

Weihe River Ecological Flow
Analysis and Regulation Practices

渭河

生态环境流量分析与 调度实践

.....

贾仰文 王浩 赵振武 王芳 李晓春 等/著

.....



科学出版社

渭河

Weihe River Ecological Flow
Analysis and Regulation Practices

生态环境流量分析与 调度实践

贾仰文 王浩 赵振武 王芳 李晓春 等/著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对陕西省渭河生态环境流量保障问题,在综述国内外河流生态需水与生态调度研究进展的基础上,系统梳理渭河流域水资源与生态环境现状及存在的问题,开展干流水生态环境综合分区与保护目标分析,从生态、环境、景观等多个层面提出干流 24 个断面生态环境流量三级控制指标以及 18 条重点支流 30 个断面的生态环境流量综合控制指标,构建水量调度模型,分析生态可调水量及生态调度的途径与方案,并针对干流关键断面提出生态调度预案、措施和保障机制。本书成果已应用于渭河枯季水量调度实践,为促进渭河流域生态环境与经济社会协调发展提供了支撑。

本书可供水文水资源及环境等相关领域的科研人员、大学教师和研究 生,以及从事流域水资源规划与管理的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

渭河生态环境流量分析与调度实践 / 贾仰文等著. —北京: 科学出版社, 2017. 2

ISBN 978-7-03-050399-2

I. ①渭… II. ①贾… III. ①渭河-生态环境-需水量-研究 IV. ①TV21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 262867 号

责任编辑: 王 倩 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 2 月第一次印刷 印张: 22 1/4 插页: 2

字数: 530 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

国家自然科学基金重点项目(编号：50939006)、
陕西省江河水库管理局项目(编号：资0202042013、资0205012015)
资 助



主要撰写人员

(按姓氏笔画排序)

王 芳	王 浩	牛存稳	仇亚琴	龙正未
刘佳嘉	刘铁龙	许新红	严子奇	李晓春
汪雅梅	周祖昊	庞金城	赵振武	郝春沅
郝 静	贾仰文	龚家国	梁林江	彭 辉
游进军	赫晓慧	魏 娜		

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基。我国改革开放以来经济快速增长，水利发挥了重要支撑作用。但是，由于经济社会的快速发展与气候条件的变化，我国北方缺水地区的水资源供需矛盾日益突出，生活生产用水挤占河流生态环境用水的现象日益突出。河流生态基流和环境用水的保障既是维持河流健康生命的基础，也是经济社会可持续发展的基础。然而，对于经济社会用水与生态环境用水高度竞争的河流，生态环境流量如何确定？被挤占的生态环境用水如何逐步退还？水量调度中的生态环境流量保障措施与机制如何制定？这些问题的回答均需要结合具体河流的特点开展深入研究。

渭河作为陕西人民的“母亲河”，滋养着八百里秦川，孕育了五千年文明，渭河流域也是我国重要的粮棉油产区和工业基地之一。由于人类过度开发利用水资源，渭河面临着水资源短缺、水土流失严重、水污染加剧、河道淤积严重等一系列生态环境问题，严重制约了区域可持续发展。2011年，陕西省委、省政府启动实施了陕西省渭河全线综合整治工程，这是渭河史上“涉及河段最长、投资规模最大、动员力量最广、涉及领域最多”的“根治”行动，总投资超过600亿元，计划利用五年时间，实现渭河“洪畅、堤固、水清、岸绿、景美”的宏伟目标。随着渭河全线综合整治工程的实施，渭河水质变清所需的生态用水短缺与水污染严重的问题凸显。在渭河流域水资源总量不足的现实条件下，渭河生态环境需水的底线究竟是多少？需要的这些水从哪里来？如何保障？仍未有明确的答案。

基于上述背景，陕西省水利厅向陕西省江河水库管理局（陕西省渭河流域管理局）先后下达了“陕西省渭河干流可调水量分析与调度机制研究”“陕西省渭河重点支流生态环境流量研究”两项研究任务。中国水利水电科学研究院在前期完成的国家自然科学基金重点项目“‘自然-社会’二元水循环耦合规律研究：以渭河流域为例”（编号：50939006）的基础上，与陕西省江河水库管理局联合攻关，针对渭河生态环境流量的确定与调度保障机制问题，开展以下研究：①渭河水资源与生态环境现状及问题分析；②渭河干流生态环

境治理目标分析；③渭河干流生态环境需水指标分析；④渭河可调水量分析与水量调度途径及方案；⑤渭河水量调度保障措施与机制；⑥渭河重点支流水资源及生态环境状况综合分析；⑦渭河重点支流生态环境流量分析；⑧渭河重点支流水功能区纳污能力及水污染控制方案；⑨渭河重点支流生态调度方案和保障措施。经过三年多的联合研究，完成了既定研究任务，达到了预期目标。研究成果自 2013 年开始应用于陕西省渭河枯季生态调度实践，为实施非汛期关闭渭河干流电站、汛期合理引水发电的调度方式，促进生态环境与经济社会的协调发展提供了科技支撑。

本书是对上述研究成果的总结。全书共分为 10 章，第 1 章是绪论，介绍研究背景与主要科学问题；主要撰写人为贾仰文、牛存稳、郝春沣等。第 2 章介绍有关河流生态环境需水、水库群优化调度和流域生态调度研究进展；主要撰写人为郝春沣、贾仰文、牛存稳等。第 3 章梳理渭河水资源与生态环境现状及问题；主要撰写人为仇亚琴、赵振武、李晓春、汪雅梅、刘铁龙、庞金城、梁林江等。第 4 章确定渭河生态环境功能分区和保护治理目标；主要撰写人为王芳、贾仰文、王浩、赵振武、许新红、龙正未、郝春沣等。第 5 章计算渭河干流生态环境需水指标；主要撰写人为王芳、贾仰文、王浩、李晓春、赵振武、赫晓慧、龚家国、郝静等。第 6 章计算渭河重点支流生态环境需水指标；主要撰写人为牛存稳、郝春沣、贾仰文、李晓春、赵振武、王浩等。第 7 章在流域水循环演变与经济社会用水分析的基础上，分析渭河流域生态可调水量；主要撰写人为严子奇、周祖昊、贾仰文、牛存稳、刘佳嘉、彭辉等。第 8 章研究渭河水量调度模型、水量调度途径与方案；主要撰写人为游进军、魏娜、仇亚琴、贾仰文、牛存稳、郝春沣等。第 9 章提出渭河水量调度保障措施与机制；主要撰写人为仇亚琴、贾仰文、王浩、李晓春、赵振武等。第 10 章为主要成果、结论与建议；主要撰写人为贾仰文、王浩、牛存稳、王芳、仇亚琴、游进军、郝春沣等。全书由贾仰文、牛存稳、郝春沣统稿，贾仰文、王浩定稿。

本书的完成与出版得到陕西省水利厅、陕西省江河水库管理局、国家自然科学基金委和科学出版社等单位的大力支持，在此表示衷心的感谢。受作者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 9 月于北京

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 主要科学问题	2
第 2 章 流域生态调度研究进展	3
2.1 流域生态调度研究及实践	3
2.2 生态环境需水研究	10
2.3 水库（群）优化调度研究	22
第 3 章 渭河水资源与生态环境现状及问题	30
3.1 渭河流域概况	30
3.2 渭河流域水资源及其开发利用现状	41
3.3 渭河流域生态环境调查与评价	73
3.4 水资源调度管理体制分析	89
3.5 国内外典型河流治理与管理经验借鉴	96
3.6 主要水问题分析	100
第 4 章 渭河干支流生态环境治理目标	103
4.1 背景情况	103
4.2 生态环境功能分区	104
4.3 水生态修复目标	117
4.4 水景观工程建设目标	121
4.5 水环境治理目标	128
4.6 支流水生生物保护	131
4.7 小结	132
第 5 章 渭河干流生态环境需水指标	134
5.1 生态基流计算	134

5.2	非汛期河道渗漏与蒸发量	137
5.3	重点断面产卵期生态流量过程	141
5.4	河道输沙需水	143
5.5	湿地与景观生态需水	151
5.6	环境流量	153
5.7	相关规划成果的生态流量	154
5.8	功能区断面生态环境需水综合分析	157
5.9	重点断面生态流量现状满足情况分析与分阶段控制目标	160
5.10	考虑生态环境流量的污染物总量控制	163
第6章	渭河重点支流生态环境需水指标	165
6.1	渭河生态水文本底条件模拟	165
6.2	生态环境需水指标分析	187
6.3	现有规划要求	191
6.4	生态流量综合分析	192
6.5	现状保证率分析	195
第7章	渭河可调水量分析	198
7.1	变化环境下水循环演变机制分析	198
7.2	渭河流域经济社会用水分析	205
7.3	渭河流域生态可调水量分析	217
7.4	本章小结	235
第8章	渭河水量调度途径与方案	237
8.1	基本资料整理	237
8.2	水量调度途径	249
8.3	水量调度模型	267
8.4	水量调控调度方案	280
8.5	考虑生态基流的水量调控	291
8.6	应急状况下的调控策略	301
第9章	渭河水量调度保障措施与机制	304
9.1	水量调度预案	304
9.2	保障措施	314

第 10 章 主要成果、结论与建议 324

 10.1 主要成果 324

 10.2 主要结论 330

 10.3 主要建议 333

参考文献 336

第 1 章 | 绪 论

1.1 研究背景

渭河作为陕西人民的“母亲河”，滋养着八百里秦川，孕育了五千年文明，也是我国重要的粮棉油产区和工业基地之一，流域内拥有机械、航空、电子、电力、煤炭、化工和有色金属等工业，在陕西乃至西部大开发战略中具有重要战略地位。20 世纪 80 年代以来，随着流域内经济社会的快速发展，人口的急剧增加，人类生存和社会生产的发展对水的需求越来越迫切，水资源供需矛盾日益突出。由于人类过度开发利用水资源，引发一系列生态环境问题，渭河面临着水资源短缺、水土流失严重、水污染加剧、河道淤积严重等生态环境问题，严重制约流域可持续发展。

2011 年，陕西省委、省政府以前所未有的魄力，启动实施陕西省渭河全线综合整治工程，这是渭河史上“涉及河段最长、投资规模最大、动员力量最广、涉及领域最多”的“根治”行动，总投资超过 600 亿元，利用五年时间，要实现渭河“洪畅、堤固、水清、岸绿、景美”的宏伟目标，把渭河打造成关中防洪安澜的坚实屏障、堤路结合的滨河大道、清水悠悠的黄金水道、绿色环保的景观长廊、区域经济的产业集群，重现渭河新的历史辉煌。

随着渭河全线综合整治工程实施步伐的加快，使得渭河水质变清所需的生态用水短缺与水污染严重的问题凸显，解决渭河生态环境需水问题迫在眉睫。然而，实现渭河流域人水和谐健康发展，落实党的十八大提出的生态文明建设的具体要求，在渭河流域水资源总量不足的现实条件下，渭河流域生态环境需水的底线究竟是多少？需要的这些水从哪里来？如何保障？仍未有明确的答案，即存在着“生态环境需水底线不清、保障补水来源不明、调水措施机制不灵”等问题。同时，保障渭河干流需水的条件在于渭河各支流的合理开发利用和调度，因此有必要针对渭河重点支流研究水生态环境流量及其保障方式，对主要支流需要下泄的生态流量、支流水库的最小下泄流量提出要求，对渭河干流生态环境流量的保障形成支撑。

针对“渭河流域生态环境需水底线不清”的问题，在对渭河流域进行生态环境功能分区的基础上，按照陕西省渭河全线综合整治的要求，结合区域生活、生产供用水实际情况，分析渭河生态保护与建设的目标；研究渭河干支流水生生态需水、冲沙需水、环境需水等，综合提出渭河流域生态环境需水，确定不同来水情况下，渭河各河段（行政区域控制断面）生态环境需水的控制指标，并对生态需水的盈缺情况进行分析。针对“渭河流域保障补水来源不明”的问题，通过分析渭河流域水资源现状、工程调度能力，系统梳理流

域内和流域外对渭河干支流生态补水的调水潜力。针对“渭河流域调水措施机制不灵”的问题，探索适合于陕西省渭河流域的调水机制和保障措施，通过加强监测、节水治污、生态补偿、水资源合理定价、最严格水资源管理制度实施等措施，提出近期、远期的水量调度措施，完善调度机制，使调度方案落到实处。

1.2 主要科学问题

1. 渭河水资源与生态环境现状及问题

分析陕西省渭河水资源及其开发利用现状，调查渭河干流与主要支流的水生态、水环境和生态景观的现状，剖析用于生态环境的水源、水量、水质，客观评价渭河生态环境现状。与国内外典型河流进行对比，分析渭河目前存在的主要生态环境问题。

2. 渭河干支流生态环境治理目标

根据渭河现状问题、水功能区划和生态景观功能需求，基于陕西省渭河全线综合整治确定的目标，研究不同来水情况下渭河各断面水量与水质应达到的目标、水生态系统保护与修复目标。

3. 渭河干支流生态环境需水指标

根据陕西省渭河全线综合整治目标与上述生态环境治理目标分析，采用科学合理的方法，以生态功能分区和水功能区为基本单元，计算确定满足新形势下渭河生态环境治理目标的不同频率年、不同月份、不同河段的生态环境需水量控制指标。

4. 可调水量

研究人类活动对渭河流域水资源的影响，开展陕西省渭河流域经济社会用水分析，提出渭河流域自产水和外调水给生态环境带来的可调水潜力，分析渭河干流生态环境流量的盈缺。

5. 水量调度途径与方案

分析渭河流域水量调度途径，研究适用于渭河的生态环境用水的调度方法，建立调度模型并进行联合调节计算，提出不同水平年和来水条件下生态环境用水的调度方案，并针对可能出现的严重干旱或突发水污染事件，提出应急状况下的调控策略。

6. 水量调度保障措施与机制

紧紧围绕陕西省渭河全线综合整治目标的实现，从节水、控污、工程、监测等角度提出满足生态环境需水的水量调度保障措施；从政策、监控和管理方面出发，提出一套科学有效的综合保障机制，保障和促进渭河全线整治规划目标的实现。

第2章 流域生态调度研究进展

2.1 流域生态调度研究及实践

2.1.1 水利工程对河流生态系统的影响

河流生态系统 (riverine ecosystem) 是在河流水体及其周边由生物群落与无机环境共同构成的有机整体。河流生态系统包括陆地河岸生态系统、水生态系统、相关湿地及沼泽生态系统在内的一系列子系统, 是一个复合生态系统, 并具有栖息地功能、过滤作用、屏蔽作用、通道作用、源汇功能等多种功能。河流生态系统属于流水生态系统, 是陆地和海洋联系的纽带, 在生物圈的物质循环中起着主要作用。河流生态系统中, 生物与环境之间相互影响、相互制约, 并在一定时期内处于相对稳定的动态平衡状态^[1-4]。生物群落包括生产者、消费者和分解者, 在长期的自然演化过程中, 形成了互为依存的有机整体; 而无机环境是指非生物的物质和能量, 在外界干扰条件下具有一定的自我修复功能。无机环境是生态系统的基础, 其条件的好坏直接决定生态系统的复杂程度和其中生物群落的丰富度; 生物群落反作用于无机环境, 在生态系统中既在适应环境, 也在改变着周边环境的面貌。

河流生态系统具有四维时空结构, 即纵向、侧向、垂向和时间^[5-7]。在纵向上, 河流从河源、上游、中游、下游到河口均发生物理的、化学的和生物的变化。不同河段由于流经区域的气候、水文、地貌和地质条件等的差异, 呈现出不同的流态、流速、流量、水质以及水文周期等, 形成急流、瀑布、跌水、缓流等水流形式。河流中浅滩和深潭交替出现, 形成了丰富多样的生境, 浅滩是很多水生生物的主要栖息地和觅食场所, 深潭是鱼类的保护区和缓慢释放到河流中的主要有机物存储区。早期对河流纵向空间的研究导致将河流分为离散河段, 当前研究开始重视河流生态系统整体性, 形成了河流连续体 (river continuum concept) 的概念和模型^[5,8]。在侧向上, 河流生态系统由主河槽、洪泛区和过渡带组成^[9]。主河槽是河流生态系统的主体, 是联结陆地生态系统和水生生态系统的纽带, 为水生生物提供了生存环境。洪泛区是主河槽两侧受洪水周期性淹没影响的区域, 汛期洪水漫溢将河流的营养物质输送到河漫滩、湖泊和湿地, 适于湿生植物和水生植物成长, 洪水消退时将淹没区的动植物腐殖质等输送到河道, 为河岸带生物群落提供了栖息地, 同时对污染物起到降解、过滤和屏蔽作用。过渡带是洪泛区一侧或两侧的部分高地, 是洪泛区和周围陆地景观之间的过渡区域或边缘区域, 岸边湿地、沼泽、森林、草原等交替, 为两栖动物、鸟类和哺乳动物等提供了生存环境, 并且起着调节水温、光线、渗漏、侵蚀和营

养输送的作用。对河流生态系统研究,不能只局限在河道的尺度上,同时应考虑河岸植被、洪泛平原等与河流关系密切的陆地生态系统^[10,11]。在垂向上,河流可以分为表层、中层、底层和基底。由于光照、水温、含氧量、浮游生物等因素的影响,河流生物群落随水深呈现出分层现象。此外,河床基底多样的组成结构及其包含的丰富营养物质等,为不同的水生生物提供了栖息地以及营养来源,也是地表水和地下水交换的重要通道。在时间上,较长时间尺度的气候、水文条件以及河流地貌特征等的变化导致河流生态系统的演替,较短时间尺度(年、月、日以及洪水脉冲)的水文要素变化为生物群落提供了所需的生存环境和必要的生物信号。

河流生态系统的四维时空结构使得天然河流具有物质流、能量流、信息流和物种流的连续性,生物群落随河流水流的连续性变化,呈现出连续性分布特征^[8]。这种连续性的产生是由于在河流生态系统长期的演替过程中,生物群落对于水域生境条件不断进行调整和适应,反映了生物群落与生境的适应性和相关性。但是在人类社会经济发展需求的驱动下,水利工程的建成和运行造成河流的非连续化^[12],改变了河流天然的物质能量循环特点,进而影响河流生态系统生物群落的完整性。

水利工程对河流生态系统的影响主要体现在非生物要素和生物要素两个方面,根据其影响程度可以分为三个层次^[12-15]。第一个层次是水利工程对河流物质、能量输送通量(水文、水质、泥沙等)的影响;第二个层次是河道结构(河道形态、泥沙淤积、冲刷等)以及河流生态系统结构和功能(初级生物和浮游生物等)的变化,主要是河流能量和物质输送在水利工程建成后的调整结果;第三个层次是综合反映所有一、二层次影响引起的变化(无脊椎动物、鱼类、哺乳动物以及鸟类等)。

在水利工程对河流水文特性的影响方面,由于水利工程的调蓄作用,河流的丰枯变化减弱,河道洪峰流量和洪水频率降低,高流量过程减少,低流量过程增加,甚至由于过度取水造成河道断流,河道流量的大小、发生时间、频率、历时和变化率均产生变化,影响了河流原有的物质、能量、生态系统结构和功能。洪水脉冲的减弱使鱼类产卵和迁徙失去了环境信号和必要通道,漫滩洪水的减少也影响了河流与周边环境之间的物质和能量交换,导致河流、河岸、洪泛平原等各类生态环境产生变化,进而造成河流和河岸带生物群落的改变^[16]。此外,坝址上游因水库蓄水而导致地下水水位抬高,下游因补给水源大大减少而导致地下水位下降,影响了区域地表水和地下水的平衡。

在水利工程对河流水力特性的影响方面,水利工程引起河流水动力条件的改变,导致颗粒物迁移、水团混合性质等显著变化,强水动力条件下的河流搬运作用,逐渐演变为弱水动力条件下的湖泊沉淀作用^[17],造成库区泥沙淤积,显著减少生源要素(氮、磷、硅等)的纵向输送通量。而在较小尺度上,水库因水力发电产生的脉动泄流增加了下游河道水流波动的幅度,造成下游河道的冲刷,对下游水位、水质、河道地貌形态和河床地质稳定性均产生了影响。此外,河口地区的冲淤平衡可能被打破,造成咸潮入侵等生态环境问题。

在水利工程对水体物理化学条件的影响方面,由于库区水流速度降低,影响了河流中污染物的迁移、扩散和转化,库区近岸水域和库湾水体纳污能力下降,致使库区近岸水域

和库湾水体富营养化。水库水体的季节性分层,使营养物质在水库中迁移和转换的生物地球化学行为明显不同于河流^[18],导致水体垂直剖面上不同水团的物理、化学特性差异。由于水库下泄水流存在水温分层和溶解气体过饱和现象^[19],对于下游的物种生长繁殖会产生不同程度的影响,特别是春夏季节水库下泄的低温水,导致鱼类繁殖季节推迟、当年幼鱼的生长期缩短、生长速度减缓等^[20]。

在水利工程对河流连续性的影响方面,在河流上建设大坝造成河流纵向的非连续化,使自然河流从源头至河口的连续体变成串联非连续体^[21],使鱼类及其他生物的迁徙和繁衍过程受阻,也将对鱼类等生物组成的完整性产生不利影响,部分种类的生物可能会因为生境的缺乏而消失,一些重要的生态过程也将受阻,水域生态完整性将遭到巨大破坏。同时,筑堤防洪缩窄了河道,阻碍了汛期洪水侧向漫溢,出现一种侧向的河流非连续性特征。不透水的堤防和护岸结构也阻隔了地表水与地下水的交换通道,形成垂向的非连续性。水利工程对河流连续性的影响导致河流生态系统空间异质性下降,使栖息地数量和质量降低,导致生物群落多样性的减少^[22]。

2.1.2 水库生态调度研究进展及国内外实践

生态调度是水库调度研究和实践的前沿课题,其研究内容和步骤应包括:识别水库建设和运行造成的生态环境影响;提出区域生态系统修复及可持续利用综合目标;确定生态环境需水过程及经济社会需水目标;研究满足生态环境需水的水库优化调度方案和配套技术;分析不同方案下生态环境需水满足程度及其对经济社会效益的影响;试验并评估不同方案下生态系统修复效果;综合考虑利益相关方的诉求和生态系统修复效果修正需水目标并重新优化和评估调度方案,等等。

生态调度的概念目前还没有十分明确的定义。在国外,生态调度没有特定的术语,常采用的描述词语包括“ecologically-friendly operation”“multi-objective reservoir operation”“sustainable reservoir operation”“reservoir management optimization for ecological restoration”等。生态调度被认为是在水库综合调度中考虑和处理生态环境问题,在平衡人类需求以及生态环境需水的基础上,改善水库下泄水流,保护河流生态系统的健康^[23-28]。在国内,关于生态调度的表述由于生态目标的设定和优先次序不同而有所差异^[29]。董哲仁^[30]认为,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法。程根伟^[31]认为,水库生态调度是充分考虑水库调节性能和河道输送特性,利用水库库容,适时蓄存或泄放径流,调整天然水沙过程,并改善库区和下游的河流生态环境条件,增进河流健康。胡和平^[32]认为,水库生态调度就是要在实现基本的生态环境目标的前提下,发挥水库的社会经济效益,但是其大前提是保证人民群众的生命财产安全和正常的生活。梅亚东^[33]认为,在研究调整水库的调度方式减轻筑坝对生态环境的负面影响的过程中,应该把环境和生态区分开来。环境调度以改善水质为主要目标,生态调度以水库工程建设运行的生态补偿为主要目标,两者相

可以看到,水库生态调度的内涵主要体现在两个层面的平衡,首先是人类经济社会发展需求与河流生态系统需求之间的平衡,其次是人类防洪、发电、供水等经济社会发展目标之间的平衡。防洪、兴利、生态作为水库生态调度的三个重要方面,既相互联系又相互制约。在不同区域、不同时期,水库调度的侧重方向有所不同。如汛期应当优先考虑防洪要求,兴利与生态应服从防洪要求;非汛期则应结合区域特点及水库来水、蓄水条件,合理协调兴利与生态目标之间的关系,以寻求各部门都能接受的水库调度方案^[34]。

水库生态调度的核心是协调人与自然的关系,实现经济社会与资源环境协调可持续发展。水库生态调度应遵循以下几项基本原则:①以河流本底条件为基准。河流的自然水文情势(nature flow regime)是塑造和维护河流生态系统完整性的决定性因素^[35,36],在长期演化过程中,与河流物理化学特性、河湖地貌、生物群落之间相互影响、反馈、适应,共同构成河流生态系统的本底条件。在水库生态调度中,河流水资源、水环境、水生态天然状况和实际状况的调查和评价是必要的前期工作。在此基础上确定的河流生态修复目标应切实可行,不宜超过河流自然状态下的本底条件。②遵循生活、生产和生态用水共享的原则。生态需水只有与社会经济发展需水相协调,才能得到有效保障。生态系统对水的需求有一定的弹性,在生态系统需水阈值区间内,应结合区域社会经济实际情况,兼顾生态需水和社会经济需水,合理地确定生态用水比例。水利工程的主要功能是兴利除害,生态调度中必须要考虑防洪、供水、发电、灌溉、航运等经济社会目标。同时,在河流水流情势与河流生态响应关系的基础上,权衡社会经济可承受力,尽可能地保留对河流生态系统影响重大的流量组分,恢复河流的生态完整性^[37]。③因时、因地制宜的原则。不同河流具有自身独特的生态环境状况和水资源开发利用状况,同时又支撑着不同发展水平、不同社会文化传统的人类社会,使得每条河流所受胁迫类型和程度各不相同,生态调度实践中所需要解决的重点问题也不同。同时,河流生态系统中受影响的物种以及受影响的生活史阶段也各不相同,需要针对不同河段、不同时段、不同恢复目标对应的生态环境需水做具体分析。因此,生态调度目标设置和调度方案必须结合区域生态环境现状、经济社会发展水平和水资源开发利用条件,因时、因地、因物种而异^[38],逐步达到人与自然和谐发展的最终目的。

在水库生态调度的研究方法方面,通常的研究思路是在传统的水库优化调度模型中加入反映下游生态环境需水(即生态流量)的元素。在优化调度模型中,可以通过更改目标函数或者约束条件来增加一个新的影响因子。考虑生态环境需求的水库优化调度,主要包括三种途径^[39]:①在传统优化模型的基础上加入生态环境需水约束条件,即生态流量约束型模型;②将生态环境需水作为优化系统新的目标加入,即生态流量目标型模型;③将生态环境需水间接转化为可以统一度量的经济或其他效益,从而形成生态价值的目标纳入优化系统进行考虑,即生态价值目标型模型。

生态流量约束型模型相对于传统优化模型而言,增加了新的约束条件,即要求下泄流量大于生态流量,而调度目标函数不变。在以往的研究中,多数是将河道最小流量需求作为优化模型的固定约束来实现^[24,33,40]。通过一个简单且固定的生态流量约束条件,虽然可以保证水库调度时坝下河道最低的流量值,但是,其对生态系统的保护效果受到越来越多

的质疑,生态专家普遍认为河流生态系统对于流量的需求远远比单一的最小生态流量要复杂和精细^[41],想要长效保护生态系统,需要对优化调度模型提出更精细和更准确的生态流量约束。因此,考虑目标物种需求以及多个河流生态管理目标的综合生态环境需水过程受到重视,并在水库生态调度模型中得到应用^[32,42-44]。考虑综合生态环境需水过程的水库调度可能对水库工程效益产生较大影响,在实际生态调度实践中,需要寻求生态环境需水满足程度和工程效益损失之间的平衡点,一般采用多目标优化方法进行进一步研究。

生态流量目标型模型相对于传统优化模型而言,将生态流量作为目标函数之一,而约束条件基本不变,生态流量目标与原有调度目标构成多目标优化问题。在生态流量目标型模型中,生态环境需水过程不能直接作为调度目标,一般将其量化为水文改变程度、生态因子等,并纳入多目标优化模型,进而求解考虑工程效益和生态保护的 Pareto 最优方案,具体方法包括可变范围法 (range of variability approach, RVA)、中度干扰假说 (intermediate disturbance hypothesis, IDH) 以及生态赤字 (eco-deficit) 等。可变范围法通过量化河流流量、时机、频率、延时以及变化率等水文指标的改变来度量人类活动对自然河流水文范式的扰动^[45,46];中度干扰假说可以量化河流生态系统的自然扰动和人为扰动^[47,48];生态赤字通过天然流量过程线与调度流量过程线之间的面积来定量描述生态系统受胁迫的程度^[24]。

生态价值目标型模型与生态流量目标型模型相似,是一个多目标优化问题。通过河流综合管理和经济视角来研究水库优化调度的模型,将生态流量产生的成本和收益纳入水库调度的“成本-效益”(cost-benefit)模型,将水库目标全部转化为可以统一度量的经济或其他效益,并根据当地实际情况,定义反映水库整体效益或河流生态系统服务功能价值的经济函数^[49-52]。此类模型的关键问题在于生态系统服务功能价值的合理计算,目前估算生态系统服务功能价值的方法较多,不确定性较大,可能出现生态系统服务功能价值与工程效益不在可比的数量级上,从而难以实现生态目标的有效保护^[51]。除了将河流生态系统服务功能价值进行货币化处理外,将不同类型的产品和效益采用某种方式进行统一度量,也可以实现系统产出价值的量化,如能值理论等^[53]。

在水库生态调度实践方面,欧洲、美国、澳大利亚等国家起步相对较早。早在 20 世纪 40 年代,美国开始强调河川径流作为生态因子的重要性^[54],考虑水生生物生长、繁殖的生态需水量^[55]和基于生态需水的水库调度模型等^[56]相关研究得到了发展。

美国田纳西流域管理局 (TVA) 于 1991 ~ 1996 年对流域内 20 个水库的调度方式进行优化调整,以下游河道最小流量和溶解氧浓度为指标,增加水质保护、生态修复和生物栖息地保护的内容,通过对水库的调度方式进行优化,使得水库在保证航运、发电、防洪等原有功能的同时,在区域水质改善、娱乐和经济发展方面发挥了重要作用,最大限度地满足经济发展与环境保护相协调的目标^[57]。

科罗拉多河格伦峡大坝于 1982 ~ 1995 年进行大量大坝调度的生态环境效应研究,提出 9 种调度备选方案和“适应性管理”的建议。1996 年内务部采纳了改进的低波动水流 (MLFF) 的推荐方案,要求调度除满足传统的开发目标外,还必须考虑濒危物种保护、下游河滩栖息地恢复及文化娱乐价值保护等。同时,适时地实施生态水流试验,不断改进调