

水电开发 对长江水文生态影响研究

郭文献 著

海外版



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水电开发 对长江水文生态影响研究

郭文献 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书分析了梯级水电工程对长江干流生态水文情势的影响,结合生态保护目标及关键期与环境水流参数的关系,生成推荐的环境水流过程,并分析了长江中上游水电开发对河流鱼类的影响及其保护对策。主要内容包括:研究区域概况及河流生态环境状况、长江干流生态水文情势分析、长江干流河道内生态环境流量评估、长江中游四大家鱼产卵场生境状况、三峡工程蓄水对四大家鱼产卵场生境状况的影响、四大家鱼产卵场生境适宜性评价及保护措施等。

本书可供从事水资源规划管理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

水电开发对长江水文生态影响研究 / 郭文献著. —
北京:中国水利水电出版社, 2018.9
ISBN 978-7-5170-6990-4

I. ①水… II. ①郭… III. ①水利水电工程—影响—
长江流域—水文—生态系—研究 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第225159号

书 名	水电开发对长江水文生态影响研究 SHUIDIAN KAIFA DUI CHANGJIANG SHUIWEN SHENGTAI YINGXIANG YANJIU
作 者	郭文献 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	北京虎彩文化传播有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.75印张 279千字
版 次	2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	80.00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

梯级水库的修建对全球水环境系统产生了巨大的影响，尤其是改变了河流的自然特征及水文情势，引起河流生态系统整体退化，生物物种面临衰退、濒危和绝迹的危险。本书分析了梯级水电工程对长江干流生态水文情势的影响，结合生态保护目标及关键期与环境水流参数的关系，生成推荐的环境水流过程，并提出重要鱼类保护修复措施。

本书在编写过程中得到了众多人士的帮助和支持。华北水利水电大学硕士研究生张爱民、郭科、查胡飞、李越、李萌萌参与了本书部分内容的编写工作，编写过程中参考和引用了大量国内外专家和学者的研究成果，在此向他们表示感谢！

本书研究工作得到了国家自然科学基金“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）”的联合资助。

由于作者水平所限，书中难免存在疏漏和不当之处，恳请各位读者批评指正。

作者

2018年7月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 水电梯级开发累积生态水文效应	2
1.2.2 河道内环境流量评价	4
1.2.3 河流生态修复	5
1.3 主要研究内容	7
第2章 水电梯级开发累积生态效应理论框架体系	9
2.1 河流生态系统	9
2.1.1 河流生态系统概念与理论	9
2.1.2 河流生态系统与水文联系	10
2.2 河道生态环境流量理论	10
2.2.1 河流环境流量定义	10
2.2.2 河流环境水流特征	10
2.3 水电梯级开发累积生态效应理论框架	11
2.3.1 水电梯级开发累积生态效应涵义	11
2.3.2 梯级水电工程累积影响形成机理的理论框架	12
2.3.3 梯级与单项水电工程生态环境影响对比分析	14
2.3.4 水电梯级开发非生物与生物累积效应分析	14
2.4 小结	17
第3章 研究区域概况及河流生态环境状况	18
3.1 研究区自然概况	18
3.1.1 水文气象	18
3.1.2 自然资源	18
3.2 长江流域水电开发状况	19
3.2.1 长江已建电站开发状况	19

3.2.2	长江拟建电站规划状况	19
3.3	河流生态环境状况	22
3.3.1	河流水生态状况	22
3.3.2	人类活动行为	24
第4章	长江干流生态水文情势分析	25
4.1	资料来源	25
4.2	研究方法	25
4.2.1	Mann-Kendall 检验法	25
4.2.2	累积距平法	27
4.2.3	滑动 T 检验法	27
4.2.4	水文指标法与变动范围法	27
4.2.5	生物多样性影响评价	28
4.3	长江干流年均流量变化特征	29
4.3.1	年均流量趋势性检验	29
4.3.2	年均流量突变性检验	30
4.4	长江上游河流生态水文指标分析	31
4.4.1	月中值流量变化	33
4.4.2	年极值流量大小	34
4.4.3	年极端流量发生时间	35
4.4.4	高低脉冲流量的频率及历时	36
4.4.5	流量变化改变率及频率	37
4.5	长江中下游河流生态水文指标分析	39
4.5.1	月中值流量变化	41
4.5.2	年极值流量大小	42
4.5.3	年极端流量发生时间	42
4.5.4	高低脉冲流量的频率及历时	45
4.5.5	流量变化改变率及频率	46
4.6	长江干流整体水文改变度分析	47
4.7	生物多样性评价	49
4.8	小结	52
第5章	长江干流河道内生态环境流量评估	53
5.1	长江干流环境流量指标变化分析	53
5.1.1	环境流量指标概述	53
5.1.2	环境水流组成的判别	53
5.1.3	环境水流指标计算与分析	55
5.2	长江干流环境水流推荐指标评估	68
5.2.1	河道生态环境水流管理方法	68

5.2.2	河道环境水流推荐指标计算与分析	70
5.2.3	河道环境水流合理性验证	81
5.3	小结	84
第6章	长江中游四大家鱼产卵场生境状况	85
6.1	长江中游四大家鱼概况	85
6.1.1	四大家鱼基本习性	85
6.1.2	四大家鱼资源状况	87
6.2	四大家鱼产卵繁殖状况变化分析	94
6.2.1	产卵场数量变化情况	94
6.2.2	产卵规模变化情况	95
6.2.3	产卵鱼苗成色变化情况	97
6.2.4	产卵繁殖时间情况	97
6.3	四大家鱼产卵繁殖生境因子分析	99
6.3.1	四大家鱼产卵繁殖水文条件	100
6.3.2	四大家鱼产卵繁殖水环境条件	116
6.3.3	四大家鱼产卵繁殖地形地貌条件	121
6.4	四大家鱼产卵繁殖关键生境因子确定	124
6.4.1	生境因子构成	124
6.4.2	主成分分析方法	125
6.4.3	关键影响因子确定	126
6.5	小结	128
第7章	三峡工程蓄水对四大家鱼产卵场生境状况的影响	129
7.1	数据收集和分析方法	129
7.1.1	数据收集与处理	129
7.1.2	研究方法	129
7.2	长江中游宜昌站水文情势变化	133
7.2.1	宜昌站水文趋势性分析	133
7.2.2	宜昌站水文突变分析	146
7.2.3	三峡工程蓄水后宜昌站水文情势改变程度分析	148
7.3	三峡水库蓄水对四大家鱼产卵繁殖影响分析	158
7.3.1	四大家鱼产卵季节宜昌站生态水文要素变化分析	158
7.3.2	三峡水库蓄水后四大家鱼产卵繁殖情况分析	160
7.4	小结	163
第8章	长江中游四大家鱼产卵场生境适宜性评价及保护措施	165
8.1	基于 Mikell 的长江中下游一维水动力学模型研究	165
8.1.1	Mikell 水动力模拟理论基础	165
8.1.2	模型关键参数	165

8.1.3	模型的率定和验证	167
8.2	四大家鱼产卵场物理生境模拟研究	167
8.2.1	四大家鱼产卵场江段	167
8.2.2	四大家鱼产卵场生境适宜性评价标准	168
8.2.3	三峡工程蓄水前后四大家鱼产卵场物理生境模拟分析	168
8.3	鱼类保护措施	170
8.3.1	过鱼设施建设	170
8.3.2	鱼类生境恢复	170
8.3.3	人工增殖放流	170
8.3.4	生态调度措施	171
8.3.5	渔业保护措施加强	171
8.4	小结	172
第9章	结论与展望	173
9.1	结论	173
9.2	展望	174
	参考文献	176

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

自古以来，河流成为人类繁衍生息的重要场所，对社会的发展、人类文明的进步起着至关重要的作用，如大坝及水库的建设为人类提供发电、供水等服务。由于国民经济的快速发展对电力产业的需求及能源需求急剧增加，水资源的供求矛盾被进一步激化，水库工程储存水源供水成为有效缓解水资源供需矛盾加剧的主要措施。我国是水资源稀缺的国家，虽然总体水量在世界排名靠前，但因为人口众多，人均水量却很少。近几十年来，为了满足经济社会发展对防洪、灌溉、发电、工业和城镇供水、航运等方面的需求，人类开始大规模在河流上修建水电工程开发流域水资源，对河流水能资源进行开发和利用，但梯级水电工程利用水资源对全球水环境系统产生很大的影响，改变了河流的自然特征。其国民经济对电力产业的迫切需求及电力产业的持续快速发展，也是促使流域水电开发公司对整个江河梯级电站水电开发的动力之一，同时也是造成江河诸多生态问题的重要原因之一。其中长江流域出现的重大问题和事件较为突出，长江三峡工程在 2007 年成功蓄水；长江上游水电开发进入高峰期，向家坝、溪洛渡、锦屏等一大批水电站相继建成。2008 年年底，在国际金融危机的大背景下，国家做出投资 4 万亿元拉动内需的重大决策，加强水利基础设施建设是主要措施之一。但与此同时，长江水污染等传统问题仍未得到根本改善，气候变暖与极端气候事件频发带来的负面影响加大，国家应对极端事件的能力需要进一步加强。2013 年，世界自然基金会联合农业部长江流域渔业资源管理委员会组织考察并发布《2013 长江上游联合科考报告》中陈述大规模的水电梯级工程建设在金沙江流域，可能会对金沙江河段的鱼类乃至长江珍稀物种产生重大影响。因此，在梯级水电开发态势下，对长江生态环境如何进行更好的保护成为了当前重要研究课题。

1.1.2 研究意义

长江流域梯级水电工程群的建设虽完成了供水、发电等任务，实现了社会经济价值的增长，却改变了河流的天然特征，导致流域生态环境诸多问题日益严峻。近年来长江上游进行大规模的水电梯级开发，势必会加剧流域生态环境恶化趋势，这种影响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，对河流生态环境会产生累积影响，进而导致河流生物群落分布发生改变，水生栖息地生境碎片化，甚至引起河流生态系统整体退化，生物物种面临衰退、濒危和绝迹的危险。已有相关研究成果表明，近百年来，水电工程建设是造成全球鱼类濒危的主要原因。

因。水资源管理者通过水电开发将可变的自然流量转化为受人类需求控制排放的水量，促进了人类对河流的利用和控制。同时我国城镇化快速推进，人口增长，人均耗水量的需求也在增加，人类对河流的影响，特别是在发展中国家和地区，预计在未来几十年内将愈加强烈。河流筑坝、天然水流、泥沙输移方式以及水温的改变被广泛认为是全球淡水生物多样性下降的主要原因，水电开发也导致许多河口和沿海地区的商业渔业流失以及全球其他自然生态系统产品和服务的退化。

因此需要更多的科研人员积极探寻多级水电开发如何影响河流生态环境。如何科学合理地确定人类从河流中获取的水量，保留河道中适宜河流生态系统正常运转的水量，寻求满足人类开发利用和生态系统功能需求的水分配平衡以及修复河流生态系统的自然水文过程，成为亟待解决的关键科学问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水电梯级开发累积生态水文效应

国外对水电开发引起的河流生态效应的研究始于20世纪30年代，美国陆军工程兵团通过对哥伦比亚已建的梯级水电站通过修建鱼梯、增殖放流及模拟人工生境等工程措施维持鱼类正常的洄游行为。^[1-2]20世纪40年代，水坝工程引起鱼类资源的大幅减少，美国开始将河川径流作为生态因子^[3]，20世纪50年代，对于大坝建设引起的生态问题的研究开始大量涌现。从20世纪60年代开始，诸多国家如美国、加拿大等国开始出现流域环境影响评价研究，累积效应或累积影响的概念开始出现在环境评价领域。进入70年代后，关于水质、鱼类、藻类等与水利工程相关的研究开始增多。在其发展过程中，大量关于梯级水库群叠加影响评价的研究开始出现，但仍然只是停留在概念及内涵层面，涉及累积效应机理和修复方法的研究较少。因此，对于解决生态问题不再仅仅是满足单一物种的生态需求，而是从满足整个生态系统出发，并通过多种生态因素进行调控。20世纪80年代，发达国家在保障防洪、航运等任务基础上，将天然水文过程作为主要目标，改变工程运行方式，修复受损河流。如Junk在这一时期提出了洪水脉冲理论。^[4]当今由于大坝、水库等水利工程引发的河流生态系统退化已被公认为是全球性的生态问题。这种日益严重的人为干扰行为，将原始河流生境分割成具有明显区域化特征的破碎的小生境，阻断了水生生物实现自由迁移的通道，改变了鱼类的栖息地环境，影响了鱼类生殖等生活习性，尤其对洄游鱼类影响最为显著。1997年Richter^[5]等建立了一套基于月流量值、水文极值大小和历时、脉冲流量的频率及历时、水流条件变化率等33个指标，分析建坝后水文条件的改变。Poff^[6]等重点分析了美国186条河流建坝前后的水文变化，河流水文情势建坝前为16类，建坝后均质化为7类。研究显示河流无机环境趋同现象明显，鱼类栖息地环境也呈现同一化趋势，认为大坝主要通过改变河流水温条件、水流形态、泥沙通量以及营养物质运输环境等影响河流。William E. Rees^[7]认为，由于生态环境与经济之间的物质和能量交换随着经济活动的盲目扩张不可逆地破坏了全球生命供给及生态稳定，永久地改变了人类与生物圈之间的关系，累积评估已经无法满足评估区域发展的累积效应，应该上升到全球视角，



采用关键自然资本的净损失和零增长作为发展目标。Reid^[8]等通过对流域累积影响研究发现,由于水体的连续性及流动特征会导致累积影响触发地和产生累积影响发生地不同源。Sarah E. Gergel^[9]等针对池塘和湿地的水文周期形成后的洪泛平原洪水事件,提出中立地带模式,研究堤坝和水坝对其产生的累积效应,研究表明水坝和堤防的协同作用对大洪水影响显著。现阶段国外已经从梯级累积水库的累积概念性研究逐步过渡到累积影响形成机制研究,并且从战略及可持续发展层面规划综合缓解措施。近年来,随着我国水电梯级开发规模的扩大,开发进程随着社会经济与人类需求的发展而加快,梯级水电开发的进行对生态环境产生了诸多影响,国内相关科研人员及学者对梯级水电开发导致的环境影响的研究也应运而生。尽管我国开展水电梯级开发对河流生态水文效应的研究比较晚,随着我国对水电开发的生态水文影响研究的深入,也取得了一定的成果。钟华平等^[10]以长江干流13个梯级水电站为研究对象,总结了水电梯级开发对泥沙、鱼类、水流及水质产生的累积影响。冯瑞萍等^[11]以长江干流关键点为研究对象,通过IHA法计算水文参数,从各控制站点的水文变化角度评估了长江流量的变化和生态环境影响。王俊娜等^[12]以三峡-葛洲坝梯级水库作为研究对象,采用水文变化指标法和变化范围法,评估梯级水库正常运行对生态水文因子的改变程度及其生态环境影响,分析认为梯级水库的运行改变了河流水流组成模式,对5月、10月的水流影响较大。白桦等^[13]以嘉陵江流域为研究对象,利用经验正交函数和时间序列分析法分析年降水量和径流量的演变规律,分析认为人类活动使流域出口断面径流量减少,影响降雨径流的趋势性、突变性及周期性,自然条件、水利水保措施造成降雨径流主周期的显著差异。张洪波等^[14]以渭河流域的21个水文站点为研究区域,以生态水文联系为分区因子,通过水文改变指数法及变异范围法评估不同时间段的水文改变程度,并通过层次聚类法及主成分分析法对渭河流域进行生态水文分区,反映不同区域内其生态水文联系综合变异情势及生态水文联系变异的分布特征。赵伟华等^[15]通过流量过程变异程度、高流量频率等8个指标构建物理完整性评价指标,并分析蓄水前后长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区关键河段的物理完整性,揭示了向家坝蓄水对保护区水文情势如流量脉冲频率及持续时间、水深及流速多样性、底质中值粒径等具有一定影响。王波^[16]等通过对生态流量关键组过程和水温角度,分析梯级水电工程产生的累积效应。邹振华^[17]等通过对年、汛期、非汛期、月径流量变化特性进行分析,认为水库对下游水流的影响不仅与水库库容、调度方式有关,水库与观测站之间的河段长度大小同样是影响径流的关键因素之一。彭涛^[18]等以东江干流3个关键水文站为研究对象,以月径流为时间尺度,基于样本熵方法研究长江干流径流序列的复杂度的空间分布及其变化特征,研究表明东江水流复杂度由上游到下游呈递增趋势。佟春生^[19]等通过近似熵分析黄河干流径流序列复杂性,研究表明同一水文站实测径流的复杂性高于天然径流的复杂性,人类活动加剧了径流序列的复杂性,其影响随着年代的变化呈增长趋势,使预测径流难度增大。王远坤^[20]等通过样本熵算法分析长江中下游水文站的径流序列的复杂度,研究表明样本熵值与年径流量呈负相关关系,宜昌、大通站复杂性呈不断增加趋势。陈俊贤^[21]等通过构建河流生态系统健康评价指标体系,评价典型区水库梯级开发的生态系统健康程度及生态水文过程,研究结果表明,在水库梯级开发下,径流年内分配区域均匀化,河流下游悬浮质泥沙量减小,鱼类资源呈下降趋势。严栋飞^[22]等通过累积距平法对汉江径流



变化趋势进行分析,结果表明汉江上游径流量总体呈减少趋势,各站年径流量的变化趋势相似,年代平均径流量存在高低交替的现象。王随继^[23]等通过使用累积量斜率变化率的方法分析皇甫流域的径流量和降水量的变化趋势,揭示了皇甫流域的径流量变化趋势及主要影响因素贡献率。黄薇^[24]等通过对梯级水电建设前后的径流变化分析,认为梯级水电工程对水温和水流过程具有均化作用。李帅^[25]通过对天全河流域的年径流量进行分析,认为梯级水库的建设,会导致水面面积增加,同时导致库区渗漏以及对径流的频繁调度,增加了沿程损失导致年径流量减小,梯级开发程度的提高,梯级水库调度作用对径流的累积影响不断增大。陈庆伟^[26]等提出用累积影响系数评估工程建设产生的累积影响。范继辉^[27]等揭示梯级水电站运行导致河流在枯水期断流问题,多个河段完全脱水一致珍稀特有鱼类灭绝。

国内研究内容多为水利工程对河流水文情势的影响,包括水利工程对河流径流、泥沙、水质、水温等要素的影响,缺乏对河流水生生物物种生命周期和生物多样性等方面深入研究。关于径流累积影响研究主要偏向于两个方面,一是对径流年际、年内等水文特征分析其梯级水库产生的累积效应;二是从径流本身的流量组成部分(流量模式)角度分析其梯级水库产生的累积效应。近年来越来越多的学者意识到河道内不同等级的流量模式对于河流生态系统的重要性,对河流水流模式产生的累积影响将成为评价河流生态系统累积影响的主要手段。但是对于相关累积径流的研究的时间节点划分大多是以水库建设蓄水前后或调度模拟前后为准,采用的资料是用降雨资料模拟来水或是建库后的出库流量,采用实测资料研究较少,忽略了从水电建设开始到建成投产使用对环境都会产生影响。并且随着水电梯级开发程度的加深,对河流生态系统会产生累积效应,尤其是对水流的直接累积影响,同时对生态环境会产生累积效应。对径流的复杂度分析却没有列入评价生态水文累积效应的评价指标之中。由于梯级水电开发对径流有着直接的影响,长江流域建设的梯级水电工程群不是同步的,是一个随时间增长的过程,因此分析径流的复杂性应该成为水流累积生态效应必不可少的一部分。对于如何识别径流序列的累积突变阈值成为待解决的关键问题,本书从如何识别累积突变阈值切入,从不同空间尺度的径流趋势性、突变性以及生物多样性角度对径流累积生态效应进行分析,划分累积效应不明显时间径流序列和累积效应显著或相对显著时间径流序列资料。

1.2.2 河道内环境流量评价

国外对河道环境流量的研究最早源于20世纪40年代,初始发展缓慢,后来由于法律法规的颁布以及社会发展需要,在20世纪70年代,河流生态需水算法开始大量涌现。20世纪80年代,Vannote等^[28]在1980年提出基于完整流域系统的河流连续体概念(River Continuum Concept, RCC),强调了河流纵向的空间连续,未考虑横向和纵向的变化。Junk^[29]在1989年提出洪水脉冲概念(Flood Pulse Concept, FPC),强调脉冲洪水对河道及与河道垂向和横向范围内的洪泛平原生态系统的影响。Dyson和Bergkamp等^[30-31]综合了国内外学者的大量研究成果,提出环境流量是一种基于河流在用水矛盾的情况下为维持不同用水部门需求以及河流生态系统正常运行的水文情势过程。随着概念和理论不断发展更新,计算河流生态流量的算法也层出不穷。据统计,截至2003年关于河道内生态流



量的计算方法接近 207 种, 澳大利亚、英国、新西兰和南非等国开始开展河流环境流量相关研究。^[32] 第一类为水文学法, 包括蒙大拿法等; 第二类为水力学法, 包括水力湿周法等; 第三类为生境模拟法, 包括物理栖息地模拟法等; 第四类为整体分析法, 包括南非的 BBM 法 (Building Block Methodology) 和澳大利亚的整体评价法 (Holistic Approach) 等^[33]。水文学法优势在于不需要现场测量, 方便且简单, 利用径流资料确定流量百分比作为河道水流过程线, 缺点在于该法简化了河流实际情况, 适用于粗略检验或优先度不高的河段。水力学法需要实际调查目标河流断面的相关参数, 获取数据较难, 在实际应用中有一定的局限性。生境模拟法重点考虑某一鱼类产卵时期的栖息地对河流水文条件的需求, 考虑目标单一, 不能反映其他物种的需求及河流生态系统整体状况。整体分析法虽考虑因素较全面, 但对数据要求较高, 应用难度系数最高。

国内对河流生态流量计算研究时间尚短, 但研究内容丰富, 成果丰硕。李丽娟等^[34]将河流生态需水分解为 8 个组成部分, 涵盖了河流自净、水沙、河口、景观、栖息地、植物以及地下水等。

王西琴等^[35]从河流自净能力角度定义了河流生态环境需水概念, 用流量最小值、基本功能正常、常年流动三个约束条件解释河流生态需水概念。张雪梅^[36]针对现有生态需水计算方法中存在的问题, 提出了适合不同地区城市河流这一特殊形式河流生态需水的计算模式。赵长森等^[37]以淮河上、中、下游的典型河段为研究区域, 将传统的水力半径法进行改进, 计算闸坝河段类型的生态环境流量。李亚平^[38]依据徒骇河流域的特征, 构建了徒骇河流域的分布式水文模型, 为量化未来时间段的生态环境需水指明了方向。何婷^[39]针对淮河流域中下游典型河段水生态问题, 在分析不同流量的生态学意义的基础上, 基于洪水脉冲理论计算淮河典型河段生态水流过程。巩琳琳^[40]以渭河流域为研究区域, 提出了基于生态的水资源合理配置原则和机制, 并分析了满足生态需水的途径。刘玉安^[41]构建了 SHRD 模型, 为估算流域生态需水满足度提供了全新的解决思路。商玲等^[42]通过基于物理机制水循环模拟技术构建了 HIMS 流域分布式水文模型, 利用最小流量平均估算了基本生态需水。董哲仁等^[43]针对取水河段的生态问题, 提出了生态水文限度法计算河流生态需水, 为环境流计算提供了新的解决思路。

针对国内的河流生态需水研究总体上存在两个问题: 一是缺乏水库河段的河流生态需水相关研究; 二是仅从河道单一流量大小上计算河流生态需水, 忽略了从整体上考虑适合多种生物生存条件的生态水文过程, 例如缺乏河道水流部分组成状态、历时、持续时间等与多个物种之间的关系。

1.2.3 河流生态修复

欧美发达国家在 20 世纪 60 年代就意识到河流生态环境问题, 经过半个世纪的发展, 国外大型河流的生态修复工作取得了很好的生态环境效益, 尤其在河流生态系统的河岸带、水量、水质和修复策略等方面。大型河流生态修复以莱茵河和密西西比河为典型代表。1972 年, 美国俄亥俄州环保署制定了栖息地评价指数, 认为生态系统中水质、水文等物理-化学指标不仅影响了生物种群, 也影响着栖息地环境因子, 河流生态修复从单一指标修复向多种要素同时修复转变, 因此河流生态修复的概念随着时间的推移被进一步赋



予新的含义。2004年, Bernhardt^[44]重新定义了河流生态修复的概念, 认为河流生态修复应该包括河道本身修复、河漫滩子修复和流域整体修复三个部分。在水电建设高峰期后放慢了开发速度, 在基本完成水利水电工程建设基础上, 逐步向优化运行管理和生态修复阶段过渡, 建立了实施—监测—评价—调整的保护模式, 打开生态保护与开发双赢的局面。国外采取的河流生态措施很多, 其中调整大坝运行方式、改善生物栖息地、设立综合过鱼设施、鱼类增殖放流、替代生境、掠食者管理、加强监测控制以及建立生态补偿调节机制等措施具有显著的效果。

国外的河流生态修复发展历程分为3个阶段: 20世纪50年代之前以河流水环境作为生态修复的主要内容; 20世纪50—80年代以近自然河道治理工程学作为主要研究内容; 20世纪80年代后重点探索河流生态系统恢复技术。

我国开展河流生态修复研究相对较晚, 当前正处于水电建设开发高峰期, 研究趋势由基础理论逐渐转向具体的生态修复方法和技术。河流生态修复应该包括河道本身修复、河漫滩子修复和流域整体修复三个部分。从河流本身修复角度来说, 保护大坝下游重要生物对河流本身修复极其重要, 当前重要生物以鱼类为主。陈凯麒等^[26]分析了现有的鱼类保护措施主要为增殖放流以及修建增殖放流站, 提出借鉴国外开展鱼道适应性管理理念, 建立鱼道的长效的监测、运行及保障机制。曹娜等针对梯级水电开发中鱼类保护措施的不足, 提出了从流域层面出发, 基于干流开发、支流保护的理念, 统筹考虑关于设施、增殖放流的种类、规模、栖息地的保护等综合措施。

现在的鱼类保护措施有增殖放流、修建人工鱼巢、网捕过坝, 人工模拟产卵场, 但主要措施为增殖放流, 其他措施应用相对较少, 总体上综合保护措施的内容正在逐步增加。相对以往增加了保护河流栖息地、过鱼设施等内容。水生态保护越来越成为水电工程环境保护措施的重要组成部分, 基于干流开发、支流保护的理念, 从流域水生态完整性出发, 并结合水电开发状况以及干流、支流梯级规划情况划定敏感河段、干支流天然河段、近天然河段的生态保护区域, 综合考虑生态修复措施, 如生物栖息地维护等。尤其是针对重点河段的重要生境, 提出禁止水电开发、修建过鱼设施, 禁止河道采砂及非法捕捞, 建立环境水流适应性管理, 促进河流生态恢复。保护下游重要鱼类的生物保护措施固然是河流生态修复的一部分, 同时还应加强河岸带修复及恢复洪泛区水流条件, 从整体上进行河流生态修复。

从河流生态修复理论发展角度看, 我国2000—2005年间主要研究集中在学习国外的先进理论成果。随着对河流生态修复认识的不断深入, 出现了从多个角度进行河流生态修复, 从基础理论探讨逐渐向具体的修复方法技术转变。2002年, 刘树坤^[45]在访日报告中介绍了日本河流开发与管理的理念, 并详细阐述了生态修复的方向、步骤及方法措施等。2003年, 董哲仁^[46]提出“生态水工学”的概念与基本理论框架, 为生态修复提供了新的视野。2006年, 倪晋仁^[47]等分析了河流生态系统与人类发展经历的四个阶段, 建立了河流健康指标体系, 提出了河流生态修复应该遵循的原则。倪晋仁总结了河流生态修复的主要技术包括缓冲区恢复、植被恢复、河道补水、生物-生态修复、生境修复、水生生物群落修复技术等。其中生物-生态修复技术包括人工曝气复氧、底泥污染控制、生物强化人工河道、自然河道生态塘、生态沟渠、生态修复耦合系统、生态护岸技术等, 是目前进行



河流生态修复的重要方法。2011年,陈兴茹^[48]总结了河流生态修复技术,包括水质净化技术、近自然河流治理技术、生态需水量确定技术。2012年,张饮江^[49]等针对我国原滨水带多被建成人工护岸的现象,总结了滨水岸带退化的原因及退化滨岸带植物群落生态修复技术的现状。

纵观国内外研究成果,国外针对河流生态问题开展研究较早,在理论、具体技术和方法上研究较多。我国还停留在借鉴和引入国外已有理论和技术的阶段,并且国内现阶段缺乏从流域尺度上考虑河道本身、上下游及河漫滩的整体生态修复。但初步理论及相关具体生态措施已经逐渐出现,需要时间和技术未完善河流生态系统修复工作。

1.3 主要研究内容

本书主要研究水电梯级开发对河流生态水文效应的影响。以长江干流江段为研究区域,研究对象为长江干流屏山、寸滩、宜昌、汉口、大通5个关键水文站。在研究梯级水电开发对河流生态水文影响的基础上,分析梯级水电工程对河流生物多样性的影响,通过明确保护敏感生态目标及其关键期,设置环境水流参数,构建水文过程线。针对鱼类物种资源,提出保护下游重要生物的生态修复措施。

(1) 水电梯级开发累积生态效应与调控理论框架体系。基于河流生态系统理论,探讨河道生态环境流量以及水电梯级开发累积效应的概念及理论。阐明了河流生态系统与水文的联系,概括了河流环境水流的特征和计算方法,建立了水电梯级开发累积效应理论框架,分析了水电梯级开发对生物与非生物累积影响。

(2) 长江干流生态水文情势分析。选取了长江干流控制水文站屏山站1956—2012年和寸滩站、宜昌站、汉口站1956—2014年逐日流量资料,运用Mann-Kendall法、累积距平法检验及滑动T检验法分析长江中下游河流径流变化的趋势性和突变性。应用水文指标法和变化范围法分别计算关键水文站径流突变前后5个水文指标组水文改变程度和整体改变度。综合分析了长江水电梯级开发建设对河段水文情势影响,并运用香浓指数法检验梯级水电开发对生物多样性的影响。

(3) 长江干流河道生态流量综合评估。本章描述了环境水流的判别方法及算法原理,采用非参数法统计环境水流,统计分析屏山、寸滩、宜昌、汉口、大通5个水文站的径流突变前后变化。通过IHA-EFCS计算基于相应生态物种所需的环境水流指标,识别了环境水流的生态保护目标及关键期。通过HEC-RPT软件建立环境水流参数与生态目标关系,生成推荐的环境水流过程。

(4) 考虑干流重要生物生态保护措施。本章主要针对水电梯级开发对河流产生的生态累积效应,从工程措施、非工程措施和管理措施三个方面介绍需要采取的生物-生态保护和修复措施。工程措施包括修建多种过鱼设施、采取栖息地保护措施和修建分层取水口三个层面,从改进大坝自身的不足及保护鱼类生存繁殖能力两个方面来增强水生生物的生存能力及环境适应能力。非工程措施包括人工增殖放流、实时监测与评价等,主要从鱼类资源、水域水质环境及水体水动力变化三个角度切入,一方面通过增殖鱼类资源来缓解累积影响带来的鱼类数量的下降;另一方面通过实施的监测与评价,来评价水生生物和水环境



保护措施的有效性。管理措施主要是环境水流的适应性管理，从生态调度措施、渔业立法和渔政措施三个层面探索能够遏制、削弱或消除水电梯级开发带来河流生态环境累积影响的有效解决方案，提高并改善管理方法和手段，防止河流生态系统退化，有效地管理水资源。

第2章 水电梯级开发累积生态效应 理论框架体系

2.1 河流生态系统

2.1.1 河流生态系统概念与理论

河流生态系统是一个复杂、开放、动态、非平衡和非线性系统。^[50]包括非生物河流生境与生物群落,存在着能量、物质、信息和价值的流动。物质流动是构成河流复合生态系统的基础;能量流动是主要推动力;信息流动能将无形的物质和能量显示出来,传递给水生生态系统中的生物;价值流动是指人类将水资源的利用价值转化并输送到社会经济系统中。人类活动的干扰是生态系统中的重要因素,决定着物质、能量、信息和价值流在河流生态系统与社会经济系统之间的流动状态。河流生态系统具有相对稳定性、动态平衡性及变异性,虽自身具有一定的恢复调节能力,但过度的人类干扰会导致河流生态系统退化、其自身的恢复调节能力失效甚至导致河流生态系统崩溃。

河流生态系统理论发展至今,各国研究学者提出了多种河流生态系统概念模型,其中被普遍理解接受的理论主要有河流连续体概念(River Continuum Concept, RCC)、串连非连续体概念(Serial Discontinuity Concept, SDC)、洪水脉冲概念(Flood Pulse Concept, FPC)、溪流水力学概念(Stream Hydraulics Concept, SHC)、近岸保持力概念(Inshore Retentivity Concept, IRC)、流域概念(Catchment Concepts)、河流生产力模型(Riverine Productivity Model, RPM)、(Nature Flow Paradigm, NFP)等。这些概念为河流生态系统的研究发展及河流生态修复提供了大量的基础,但这些概念模型具有其局限性,主要以天然河流为研究对象,较少考虑人类活动因素,难以从整体上反应河流生态系统。经过不断地发展,相关学者提出河流四维连续体概念,继承了河流连续体的概念。该概念反映了河流流态与生物群落的相关性,具体内容见表2.1。

表 2.1 河流四维连续体概念模型^[51-53]

河流四维连续体概念模型	作用	案例
河流生物群落结构连续性	反映生物群落与生境的适应性及相关性	河岸边植被、水生动物、两栖动物、昆虫、无脊椎动物、水禽与哺乳动物的连续性分布随水流连续性变化
物质流、能量流、信息流、物种流的连续性	反映河流上下游、水域与滩区及地表与地下生态相关的物质和能量流的空间连续性,以及传递生物的生命节律信号	河流沿纵向将营养物质由上游运输到中下游;洪水将营养物质运输到河漫滩、湿地和湖泊;鱼类离开主槽游向河漫滩、湿地,水位回落,重新回到主槽;河水与地下水相互补给时会沿竖向运输营养物质