

筑坝河流 生态水文效应评估 理论与实践

郭文献 王贵作 张金萍 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

筑坝河流 生态水文效应评估 理论与实践

郭文献 王贵作 张金萍 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书依托国家自然科学基金课题“考虑下游鱼类生境健康的水库生态调度研究”相关研究成果,构建了筑坝河流生态水文效应评估理论框架体系,并以长江水电梯级开发为对象,综合评估水电梯级开发影响下长江干流生态水文效应,并提出水电梯级开发影响下鱼类生态保护修复措施。

本书可供从事生态水利等相关专业的科研和管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

筑坝河流生态水文效应评估理论与实践 / 郭文献,
王贵作, 张金萍著. — 北京: 中国水利水电出版社,
2016. 12
ISBN 978-7-5170-5030-8

I. ①筑… II. ①郭… ②王… ③张… III. ①筑坝—
影响—河流—水文环境—生态效应—研究 IV. ①X321
②X524

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第313284号

书 名	筑坝河流生态水文效应评估理论与实践 ZHUBA HELIU SHENGTAI SHUIWEN XIAOYING PINGGU LILUN YU SHIJIAN
作 者	郭文献 王贵作 张金萍 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、68545874 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	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.25印张 219千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
定 价	46.00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

水电梯级开发在带来巨大经济效益的同时,势必会对流域生态环境带来一定影响,而这种影响又不同于单个水电工程对生态环境产生的影响,梯级开发背景下,水电站空间布局较为密集,具有长期和协同作用的特点,对生态环境会产生累积影响。水电工程建设改变了河流原有的物质场、能量场、化学场和生物场,进而改变河流生态系统的物种构成、栖息地分布以及相应的生态功能。当生境条件的改变超过生物自我调节恢复能力时候,物种将面临衰退、濒危和绝迹的威胁,影响生态系统健康。已有研究表明,近百年来,水电工程建设是造成全球鱼类生物遭受灭绝、威胁或濒危的主要原因。

水电梯级开发引起的河流生态问题已逐渐引起了各国政府和科学家的重视,为了减轻大坝对河流生态系统的不良影响,国内外开展了大量相关研究,研究表明,大坝对于河流生态系统的负面影响,可以通过工程措施、生物措施和管理措施在一定程度上避免、减轻或补偿。

根据《长江流域综合利用规划》,长江上游规划建设的装机容量 300MW 以上的大型水电站有 80 余座,1000MW 以上的水电站有 48 座,总装机容量超过 15 万 MW。金沙江水电基地、雅砻江水电基地、大渡河水电基地、乌江水电基地和长江上游水电基地,这 5 个水电基地处在长江上游地区。随着一大批大型水电站的近期开工建设,尤其是 2009 年年底三峡工程建成发电,以三峡工程为骨干的长江上游干支流梯级水电站群已初步形成规模。长江干流水电梯级开发建设在改变河流水文情势同时,必将对长江河流生态系统产生重要影响。

本书依据国家自然科学基金课题“考虑下游鱼类生境健康的水库生态调度研究”,构建筑坝河流生态水文效应评估理论与框架体系,以长江干流水电梯级开发为对象,综合分析了长江干流水电梯级开发对河流生态水文改变程度,定量评估了长江干流河道生态流量,提出了长江鱼类生态保护修复措施。

本书在编写过程中得到了众多人士的帮助和支持。感谢华北水利水电大学徐建新教授、中国水利水电科学研究院肖卫华教授级高级工程师在本书编写过程中给予的指导和帮助。此外,华北水利水电大学硕士研究生张陵、党晓菲、王艳芳、郭科、张爱民参与了本书部分编写工作。编写过程中参考和

引用了国内外专家和学者的大量文献资料，在此向他们表示感谢！同时，中国水利水电出版社给予了大力支持，并提出了宝贵意见，在此表示感谢！

本书研究工作得到了国家自然科学基金“考虑下游鱼类生境健康的水库生态调度研究”（51209091）、“水电梯级开发对长江中游重要鱼类生境累积效应及调控机制研究”（51679090）和河南省高校科技创新人才支持计划“梯级水库群多尺度多目标生态调控模型与方法研究”（16HASTIT024）联合资助。

由于作者水平所限，本书难免存在不足之处，恳请各位读者给予批评指正。

作者

2016年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究内容	9
第 2 章 筑坝河流生态水文效应理论框架体系研究	11
2.1 河流生态系统	11
2.2 河流环境流量理论框架研究	16
2.3 水利工程对河流生态环境的影响	20
2.4 河流水流情势与生态效应理论	26
第 3 章 研究区概况	29
3.1 长江流域概况	29
3.2 长江流域水电开发概况	29
3.3 长江重要生物资源概况	35
第 4 章 长江上游生态水文情势变化及生态影响	36
4.1 长江上游典型区概况	36
4.2 数据与方法	37
4.3 长江上游水沙变化特征分析	42
4.4 长江上游生态水文特征分析	51
4.5 长江上游水文情势变化对鱼类的影响	54
第 5 章 长江中下游水文情势变化及生态影响	57
5.1 研究站点分析	57
5.2 三峡水库下游河流水文情势趋势性分析	57
5.3 水利工程对河流水文情势影响分析	69
5.4 长江中下游水文情势变化对中华鲟鱼类影响	74
5.5 长江中下游水文情势变化对“四大家鱼”影响	88
第 6 章 长江干流河道内环境流量综合评估	101
6.1 河道内环境流量评估方法	101
6.2 长江上游河段河道内环境流量分析	104
6.3 长江中下游下游河道内环境流量	111

第 7 章	水电梯级开发影响下长江鱼类生态保护措施·····	127
7.1	工程措施 ·····	127
7.2	非工程措施 ·····	129
7.3	管理措施 ·····	129
7.4	长江上游拟建水电工程鱼类生态保护措施 ·····	131
第 8 章	结论与展望·····	135
8.1	结论 ·····	135
8.2	展望 ·····	136
参考文献	·····	137

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

河流系统是地球上的主动脉,在维系地球的水循环、气候变化、能量平衡和生态发展中发挥着举足轻重的作用。河流系统,作为一种特殊的系统,以其丰富的水资源哺育着世间万物,保障着人类和一切生物的生存,还为人们提供了发电、休闲、运输、饮食等诸多服务功能,河流系统保护的完整与否,也深刻影响着人类文明社会的进步和国民经济的可持续发展。

水利工程具有防洪、发电、航运、灌溉以及工农业供水等重大效益,为了满足效益最优化、利益互补化,在水能资源丰富的大中型河流上实施的梯级开发更是实现了上下游多级梯级电站“流域-梯级-滚动”开发模式的综合效益,充分发挥水能资源安全、清洁、经济及可持续再生的优势^[1]。世界范围内大的水系几乎都被改造成梯级水库群,如南美洲的巴拉那河、北美洲的哥伦比亚河、欧洲的伏尔加河、亚洲的安加拉河、非洲的赞比西河等,1997年的世界大坝学会统计数据表明,世界范围内处于运行中的大中型水库共有3.6万座,直到2003年,数据增至4.97万座,中国大坝总数位居第一,约占52%^[2]。但是,梯级开发空间布局的密集分布具有的长期协同作用,也在促进经济增长的同时,对生态效益产生了长期、潜在的不利影响,河流的天然水文循环体系被人为地打破,引起的一系列复杂的协同反应改变了河流天然生态系统的物理、能量和生物结构,造成河流水生态系统恶化、河道生境破碎化、河川径流减少甚至断流、湿地功能退化、水体污染、泥沙淤积等生态问题。

梯级水电开发改变了河流径流时空格局,河流水文特征、河流地质条件、水温、水质、泥沙、营养物以及水力学特征等水环境也随之调整,进而导致河流中赖以生存的生物群落结构、栖息地以及生活习性因不能满足其生态需求而产生重大的变化。鱼类作为最古老的脊椎动物之一,对水环境的识别能力和敏感度较高,通常当作指示物种来体现外界对水环境的影响^[3]。梯级水库的多影响因子叠加起来会对生态环境产生巨大的累积效应^[4,5],其对鱼类产生的影响主要体现在三个方面:①水文情势改变。原有连续的河段被大坝分割成多个河道型水库,天然河段大量减少或消失,改变了河流原有的水文地质条件,上游河段的水位、流速和流量的周年变化幅度降低,大部分时间将变成静水或缓流环境,坝前库区出现水温分层、底层缺氧甚至无氧的几率较高,下泄水水温过低及下泄水体氮气过饱和等现象^[6],喜静水或缓流水鱼类增加,喜急流鱼类减少,进而引起鱼类群落结构的改变。②坝体阻隔。大坝对鱼类的阻隔即大坝对生物及非生物生态通道的阻隔,一方面封闭鱼类溯河和降河洄游通道,增加鱼类洄游时间;另一方面破坏了河流纵向、横向的物质交换和能量流动以及水文过程连续性,并且分割生境和阻隔鱼类的程度随坝体数量的



增加而增加^[7]。大坝的阻隔还可能导致鱼类种群的遗传多样性降低,种群灭绝的可能性增加。③栖息地淹没。梯级开发造成大面积淹没区,进一步分割并压缩河流鱼类的生境,对鱼类产生叠加的负面影响。一些天然河段分布有大量的鱼类产卵场、索饵场和越冬场。梯级开发后,由于回水淹没和水文、底质条件改变,这些鱼类的“三场”会受到不同程度的影响^[8]。

在河流开发的同时提出河流生态环境健康的保护措施,是维护河流的可持续开发性的必要条件。当今,追求“人水和谐”,维护河流生态健康已毅然成为治理江河流域的新航标,是未来水利发展的必然要求。水利枢纽建成运行后,直接改变了河道径流的时空分配格局,间接引起下游的水质、水温、地貌、输沙量、水文特征、水文条件、水力学要素等生态条件发生变化,因此研究这些要素的变化规律是首要任务,这也是研究筑坝河流生态水文效应的基础依据。

我国河流梯级水电开发近年来蓬勃发展,开发利用水能资源成为我国能源发展的重大举措。我国水能资源蕴藏量高达 6.8 亿 kW,技术可开发容量为 5.4 亿 kW^[9],主要集中在中西部水量充沛、河道落差较大的大中型河流上,其中长江及其主要一级支流、黄河干流和怒江干流等装机容量占全国可开发总量的 60%^[10],仅长江流域可开发容量占全国可开发总量的 53.4%^[11],其中长江上游可开发水资源就占全流域的 89.4%^[12]。截至 2012 年,我国的水资源开发利用程度仅为 25%,与发达国家 50%~70% 的利用程度相比水平较低。然而,科技水平的不断提高,促使我国的水利水电建设事业不断飞速发展,已建、在建和规划了大量的水库,名扬全球的三峡水利枢纽工程是目前世界上最为宏大的水利建设项目。近年来,随着河流天然生态环境的不断恶化和人们对环保观念的不断增强,人们逐渐意识到水资源过度利用引起的河流生态问题,水利工程的建设破坏生态环境的问题也变得日趋激烈。同时也引起了全社会的广泛关注,已然成为我国目前必须面对的一个重大课题。

长江是我国的第一大河,水利工程对河流环境的影响是缓慢的、潜在的、长期的和极其复杂的,并且往往是与其他人类活动共同长期作用的结果。目前,长江流域上的大型水利枢纽建设正处于蓬勃发展时期,从早期的三峡工程到如今的南水北调工程,一大批的水利工程在长江流域这条大动脉上相继兴建。长江上游同样面临着需要向经济、社会和生态效益最优化的可持续发展的原则转变。长江上游宜宾至重庆段是整个长江经济带上一个尚未进行综合开发的区域,上接金沙江四级梯级开发,即乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝四座水电站,下接三峡、葛洲坝两座水电站,具有承上启下的战略地位。同时,该干流江段位于长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区,生物多样性备受保护,梯级水电开发可能会进一步改变鱼类资源以及影响其遗传多样性,进而影响河流生态系统的健康和稳定^[13]。长江流域水电梯级开发势必在一定程度上改变着长江流域的生态系统,对该流域中水生生物的生存环境造成了影响,对水生生物资源的生态学效应是缓慢且长期的,长江生态系统的破坏对水生生物种群资源的长期影响,将威胁中华民族的生存和长期发展。因此分析和研究水利工程对河流水文情势和生态系统的影响,恢复或改善被破坏的河流生态系统,以维持良好的生态系统环境和保障生物资源永续利用,具有重要的实际应用价值和现实意义。



1.2 国内外研究现状

1.2.1 河流生态水文理论

20 世纪中后期,生态水文学理论的发展达到巅峰,在河流生态学研究不断提出一系列新的概念和理论,从不同角度理解了河流生态水文学的理论框架,这些理论的发展奠定了河流生态水文的坚实基础。下文着重介绍几种国外对河流生态系统研究的概念模型。

1954 年, Huet Illies 等^[14]提出了地带性的概念 (Zonation Concept, ZC), 是描述河流生态系统完整性的第一次尝试。地带性概念描述了河流的划分情况, 即按照鱼类种群或大型无脊椎动物种群特征将其分为不同区域, 不同的分区反映了水体不同的温度和流量对水生生物的影响。

1980 年, Vannote^[15]提出了河流连续体的概念 (River Continuum Concept, RCC), 描述了河流从发源地到入海口之间, 整个河流长度内的生物群落整体性结构特征和功能, 是对河流生态学理论的一大发展, 影响颇深。该理论指出在自然水系中, 河流的每个角落都有生物群落的存在, 且它们沿河流的流向在发生着变化, 构成时空连续体。同时描述了整条河流水力梯度的连续性; 分析了各个河段水文、水力条件的变化引起的生物生产力的变化; 介绍了不同颗粒级配有机物质的运输、遮阴效应影响以及河流底质组成对食物网的影响等。河流连续体概念强调河流沿纵向的变化, 忽视了河道与基底、高地和洪泛区之间的联系和功能。

由于大坝的建设, 威胁到河流上下游生态系统的结构和功能, 日积月累导致其从根本上发生变化, 严重者更导致河流生态系统的中断, 在此理念之上, 1983 年 Ward^[16]提出了串连非连续体的概念 (Serial Discontinuity Concept, SDC), 主旨在于强调梯级布置的大坝对河流生态系统的影响。串连非连续体概念设定了两组参数来评价大坝工程对河流生态系统的影响, 并强调了大坝工程对其结构和功能的改变。其中一组参数命名为“非连续性距离”, 另外一组称为强度参数 (intensity), 反映了人工调蓄水量的行为对河流生态系统造成影响的强烈程度。随后, 该理论得到了进一步的发展和应用。

1986 年, Frissel 等^[17]提出了流域的概念 (Catchment Concepts, CC), 意在考虑河流与整个流域时空尺度的关系, 在之前的理论研究中增加了流域时空尺度的内容, 最后强调并建议了河流栖息地的分级框架, 包括河道、池塘、浅滩和小型栖息地之间的分级。

1989 年, Junk^[18]提出了洪水脉冲的概念 (Flood Pulse Concept, FPC), 文中强调了洪水脉冲是洪水对河道和洪水滩区生态系统中生物生存、发展和相互作用的主导力量。从而成为了河流生态学理论上的一项重大突破, 在为以后河流规划整治项目和河流生态修复的工作中起到了举足轻重的作用, 解决了相关领域中的不少难题。

各国学者在不断实地观测验证河流连续体理论的同时, 也不断对其补充和完善。Ward^[19]提出了将河流生态系统由纵向连续扩展到四维系统, 分别为垂向、横向、纵向和时间, 其中垂向是指河道至基底, 横向指洪泛区至高地, 纵向指上游至下游; 时间指每个方向随时间的变化分量, 详细地说明了河流生态系统与流域之间的相互作用, 并着重指出要把河流生态系统的开放性、连续性和完整性作为以后研究工作的重点。使 RCC 后来成

为河流生态学中一个具有深远影响的理论,为广大学者对河流生态理论的研究提供了深厚的理论支撑。

1997年,Poff^[20]提出了自然水流范式的概念(Nature Flow Paradigm, NFP),强调了未被干扰状态下自然水流的重要地位,其对河流生态系统的完整性和原有生物多样性具有关键意义。Poff认为动态的水流条件对河流的泥沙运动和营养物质运输产生重要影响,自然水流的关键非生命变量表示为:水量、频率、时间、持续时间和过程变化率,认为可以利用这些因子之间的相互关系来得以描述整个水文过程。在河流生态修复工程中,可以将未受干扰下的天然流水文参数作为生态修复的参照^[21]。

此外,还有一些在河流生态学研究极为重要的概念:营养螺旋的概念(Resource Spiraling Concept, RSC)^[22],河流水力的概念(Stream Hydraulics Concept, SHC)^[23],河流生产力模型的概念(Riverine Productivity Model, RPM)^[24],近岸保持力的概念(Inshore Retentivity Concept, IRC)^[25],地带分布的概念(Zonation Concept, ZC)^[26]等。

但值得说明的是,上述的概念模型尚存在些许不完美。生态系统是一个由各个生态要素综合作用的整体,各生态要素不可能独立存在,它们之间的作用是相互交融的。同时生境要素也会产生多种综合效应,并且与各生物因子相互作用。以上介绍的几种概念模型是将生态环境要素与生态系统的结构和功能之间的关系作为研究前提,体现了河流生态系统的局部特征,而未能从综合性和整体性角度将生态系统的综合特征充分显现出来。

为了弥补现存模型的不足,2008年董哲仁^[27]提出了“河流生态系统结构功能整体模型”(Holistic Concept Model for the Structure and Function of River Ecosystems, HCM)。“整体模型”创建了河流水流流势、水文情势、地貌景观这三大类生态环境因子与河流生态系统的结构和功能之间的相关联系。强调了河流生态系统各个组成之间的相互关系,也包括与结构关系相对应的物质循环、生物生产、信息流动等生态系统功能特征。这也是我国学者对河流生态系统的一项伟大创新,但其实际应用价值还有待进一步考究。

1.2.2 河流生态水文研究方法

1.2.2.1 水沙情势分析方法

河流水沙情势变化特征主要有趋势性、周期性、突变性等,常用的水沙序列趋势识别方法有线性趋势法、Mann-Kendall 秩次相关检验法、滑动 T 法等;周期性分析方法目前主要有小波分析法;突变性分析方法比较多,如过程线法、有序聚类分析法、Mann-Kendall 法、F 检验法、R/S 分析法、信息熵分析法、小波分析法等。桑燕芳等根据水文时间序列的研究进展,将水文时间序列分析方法分为 6 种,包括序列相关性法、水文频率法、模糊法、混沌理论法、信息熵法和小波分析法^[28]。

小波分析法方法可以通过多尺度变化对信号或者时间序列进行粗细不等的多分辨率分析,广泛应用于水沙时间序列趋势性、周期性、突变性等特征分析上。Gauchere^[29]利用小波变换的时、频局部特性并结合其他径流时间变异参数对法国 9 个流域的特征进行分析与分类。Nakken^[30]将小波变换应用到降水、径流以及降水-径流关系的时间变异研究。国内学者陈杰等^[31]运用 Monte-Carlo 模拟试验研究了小波多分辨率功能的趋势识别能力,并认为在趋势分析前应剔除时间序列中的伪周期及不合理的突变点。姚阿漫等^[32]运用



Db3 小波对石羊河流域的径流序列进行消噪处理并识别其趋势成分。桑燕芳等^[33]分别对小波函数选择、小波阈值消噪等问题进行分析。李正最等^[34]运用小波分析法研究了洞庭湖出入湖的径流和输沙量的多时间尺度变化特征,并探讨了洞庭湖区域水沙变化可能带来的影响。李艳玲等^[35]将小波理论引入径流序列的变异点诊断,对 Morlet 小波系数的过零点进行证明和检验,确定其真实突变点。吴创收等^[36]采用小波分析法对珠江流域的入海水沙通量和降雨变化特征进行分析,并认为两者的变化周期在年代际和年际间都具有较好的关联性。丁文荣等^[37]将小波分析用于红河支流盘龙河上的河流输沙率规律研究。姜世中等^[38]对龙川江年输沙率时间序列进行了小波特征分析研究。

1.2.2.2 河流环境流量计算方法

环境流量是近年来生态修复和水资源评价领域的研究热点,涉及众多生态系统类型。环境流量最早源于 20 世纪后期,西方国家是在维护河流生态系统的健康,追求人类与河流以及赖以生存的生物种群合理利用水资源的过程中提出的^[39]。由于环境流量的研究涉及较广,目前还没有一个统一的定义,国内外对环境流量的定义和计算方法也不尽相同。Dyson M 和 Bergkamp G 等^[40,41]在总结了国内外学者的大量研究的基础上提出:环境流量是河流在用水矛盾的情况下为维持不同用水部门及生态系统之间利益的平衡,保证河流生态系统健康发展,河流生态功能得以恢复的一种水文情势过程。美国认为环境流量是指用于满足鱼类、野生生物、娱乐、运动、休闲旅游及具有美学价值的形式的水资源需求^[42]。国内则认为环境流量是指维持水质、水量、生态稳定及环境优化的水资源需求。

环境流量计算方法主要分为两个阶段:一是用于流域规划、调查阶段,该阶段简单、方便的水文学法运用较多;二是用于流域综合评定阶段,该阶段生境模拟法以及整体分析法应用较为广泛^[43]。

至今为止,世界上的环境流量计算方法约有 207 种,涉及 44 个不同国家^[44]。国外研究大致分为 4 类:生态水文学法、水力学法、生境模拟法以及整体分析法。生态水文学法包括蒙大拿法(又称 Tennant 法)、7Q10 法、Texas 法、RVA 法等;水力学法包括水力湿周法、R2CROSS 法、CASMIR 法等;生境模拟法包括物理栖息地模拟法、IFM 法、RCHARC 法、PHABSM 法、Basque 法等;整体分析法包括南非的 BBM (Building Block Methodology) 法和澳大利亚的整体评价法(Holistic Approach)等^[45]。国内研究大致分为 5 类,即河流基流计算法、栖息地生态平衡法、水质保证法、蒸发和渗漏消耗保证法、景观基流维持法等,其中河流基流计算法应用最为广泛,包括逐月频率法、逐月最小生态径流法、最小月平均流量法等^[46]。

1.2.3 筑坝河流生态水文效应

在生态水文研究领域,人类作为自然的载体,一方面利用着自然,另一方面却在破坏着自然环境。人类对河流的改造引起的流域内生态系统的变化正是该研究的一项主要内容。20 世纪 50 年代以来,人类在关于水利、农业、畜牧、林业生产、矿产开发、城市发展、旅游等的土地利用活动中,对河流生态系统的不良影响趋于严重,有的甚至破坏了河流自身的结构和功能,更有不少影响大大超出了河流自身的调控能力。人类活动对河流的改造,可以称得上是多目标、全方位、大规模、高频次的了。我国作为一个农业大国,大

面积的农业活动不可避免的要对生态环境造成一系列破坏,例如水环境恶化、洪涝灾害频繁、生物物种灭绝等严重情况。这些危害最终将造成严重的生态问题和社会问题,因此对自然功能的开发和利用必须是合理的、科学的、有限度的,最关键的是不能影响河流的生态安全,因此必须对河流的自然功能予以保护。

美国有研究表明^[47],当防渗层的比例达到10%时,则可能引起河流的生态环境恶化,且恶化程度会依据防渗层面积的加大而加重。在城市地区,洪涝灾害的重现频率加大,而且每次的洪水总量也会逐步增多。王东胜等^[48]认为农业活动也造成了河流的生态系统破坏,农业的耕种选址往往考虑在河流阶地和河岸带上,从而对天然植被造成了直接破坏,影响了河流的河岸带生态子系统的结构和功能。这样不可避免地导致了水土流失,水体污染加剧,河岸侵蚀严重,破坏河流生物栖息地等不利现象发生。

本书研究的主要内容是重大水利工程对河流生态系统的影响,下面主要阐述的是水利工程对其的影响。

1.2.3.1 国外研究进展

早在20世纪初的30年,美国陆军在哥伦比亚河下游建造了8座梯级水电站,以此来保持鱼类洄游通道畅通^[49]。20世纪40年代,正是由于人们对水资源的开发利用程度加大和水利工程建设的增多,美国资源管理部开始将鱼类产卵场萎缩的现象作为关注的重点和焦点。美国鱼类和野生动物保护协会做了许多关于河流生态要素变化对鱼类产卵、繁殖等相互联系的研究,着重声明了河道流量作为生态环境要素的重要性^[50]。

Poff等^[51]提出流量的改变对河流流态的日益影响是下游生态环境逐步恶化的根本原因,同时还认为湿地、沼泽、河流、河岸生态系统的结构、组成和功能在很大程度上是依赖于生态水文特性的。随后,大量有关于水利工程建设前后生态水文要素变化的分析和研究开始逐步展开。Ward进一步定义了河流生态系统的结构,他指出河流生态系统的结构是四维的,分别是纵向、横向、垂向和沿时间变化的尺度,同时还指出河流生态系统是开放的、动态的系统^[19]。

20世纪70年代后,加拿大特别重视调水工程对天然生态环境影响的研究、评价和预测。澳大利亚、南非、法国等国家也相继开展了关于河道径流改变对鱼类产卵、生长、产量影响的研究,并提出河流生态流量的概念,也产生了许多计算和评价方法。同时,创立了流速、流量和其他水生生物之间的关系,比如鲑鱼^[52]。1978年美国大坝委员会环境影响分会出版的《大坝的环境效应》(Environmental Effects of Large Dams),归纳了20世纪40—70年代之间大坝对生态环境改变的研究成果,其中不仅包括大坝对水体物理化学性质、水生生物个体、种群结构和数量、河道形态的变化,还包括大坝的经济和社会效益的影响^[53]。

Poff等^[54]提出大坝建设造成的河道水流情势改变是影响河流生态系统可持续发展的重要原因也是根本原因,执此基础之上,在4个方面对改变的河道水流情势如何对水生生物多样性的影响进行分析和研究,主要包括生物栖息地的改变、生物繁殖和生长的影响、河流生态系统结构的纵向和横向连续性的破坏、外来生物入侵。

Petts^[55]和Berkam P. G.^[56]系统的将水利工程对河流生态系统的影响归结为3个等级结构:第一等级是大坝蓄水后能量流动、河流水文、水量、水力、水质和物质对河流下游



河道的变化；第二等级是河道结构的影响，如河道形态、河道底质构成和河流生态系统在水生生群落结构、栖息地形态方面的结构和功能；第三等级是综合体现了第一和第二等级影响对生物种群引起的变化，主要包括了无脊椎动物、鱼类、鸟类、哺乳动物。它直接取决于河流生态环境的健康程度。

自 20 世纪 90 年代，随着全球生态环境问题的日益严重，水资源与生态环境相关的研究已然成为全球关注的热点，明确提出生态需水的概念。随着我国遥感技术（RS）、地理信息系统（GIS）、专家系统（ES）和计算机技术的飞速发展，这些技术被更多地运用到水利工程的生态效应研究上，并成为了该方面研究的发展趋势。

可见，国外在筑坝对河流生态效应的影响研究中，主要集中于大坝的建设对下游河流的水文情势、景观、生态效应和对水生生物物种多样性的影响研究，以及为维护水生生态系统的完整性制定的可持续生态流保护与生态系统恢复的方案，但研究的热点大多集中在大坝对河流水文情势的影响分析，这充分说明了河流水流效应对河流生态系统的决定性地位，也恰恰指向了本研究的主要内容。

1.2.3.2 国内研究进展

我国关于大坝对河流生态水文效应的研究展开的比较晚，前期的理论与技术都不是很成熟，但通过多年的前期预测和后期调查的实践经验，已逐步明确了水利工程建设可能对流域生态系统造成巨大的影响，并建立了多种影响预测模型进行分析研究。如今我国对河流生态水文影响方向的研究是以对生态造成的影响为研究根基的，一般是以人类活动对流域引起的生态变化为表现形式，但由于大坝的建设是人类活动对河流的影响最显著也最严重的，所以多数研究还是以大坝为研究重点，多以大坝的蓄水运行后对下游河流的水生生物的群落结构、物种多样性、种群丰度等在不同时空尺度上的生态效应变化为表现形式。

早期的大坝建设技术虽然不是很成熟，但我国早在 20 世纪 50 年代起就对大坝工程引起的河流生态环境改变相当重视。三峡水利枢纽在建设之前，就开始对该工程项目进行可行性研究评价，包括相关的地理、土壤、地质、水文、水生生物、鱼类资源、湖区环境等，积聚了大量的基础资料^[57]。由于大坝的影响是在长期、缓慢的运行之后才会显现出来的，且其影响是潜在又极其复杂的，因此要注重大坝建成后对河流生态系统的影响，并通过建坝后与建坝前的水温变化、沙量变化以及河流径流过程的变化，揭示它们之间的内在关系，并找出其中的决定性因素，加以控制和运用才能为人类所用，达到调控河流到近似天然河流的目的。

余志堂等^[58]指出，丹江口水利工程运行后，引起下游河道水体温度下降，使得新生鱼群发育不良，同时致使鱼类产卵的时间推迟约半个月。1999 年，常剑波^[59]在对葛洲坝水利工程的研究中指出，水库蓄水运行后，中华鲟的洄游通道被阻断，尽管现在能够在坝下江段自然繁殖，但现存产卵场的面积还不足历史产卵场的 3%，且适宜的产卵条件已不尽相同，中华鲟尾数已明显下降。2001 年，张春光等^[60]对水利工程引起长江胭脂鱼种群变化进行了分析和研究，指出三峡-葛洲坝梯级水库对胭脂鱼的洄游路径造成了阻隔，严重影响其繁殖和生长，导致长江上游胭脂鱼资源量的急速下降。2004 年，孙宗凤等^[61]从正面影响和负面影响分别研究了大坝工程对河流生态环境的改变，创建了层次结构和生态效应分析模型，运用模糊数学法针对大坝工程引起的生态环境改变进行了全面且深入的



研究。

2005年,毛战坡等^[62]综述了大坝建设对河流的生态效应,从5个方面具体分析了大坝的建设对对流生态系统的影响,分别为:河流生态水文要素、河流生态系统结构和功能以及河流生态系统的修复措施。2006年,姚维科等^[63]对国内外的大坝生态效应进行了概述,并提出了大坝生态效应链和生态效应网的概念,最后总结了大坝生态效应的研究热点并作以展望。2007年,马颖^[64]从生态水文学角度,分析了长江干流上的几座大型水利枢纽工程对所控江段生态水文条件的影响程度。

2009年,郭文献等^[65]对三峡梯级水库进行了河流生态水文情势分析,采用了Mann-Kendall非参数秩次相关检验法(简称M-K法)、复Morlet小波分析法变化范围法等,对三峡-葛洲坝梯级水库运行后坝下河流生态水文条件的影响进行综合且深入的分析 and 研究。认为葛洲坝的蓄水活动下游河流的水文情势的影响巨大,对长江中下游河流生态环境维护和水生生物的生存构成了长远威胁。

2011年,陈栋为等^[66]应用RVA法分析了水利工程的不同开发等级对河流生态水文情势的影响,以东江流域三大水库的控制河流为研究对象,根据东江水利开发的利用程度变化划分为4个研究阶段,对其水文情势变化进行了详细的分析和评价。

2012年,张鑫等^[67]采用IHA法对伊河陆浑水库的河流水文情势影响进行了分析和评价,结果说明了陆浑水库对伊河天然径流过程的改变不大,而放水较少是造成高低流量脉冲平均历时变化的主要原因。

2013年,巩琳琳等^[68]以刘家峡水库为例研究了水库调度对水文情势的定量影响,以及其累积效果和影响程度。基于下游与生态有关的水文情势对水库不同运行方式的响应关系,采用水文变异法,建立防洪模拟模型、发电模拟模型、供水模拟模型进行模拟研究分析,最后提出水库调蓄洪水的行径是下游河流水文条件改变的重要原因。

综观我国学者在水利枢纽工程的生态影响研究,多为水利工程对河流水文情势的影响,缺乏对河流生态效应、水生生物种群资源、生物多样性、河流生态系统结构和功能以及河流生态系统具体修复措施的研究。水利工程建设与运行过程中需要结合重点生态保护因素,以确保连续性和稳定性的生态过程,但本阶段,相关的研究少之又少。因此还有很多方面需要进一步深入研究。

1.2.4 筑坝河流鱼类生态保护实践

水利工程对鱼类的负面影响已逐渐引起了各界科学家和各国政府的重视,国内外的研究和实践表明,可以通过工程措施、非工程措施等在一定程度上减缓或减免梯级开发对鱼类的不利影响^[69]。

河流梯级开发下的鱼类保护是一项多部门、多效益的系统工程,涉及水利、水电、环保、渔业等众多部门,国外河流从先破坏后治理逐渐走向开发与保护并重,实现从河流开发规划到鱼类保护措施制定-实施-监测-评价-调整为一体的保护模式。欧洲、北美等国家的河流梯级开发利用较早,在20世纪60年代的高峰期后放慢了开发速度,基本上完成了水利水电工程建设阶段,逐步进入优化运行管理和生态修复阶段,注重开发与生态保护并举。为了减缓梯级开发对鱼类产生的不利影响,美国大多数河流在梯级开发规划阶段进行



环境影响评价,将对鱼类的影响作为选择方案的一个因素,并提出相应的鱼类保护措施,欧洲的鱼道建设也有300年的历史,积累了丰富的关于鱼类保护的理论与实践经验。

国外河流的保护对象多为河海洄游型鱼类,梯级开发过程中采用低水头、径流式水电站会降低对鱼类的影响,效果显著的措施主要包括改善栖息地、综合过鱼设施、增殖放流、生态补偿、掠食者管理、替代生境、改进大坝运行方式和加强监测控制等。在1988年确立的《濒危物种保护法》的指导下,美国国家海洋渔业局、美国鱼类和野生生物保护局对哥伦比亚河鱼类的生态需求、梯级开发带来的负面影响和已有措施进行了深入的分析与评价,逐渐完善调整形成哥伦比亚河鲑鱼计划,旨在保护哥伦比亚河干流及其支流斯内克河下游的8个梯级461km范围内的鲑鱼、鲟鱼、美洲西鲱、胡瓜鱼、七鳃鳗等5种洄游性鱼类,梯级各设鱼道两座共16座以便维持鲑鱼、虹鳟等鱼类的洄游通道,其他类型鱼类也可以通过,7座设有幼鱼旁路系统,通过SIMPAS模拟过鱼通道模型分配不同过鱼路径过鱼率。20世纪30年代莱茵河有52个鱼种,至60年代末只剩29种。1986年,保护莱茵河国际委员会(ICPR)在整个流域14个梯级范围内制定了“莱茵河行动计划”,旨在防止该河流生态系统的进一步恶化,解决水质问题,恢复河流可持续发展,并采取拆除不合理的航行、灌溉和防洪工程、拆除水泥护坡、以草木绿化河岸、对部分裁弯取直的人工河段重新恢复自然河道等措施。其中有关鱼类保护的部分是在《鲑鱼行动纲领》指导下实施的“鲑鱼2000计划”,目的是使较高级的物种鲑鱼、鳟鱼等能够重返原来的栖息地,于2000年在《欧盟水框架指令》的指导下拓展为“鲑鱼2020计划”,旨在使野生鲑鱼回归。建有90多座大型水库、拥有8个国际重要湿地的澳大利亚东南部墨累-达令流域在过去的100年里,35%的短期湿地已经消失,许多鸟类、鱼类、两栖类、昆虫和植物的数量急剧减少。为了恢复严重退化的本土鱼类种群数量,墨累-达令流域于2001年制定为期50年的“土著鱼类战略”,形成一整套包含该流域所有鱼类在内并横跨6个不同管理辖区的协调方案,其中最著名的是“从海洋到休姆大坝”的鱼道计划。

20世纪80年代以后,我国也在梯级开发下的鱼类保护方面开展了大量研究与实践,比如在红水河岩滩水电站设立鱼类增殖站,在狮泉河水电站设立导墙式鱼道,在广西长洲水利枢纽设立隔板式鱼道,在彭水水电站利用船闸及集运渔船方式过鱼等,但在流域范围内的保护方案较少^[70]。长江流域上的葛洲坝工程也采取了相应的鱼类保护措施,如实施禁捕制度、人工增殖放流、建立自然保护区和开展资源监测与科学研究等,但长江干流目前未建有鱼道。

1.3 研究内容

(1) 筑坝河流生态水文效应理论框架体系研究。在分析河流生态系统结构和功能的基础上,探讨河流生态水文生态流量的定义、计算方法等其他相关概念,并分析水利工程对河流生态水文非生物要素和生物要素的影响。

(2) 长江上游水文情势变化及生态影响。选取长江干流主要水文站屏山站、寸滩站、宜昌站的水文资料,运用IHA/RVA法对研究江段的天然水流情势特征进行分析,运用小波分析法对研究江段的流量、输沙率等生态要素进行趋势性、周期性和突变性分析,结



合水沙情势变化特征与鱼类的生态需求，从水沙角度定性分析对鱼类的影响。

(3) 长江中下游水文情势变化及其生态影响。对宜昌站多年历史监测资料进行整理和统计，分析三峡、葛洲坝水利枢纽工程对长江中下游江段的流量、水温、含沙量的影响；统计分析中华鲟和四大家鱼产卵繁殖情况，分析长江中下游水文情势变化对鱼类繁殖影响程度。

(4) 长江干流河道生态流量综合评估。分别利用逐月频率法和 IHA/RVA 法计算研究江段的河道内环境流量，作为水库生态调度的目标，为建立鱼类保护措施提供参考。

(5) 水电梯级开发影响下鱼类生态保护措施。分别从工程措施、非工程措施和管理措施三个方面进行评述，提出水电梯级开发影响下长江鱼类生态保护措施。