄工程,调度手段单一的情况下,通过创新机制、精心组织、科学调度、精心协调、强化监督,逐年加大了正义峡断面下泄水量,有效增加了进入下游河段的水量。6 年来,黑河上游莺落峡断面累计来水 95.95 亿 m^3 , 年均 15.99 亿 m^3 , 略高于多年平均来水量;中游正义峡断面累计应下泄水量 55.12 亿 m^3 , 实际下泄水量 52.86 亿 m^3 , 累计少下泄 2.26 亿 m^3 ; 2002 年将黑河水送到了干涸 10 年之久的东居延海(1992 年干涸), 2003 年又送到了干涸 42 年之久的西居延海(1961 年干涸); 2004 年使东居延海形成自 1958 年以来最大水面,达到 35.7 km^2 ; 2005 年首次实现了东居延海全年不干涸,下游绿洲草场退化趋势得到有效遏制,林草植被和野生动物种类增多,覆盖度明显提高,生物多样性增加,沙尘暴发生次数明显减少。

从 2000 年 4 月到 2007 年 11 月,在水利部、黄委、新疆维吾尔自治区领导下,由新疆塔里木河流域管理局与巴音郭楞州、农二师共同组织了 9 次自博斯腾湖向塔河下游生态应急输水,自大西海子水库累计向塔里木河下游输水 22.91 亿 m^3 ,在塔里木河尾间台特玛湖形成了历史上最大 200 余 km^2 的湖面,结束了塔里木河下游河道断流近 30 年的历史,河道周边地下水位普遍回升,使塔里木河下游生态环境初步得到了修复和改善,唱响了一曲绿色的颂歌。自 2002 年以来,为保证黄河下游生活、生产和生态用水,确保黄河不断流,小浪底水库电力调度服从水资源调度,多次弃

电供水；黄委在充分考虑黄河下游河道输沙能力前提下，对小浪底、三门峡、万家寨水利枢纽进行联合调度，调整天然水沙过程，以利于下游河道的减淤，并连续5年成功地调水调沙，2007年6月19日实现了第6次调水调沙，把维持黄河健康生命作为一个终极目标（李国英，2002年）。

为避免因湿地缺水带来的生态环境危机，2001年国家投资建设了扎龙湿地应急调水工程，松辽水利委员会从2001年7月至2005年4月，连续5年共从嫩江向扎龙湿地补水10.5亿 m^3 ，生态补水取得了显著的生态保护效果和经济效益，湿地水面积由100多万 km^2 扩大到650万 km^2 ，湿地的生态功能初步恢复，生物多样性得到保护，丹顶鹤等珍稀栖息地状况明显改善，数量明显增加，苇草和鱼类产量提高。为改善太湖的水质和有效抑制蓝藻的大量繁殖，太湖流域管理局于2002年启动了“引江济太”调水试验工程，引长江水入太湖，利用太湖的调蓄作用，有效改善了太湖流域的水环境，缓解了太湖周边地区用水紧张的状况。

海河水利委员会2004年2月中旬和松辽水利委员会同年7月初分别实施了“引岳济淀生态环境应急补水行动”和“引察济向生态环境应急补水行动”，分别从岳城水库、察尔森水库引水向白洋淀和向海湿地生态环境应急补水1.59亿 m^3 、0.5亿 m^3 ，使白洋淀和向海湿地摆脱了干涸的威胁，大大改善了白洋淀和向海湿地的生态环境，拯救了物种多样性遭毁灭性破坏。2006年为缓解白洋淀地区干旱缺水状况，保护淀区生态和环境，保障淀区及周边群众生活、生产用水安全，国家防总、水利部于2006年11月4日实施了“引黄济淀”应急补水工程。此次补水是新中国成立以来黄河水第1次流入白洋淀，也是继引黄济津城市应急调水后，首次尝试跨流域调水维持生态湿地的重要尝试。截至2008年3月5日，“引黄济淀”工程结束，共向白洋淀生态调水1亿 m^3 。

总之，上述活动虽大多属于生态应急调度，但均取得了显著的成效，生态环境得到明显的修复和改善，为保护生态环境和人水和谐、可持续发展作出了重要贡献。

第四节 研究总体思路

饮马河流域生态调度研究的总体思路为：通过实地调研和资料收集整理，全面分析和了解饮马河流域“水资源—人类社会—生态环境”三者的现状及未来发展规划等，分析饮马河流域的不同生态功能，预测河道外“三生”（国民经济用水与生态环境用水）用水需求，确定河道内生态环境需水量；利用系统分析方法，对饮马河流域“天然—人工侧支”二元水循环系统进行抽象和概化，建立系统水量平衡关系、边界条件以及相应生态调度准则，构建饮马河流域生态调度数学模型，并利用现代计算机技术与数据库技术集成开发生态调度计算软件系统；最后，根据饮马河流域历史长系列径流资料，利用所研发的生态调度模型与计算软件系统对不同情景不同水平年生态调度方案进行逐时段调节计算，并通过对多方案计算结果对比分析，最终给出饮马河流域生态调度推荐方案及实施生态调度后对国民经济用水的影响，并初步提出骨干枢纽工程——石头口门水库与新立城水库的生态调度线。具体的研究思路见图1-1。