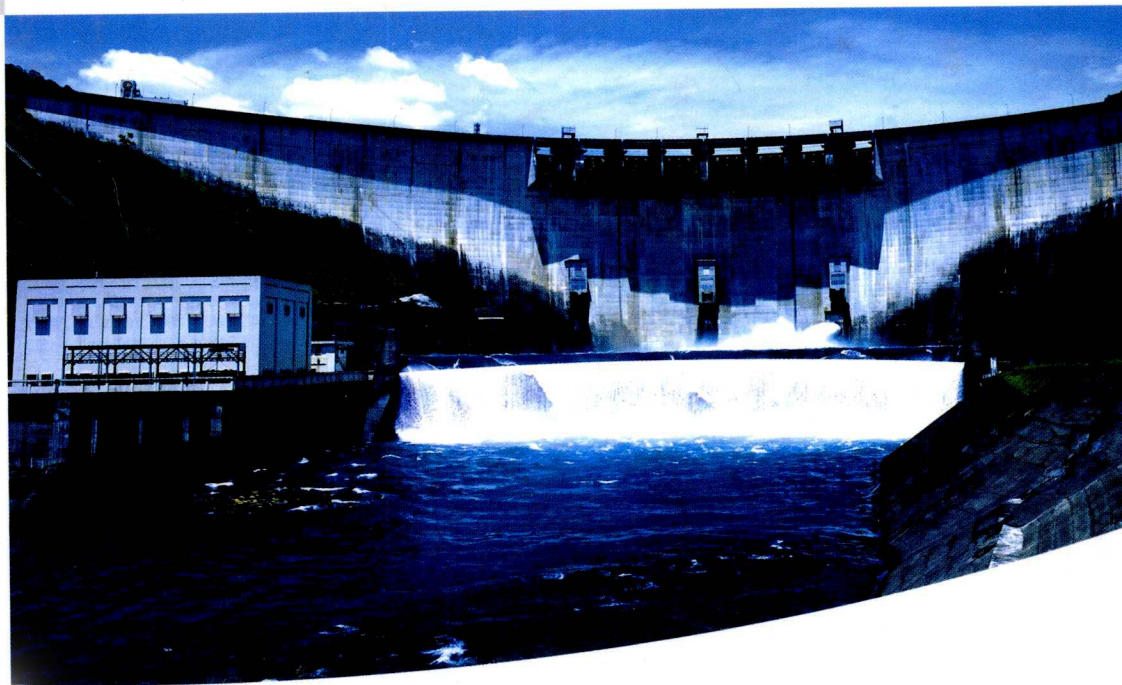


河流生态水力学

—— 坝下河道生态效应与水库生态友好调度

陈求稳 著



科学出版社

www.sciencep.com

河流生态水力学

——坝下河道生态效应与水库生态友好调度

陈求稳 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

水电梯级开发是我国一项重要的能源战略,水电开发在为人类合理利用水资源、水能资源提供有效手段的同时也在许多层面给区域和流域生态环境造成正面及负面的效应。本书以生态水力学作为理论基础,开发水环境与河流生态系统耦合模型,研究水电开发对河流生态环境的短期和累积性影响以及水电开发的生态效益,建立定量的分析和评价方法,并科学地提出减少河流生态影响、增强区域生态效益的水电开发运行改进措施。

本书主要材料依托雅砻江梯级开发和漓江多库运行的生态环境效应研究成果,可作为水利科学中环境和生态科研人员,大专院校水利、环境、生态和地学系的教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

河流生态水力学:坝下河道生态效应与水库生态友好调度/陈求稳著.

—北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-028961-2

I. ①河… II. ①陈… III. ①河流-生态:水力学 IV. ①TV13-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 177689 号

责任编辑:王志欣 闫井夫 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

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

*

2010 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 9 月第一次印刷 印张:9 彩插:8

印数:1—1 500 字数:120 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

维持河流生态系统健康是流域综合管理的一项重要目标,也是当前国际上河流研究的热点问题之一。为了在维持河流生态系统健康的前提下开发利用河流水资源,有必要深入研究水利工程调节下河流水文、水动力和生态系统之间的相互作用,从而提出减缓水利工程对河流水生态环境影响的对策与措施。

该书系统地介绍了河流水环境与水生态模型,描述了如何量化研究水库调节对下游河道水文情势、水环境、岸边带植被、底栖动物生境、鱼类及其栖息地的影响,详解了基于鱼类生境保护的生态流量过程推求方法,阐述了基于水库生态友好的水库调度模型,为实施生态友好的水库运行模式提供了科学依据和定量手段。

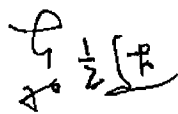
书中首先讲述了一维和二维耦合水环境模型,其中一维模型为二维模型提供上游边界流量值,二维模型为一维模型提供下游边界水位值,从而实现动态耦合。然后介绍了河流岸边带植物野外观测及实验室胁迫实验、鱼类野外调查和行为生态学实验,详述了建立目标物种对关键水环境因子的响应关系的过程,并在此基础上进一步详解了基于非结构化元胞自动机的植被动态模型、基于个体的鱼类种群动态模型、基于模糊数学的鱼类栖息地模型及其与二维水环境模型的耦合。接着采用开发的生态水力学模型,通过生态目标约束条件下的反算求解河流控制断面日均、月均生态流量过程线,用于取代目前通用的单一流量。最后描述了水库生态友好运行优化模型及其求解方法,提出了如何建立生态流量保障度与发电损失率之间的关系以及折中方案的确定方法。

该书充分结合具体实例介绍研究方法的应用。首先,采用研究建立的理论和方法,分析了漓江上游青狮潭水库运行对下游河段水环境和水生态系统的累积性影响,尤其是枯水期航运补水的影响;系统反演了水库运行的水生态演变过程,并对未来漓江二期和三期补水方案可能产生的影响进行了预测分析,提出了水库运行方案的改进措施,为漓

江生态环境改善提供了科学依据和技术指导。其次,在水电站应用方面,以雅砻江锦屏电站为例,系统地分析了锦屏梯级电站大河湾段的生态流量过程,建立了锦屏梯级电站发电量损失比和生态流量保证度之间的关系,推荐了经济上可行、生态友好的梯级水库运行模式,为减少水电开发对雅砻江水生态系统的影响,保护大坝下游关键鱼类生境提供了技术支撑。

该书内容体现了三个特点:①水力学与生态学高度交叉。通过野外长期跟踪观测、实验室胁迫实验和鱼类行为生态学实验,建立了物种与关键水环境因子之间的定量响应关系。②生态水力学理论与量化方法。提出了研究水工调节下河流生态系统响应的系统化理论,通过定量研究不同时段需水要求,建立了完整的河流生态水力学模型。③水库生态友好调度新思路。基于水库调节对坝下河流生态系统的累积性影响,采用情景分析方法,建立了面向生态友好的水库优化运行方案,增加了可操作性。

当前我国长江上游及西南诸河的水电开发正处于高峰期,其对河流生态环境的影响已引起了广泛的关注。在“十一五”规划建议中,针对水资源开发利用,国家明确强调要在“保护生态基础上,有序开发水电”。相信该书的出版对指导当前我国水电开发,控制和减免对河流生态环境的不利影响具有重要的现实意义,对生态水力学学科的发展也将产生有力的推动作用。



前 言

生态水力学是一门新兴的交叉学科,重点是研究水动力学和生态系统动力学之间的相互作用关系。欧美一些国家开展生态水力学研究起步较早,主要围绕受制河流的栖息地恢复和生物多样性保护。我国生态水力学研究起步较晚,但发展迅速,一些研究成果和方法已受到国际同行广泛关注。然而就整体而言,针对坝下河道生态效应及水库生态友好调度,建立系统性的河流生态水力学理论与方法在国内外尚非常缺乏。

本书重点围绕水电开发对河流的生态环境影响以及水库生态友好调度,系统介绍了河流水环境生态模型,建立了基于鱼类生境保护的生态流量过程推求方法,阐述了水库生态友好调度,为水库优化运行提供了科学依据和定量手段。

本书的研究得到了国家自然科学基金项目“雅砻江梯级水电开发生态环境效益和影响定量研究及调控机制”(50639070)、“水库运行对下游河道岸边带植被演替的影响”(50879086)、水利部公益性项目“漓江生物栖息地演变及鱼类监测技术研究”(200801051)、973 课题“变化环境下长江口生态系统的响应过程和机理”(2010CB429004)、广西“十一五”重点项目“漓江生物栖息地演变和预测”等的资助。

本书倾注了多人的心血,包括李若男(第 2 章、第 6 章)、叶飞(第 3 章)、陈端(第 7 章)、杨青瑞(第 4 章)、韩瑞(第 5 章)等;在最终完稿时,还得到了水利部长江流域水资源保护局翁立达教授、水利部水利水电规划设计总院朱党生教授的审核指正,在此一并表示衷心感谢!

此外,翁立达教授为本书作序,特此表示诚挚的谢意!

由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,敬请读者提出宝贵意见和建议。

作 者

2010 年 8 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究区域	5
1.2.1 漓江流域	5
1.2.2 雅砻江中下游	7
1.3 下游河道主要生态环境效应	8
1.3.1 水文水环境	8
1.3.2 河流动植物生境	9
1.3.3 水库生态友好调度	9
1.4 国内外研究现状	9
第 2 章 水文水环境影响	14
2.1 水文分析	14
2.2 水环境模型	16
2.2.1 一维水环境模型	16
2.2.2 二维水环境模型	19
2.2.3 一维和二维模型耦合	21
2.3 漓江应用实例	21
2.3.1 特征水文年	22
2.3.2 模型边界条件	23
2.3.3 模型参数率定及验证	24
2.3.4 青狮潭水库补水的水文情势影响	25
2.3.5 青狮潭水库补水对下游河道的水环境影响	27
2.3.6 青狮潭水库补水对下游局部河段的水环境影响	32
2.4 小结	36

第3章 岸边带植被影响	37
3.1 岸边带植被调查与生理生态分析	37
3.1.1 野外植被调查	37
3.1.2 植物对水流因子的响应	38
3.2 岸边带植被动态模型	38
3.2.1 基于元胞自动机的植被模型	39
3.2.2 二维水流模型	40
3.2.3 水流与植被模型耦合	40
3.3 漓江应用实例	42
3.3.1 植被调查与实验	42
3.3.2 水流模拟	47
3.3.3 植被演替模拟	48
3.4 小结	52
第4章 底栖动物的影响	53
4.1 大型底栖动物群落结构分析	53
4.1.1 目标物种选择	53
4.1.2 底栖动物与环境的关系	54
4.2 底栖动物栖息地动态模型	55
4.2.1 底栖动物栖息地评价模型	55
4.2.2 水环境模型	59
4.2.3 水环境模型与底栖动物模型的结合	60
4.3 漓江应用实例	60
4.3.1 底栖动物调查	61
4.3.2 底栖动物生境模型	64
4.3.3 河流调节对栖息地的影响	68
4.4 小结	71
第5章 鱼类动态影响	73
5.1 鱼类调查与生理生态分析	73
5.1.1 鱼类调查	73
5.1.2 鱼类行为生态实验	74
5.2 鱼类种群动态模型	75
5.2.1 水环境模拟	77

5.2.2 基于个体鱼类模型	78
5.3 漓江应用实例	80
5.3.1 鱼类行为生态学实验	80
5.3.2 模型参数设置	82
5.3.3 模型结果	83
5.4 小结	86
第6章 河流生态流量过程	87
6.1 鱼类生态调查	87
6.2 鱼类栖息地模型	88
6.2.1 基于模糊数学的鱼类栖息地模型	88
6.2.2 二维水环境模型	93
6.2.3 水环境与鱼类栖息地模型耦合	93
6.3 河流生态流量过程计算	94
6.4 雅砻江锦屏减水河段应用实例	96
6.4.1 目标物种筛选	97
6.4.2 栖息地模型建立	100
6.4.3 栖息地模型验证	103
6.4.4 河流调节对栖息地的影响	103
6.4.5 生态流量过程线	108
6.5 小结	111
第7章 生态友好调度	112
7.1 生态友好调度涵义	112
7.2 生态友好调度优化模型	113
7.2.1 目标函数	114
7.2.2 约束条件	115
7.2.3 优化方法	116
7.2.4 模型运算	118
7.3 雅砻江锦屏梯级应用实例	119
7.3.1 模型建立	120
7.3.2 优化结果及讨论	122
7.4 小结	127
参考文献	128

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

水电开发(尤其是梯级开发)不可避免地导致河流甚至流域生态环境的改变。一方面水电工程的建设运行不仅为人类合理利用水资源、水能资源提供了有效手段,而且在许多层面对区域的生态环境产生积极的效益,包括缓解生态环境压力和减少碳排放。另一方面大坝建设人为改变了河流原有的物质场、能量场和生物场,直接影响生源要素在河流中的生物地球化学行为(生源要素输送通量、赋存形态、组成比例等),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^[1,2]。

水电开发的生态环境效应主要体现在以下四个方面:①对河流水文、水动力特性的影响。水库运行改变了河流的自然水文情势,从而影响河道的流量、水位、流场形态和地下水位等,并引起河床地貌的演变,进而对河道、岸边带以及洪泛平原的生态环境产生影响^[1,2]。②对水体物理和化学特性的影响。水库运行可能带来清水和低温水以及局部河段溶解气体过饱和,同时库内由于蓄水可能引起水体酸度增加^[3]和营养盐积累^[4],从而一方面降低下游河道的初级生产力和鱼类繁殖,另一方面促进库内藻类的大量生长^[5]。③对河流生态系统结构和功能的影响。水库蓄水后,生物群落随生境变化经过自然选择和演替,形成一种新平衡。库区内水动力减弱、透明度增加,使水生态系统由以底栖附着生物为主的“河流型”异养体系向以浮游生物为主的“湖沼型”自养体系演化^[6,7];大坝阻隔了洄游性鱼类的通道,影响物种的交流;改变了天然河流水位急剧变化引起的浅滩交替的暴露和淹没,影响鱼类的栖息和产卵。④对区域生态系统的影响。水库运行对水文情势的改变可能导致洪泛区湿地减少^[8]、生物多样性减损和局部生态功能退化。洪泛平

原生态系统已经适应洪水的季节性变化,水库运行改变了径流峰值和脉动频率,分割了下游主河道与冲积平原的物质联系以及生态系统的食物链^[9],从而影响洪泛平原的生态过程^[10,11],甚至区域生态系统的结构和功能^[12]。

河流水资源和水能资源开发对河流的生态环境具有深远的影响,引起了公众的高度重视。如何科学、定量地分析水库运行对河流生态环境的作用,寻求在水电设计、施工和运行中减小负面影响或增强生态环境效益的可供实际操作的措施和机制,实现水电开发和生态环境的和谐发展并为未来流域梯级开发提供参考,是河流开发急需研究的问题。

以往我国在水库的设计和运行中,生态工作的重点是针对珍稀鱼类的鱼道设计,而对河流整体生态效益和生态影响的定量研究比较缺乏。随着对河流健康问题的认识,我国已逐步从单纯的工程水利开始向资源水利发展,并提出了“生态水利”的理念。针对水资源开发,国家在“十一五”规划建议中明确强调要在“保护生态基础上,有序开发水电”。

虽然对于河流生态健康已经有了比较一致的认识,但是目前多数停留在一些新理念的定性描述上,一直缺乏系统的理论和研究方法,因此,难以定量说明水库调节和梯级电站联合运行对河流乃至流域生态系统的效益和影响,更未能提出经济可行、生态友好的水库优化运行模式。

生态水力学^[13~15]和流域生态学^[16,17]理论与方法的发展为解决这一问题奠定了基础。生态水力学是一门新兴的交叉学科,重点是定量研究水动力学和生态系统动力学之间的相互作用关系^[14,18]。以前的环境水力学主要研究物质在水体的迁移和转化以及其浓度对生物的影响,但是对生物生理及行为生态过程较少涉及。而现有的一些水生态模型主要都局限在水生生物的生理特征研究和生境评价上,很少涉及水动力学部分,基本属于静态模型。

流域生态学以流域为单元,采用现代水文学和系统生态学的交叉方法,通过尺度转换综合分析流域内不同子系统之间物质、能量和信息

的流动规律。流域生态学研究的重点是流域水文过程、流域生态系统(土地利用、生物多样性)演变、流域水文过程和生态系统过程的相互作用^[17]。

生态水力学和流域生态学的研究成果将为生态水工设计和工程生态友好运行提供理论与技术支持,而生态水工的发展将不断提出新的研究需求和方向。就流域梯级水电开发而言,目前面临的研究难点主要包括:①从生物生理的角度建立生命体对水动力和水环境等非生命因子的响应机理和定量关系;②考虑生物个体的差异性、水动力和水环境因子空间异质性的影响;③分析水动力-水环境-生态系统等多过程的特征时空尺度,建立多尺度耦合;④实现从内在作用机理的研究到外在系统演变的调控;⑤从单个水库的生态友好调控机制拓展到流域尺度梯级水库的联合调控机制。

河流生态恢复是生态工程学的一个分支。生态工程学是为促进工程学与生态学相结合而形成的一门新兴的交叉学科。1962年,Odum等提出将自我设计(self-organizing activities)的生态学概念用于工程中,首次提出生态工程(ecological engineering)概念。1989年,美国Mitsch和Jorgensen正式探讨1962年由Odum等提出的生态工程概念并赋予定义,正式诞生了生态工程。1993年,在美国科学院主办的生态工程研讨会上,根据Mitsch的建议,把“生态工程学”定义为“将人类社会与其自然环境相结合,以达到双方受益的可持续生态系统的设计方法”。生态工程学的研究范围很广,包括河流、湖泊、湿地、矿山、森林、土地及海岸等的生态建设问题^[20]。

在河流生态修复方面,1938年,德国Selferr首先提出了近自然河溪治理的概念,其是指在完成传统河道治理任务的基础上,可以达到接近自然、经济并保持景观的一种治理方案。1965年,德国Bittmann在莱茵河用芦苇和柳树进行了生物护岸实验。20世纪70年代末,瑞士Zttrich州河川保护局建设部的Göldi将德国Bittmann的生物护岸法丰富发展为“多自然型河道生态修复技术”,即拆除已建的混凝土护岸,改修成柳树和自然石护岸,给鱼类等提供生存空间,并把直线形河道改修为具有深潭和浅滩的蛇形弯曲的自然河道,让河流保持自然状态。之

后陆续出现关于生态学原理运用于水利工程中的研究,奠定了“多自然型河道生态修复技术”的理论基础^[21]。

从水文和水动力角度来看,维护河流生态系统健康或对河流生态系统进行修复,必须首先满足河流生态系统对水的需求。因此,初期的研究应主要集中在河流生态系统需水量。

20 世纪 70~80 年代,水生生物学家通常认为,河流的最低水位是限制水生生物健康的最基本因素。在这样的理论指导下,当考虑人类需求和河流生态系统需求之间的关系时,一个简单的认识是,如果在开发利用河流水资源的同时,留给河流一个基本水量,就可以保证河流生物的基本生存条件。一段时间内,定义和计算生态系统需水量成为河流保护的一个研究重点^[22]。

随着生态系统需水量研究的不断深入和水生生物学研究的进展,研究者认识到,采用河流(最小)生态需水量作为一种单一的水流条件来指示河流生态系统的健康,并依此实施河流健康管理存在很大局限。如果采用最小生态系统需水量的概念,容易导致选择单一的最小流量水平作为生态保护的目标,这对于保护以生态完整性和多样性为核心的河流生态系统并不能发挥实际作用。

20 世纪 90 年代后期,水流情势对河流生态系统的决定性作用越来越受到关注。Leroy Poff 等阐述了水流情势对河流保护和修复的重要意义,认为河流流态是影响河流生态系统健康的最大因素。为维持河流自身的健康和河流生物多样性(包括土著物种的健康繁殖生长),河流需要各种各样的流态。河流生态系统的诸多过程是与水流过程高度关联的,水流情势在支撑河流生物多样性和生态系统完整性方面起着决定性的作用。

水流情势决定并影响了河流生态系统的主要方面,包括河流物质循环、能量过程、物理栖息地状况和生物相互作用。研究主要围绕水文要素展开,从幅度、频率、历时、时间、水文条件变化率五个方面进行。

随着河流生态系统与水文情势之间的研究不断深入,受制河流的管理与调控研究也随之发展。从近半个世纪国内外对河流生态系统的研究来看,大量的实例研究都表明径流是河流生态系统中起决定性作

用的要素,河流流量模式改变对河流生态系统完整性具有连锁效应。而水库调度方式不同将导致完全不同的出库径流过程(流量模式)和水库水位变化过程,从而对河流生态系统完整性产生重要的影响。虽然水库调度方式并不会对全部效应都产生作用,但在工程建成投入运行后,仍是改变其负面生态效应(影响河流生态系统)的最重要途径。这表明,改变传统的水库调度模式是既可行又十分必要的。

生态友好调度是水库运行发展的新阶段。生态友好调度以实现人与自然和谐为宗旨,既要考虑河流水能资源合理利用、满足经济社会发展要求,又要维护生态环境健康的要求,通过优化水库运行方式,实现协同效应。这既不同于传统的以综合利用效益最佳为目标的水库调度,又与过度关注生态环境改善的水库生态调度涵义有所差别,生态友好型水库调度是将传统的以综合利用效益最佳为目的的水库调度与以改善生态环境为目的的水库调度耦合,形成的水库调度模式。

1.2 研究区域

1.2.1 漓江流域

漓江位于广西壮族自治区,以山水甲天下闻名于世,其中桂林至阳朔河段有着丰富的旅游资源,同时也是桂林市及周边地区重要的水源。

漓江属雨源性河流,雨量充沛,水量丰足,但年内径流分配极不均匀,丰、枯水季节径流量相差悬殊,80%以上降雨量集中在每年的3~8月。此外,由于独特的喀斯特地貌,径流产生快、流量大、历时短,日均流量变幅剧烈。以桂林水文站(集雨面积达2762 km²)为例,保证率为10%的日均流量达286 m³/s,保证率为90%的日均流量仅为18.7 m³/s。历史上漓江市市区段实测最小月均流量仅为5.9 m³/s(1956年12月),实测最枯流量达3.8 m³/s(1951年2月),基本处于断流状态,而实测最大流量达5890 m³/s(1998年6月)。因此,漓江水多与水少问题并存,各种用水需求往往需要通过水力调节来实现。

漓江的主要生态环境问题主要表现在以下五个方面:①漓江枯水期水资源严重短缺,生态退化。由于降雨量时间上分配极为不均,导致

漓江汛期洪水泛滥成灾,枯水期长期严重缺水,河道几近枯竭,桂林市日取水 $7\sim 8\text{ m}^3/\text{s}$ 难以满足。在枯水期间,漓江两岸山体裸露、河道干涸、生物多样性显著下降,严重影响漓江生态环境和水资源稳定利用。

②防洪能力低,洪涝灾害严重。漓江上游流域是桂北的暴雨中心区,降雨集中、强度大、洪水频繁,缺乏控制性防洪工程。桂林市城区大部分地势较低,因城区防洪工程受旅游景观要求限制,目前桂林市区的防洪能力不足 20 年一遇,洪涝灾害严重。

③水污染潜在威胁大,水环境呈恶化趋势。漓江既是桂林市城市供水水源地,也是主要的纳污水体。在丰水期间,漓江水质可满足地表水环境质量标准(GB3838—2002)中的二级标准;但在枯水期间,水质显著变差。近年来,随着经济的发展、人口增加和城市规模的扩大,排污量迅速增多,而城市污水处理能力发展相对滞后,部分城市生活污水和工业废水未经处理而直接排入河道。在枯水期间,河道流量减少,水体稀释自净能力减弱,水质急剧下降。今后,随着工业的进一步发展和城市化步伐的加快,城市废污水排放量将继续增加,漓江水污染潜在威胁将会更大。

④生物多样性降低。虽然漓江原来的水生态系统比较健康,水生植物和浮游动物相对丰富,但是随着水文情势的剧烈改变以及无节制的捕捞,水生生物的种类和数量开始锐减,一些物种已经灭绝,还有更多的物种濒临灭绝,河流生物多样性明显降低。

⑤漓江枯水期缺水,严重影响桂林山水旅游形象。漓江是桂林山水之精华,桂林市目前正向联合国教科文组织申请将漓江列入世界文化与自然遗产名录。然而,由于枯水期流量很小,水位很低,水边退缩,导致河滩裸露,乱石嶙峋,严重影响了观赏价值,而且制约了漓江风景名胜区的旅游通航。2007 年冬季,由于水量偏少,漓江出现断航,引起社会强烈反响和广泛关注。对于漓江大多数船只,其航行深度大约在 0.8 m ,相应的流量需求为 $30\text{ m}^3/\text{s}$,规划流量为 $45\text{ m}^3/\text{s}$ 。目前,通过基本流量和上游水库的补水,可以满足全年 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 的航行流量需求;但在枯水期间,游船只能到达阳朔上游的兴坪镇,百里漓江目前每年平均有 5 个月仅能通航 $10\sim 20\text{ km}$ 。这既减少了旅游收入,又影响了桂林现代化国际旅游城市建设的进程,已成为严重制约桂林市经济社会发展的瓶颈之一。保持漓江下游连续的通航能力,对桂林市

的经济发展至关重要。

综合分析漓江水环境和生态现状可以发现,其核心问题是在水资源总量充足的条件下实现时间上的有效调配。根据研究,广西壮族自治区和桂林市兴建和规划了一系列调蓄水库。漓江上游已有两座大型水库,还有三座在建和拟建的中型水库,即虎子口水库、川江水库及小榕江水库。这些水库的功能主要包括灌溉、防洪、枯季补水和发电。此外,在新安县境内,正在开发五里峡水库,其作用是从长江流域调水以满足漓江生态系统对水量的需求。预计上游的虎子口水库、川江水库和小榕江水库建成后,河道最小流量可以全年保持在 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上。这些水资源调配措施显著提高了漓江水资源的利用效率,但是引起的水文情势变化可能对河流生态系统造成显著的影响,而这些影响反过来将制约漓江流域的可持续发展。

1.2.2 雅砻江中下游

雅砻江为长江上游金沙江的支流,其发源于青海省巴颜喀拉山南麓,东南流入四川省西北部,在甘孜以下称雅砻江。雅砻江流域东西宽 $100\sim 200 \text{ km}$,南北长约 900 km ,形状狭长,流域面积约 13 万 km^2 ,在四川境内的部分是 11.63 万 km^2 。流域内地势北、东、西三面是海拔 $4500\sim 5500 \text{ m}$ 的高山及高原,南面是海拔 $1000\sim 1500 \text{ m}$ 的峡谷,按地貌特征划分,甘孜以上为上游、甘孜至锦屏大河湾为中游、大河湾以下为下游。

雅砻江滩多水急,自然落差大,在四川境内 1375 km 河段中,天然落差达 3192 m ,平均比降 2.32% 。雅砻江水量丰沛,年水量为 570 亿 m^3 ,占长江上游的 13% 。雅砻江径流是由降雨、地下水和融雪水三部分组成,其中降雨对径流的贡献约占 $1/3$ 。降水量上游为 $600\sim 800 \text{ mm}$,中游为 $1000\sim 1800 \text{ mm}$,其中东侧贡嘎山和小相岭山区可达 $1500\sim 1700 \text{ mm}$,下游区为 $900\sim 1300 \text{ mm}$ 。降雨使雅砻江径流丰沛而稳定,年际间变化不大。据小得石水文站 18 年水文资料分析可知,多年平均流量为 $1550 \text{ m}^3/\text{s}$,最大年均流量为 $2330 \text{ m}^3/\text{s}$,最小平均流量为 $1220 \text{ m}^3/\text{s}$ 。年内径流的变化,自上年 11 月至次年 5 月为枯水期,水量约占全年径流

量的 24% 左右,枯水期流量比较平稳;自次年 6 月至次年 10 月为丰水期,占全年径流的 76% 左右。

锦屏梯级位于雅砻江中下游锦屏大河湾处,其中锦屏二级通过建设引水隧道对大河湾裁弯取直,利用天然落差进行发电。引水发电坝址猫猫滩位于大河湾西侧景峰桥下游约 3.7 km 处,控制集水面积达 102 663 km²,厂址位于大河湾东侧的大水沟。工程运行后,坝址至厂房之间约 119 km 的大河湾将成为减水河段。

由于流量减少,河段水深降低,水生生物的生存空间和质量发生巨大变化,可能对河流水生态系统产生显著作用。为减少电站运行对该河段的影响,该工程在环境评价阶段被要求开展生态调度研究,并专门加设了泄流装置用于泄放生态流量,这是由于大坝调度直接关系到电站的发电效益。因此,定量分析径流降低对大河湾河段水生生物的影响、同时减小生态调度中的发电效益损失是雅砻江锦屏梯级运行需要解决的问题。

1.3 下游河道主要生态环境效应

对于水库运行对下游河道的生态效应,重点需要研究水环境演变趋势,以及河流水生动植物对水环境变化的响应,从而确定生态友好运行方式,为河流健康管理提供依据,具体包括如下内容。

1.3.1 水文水环境

采用水文统计的方法,分析流域丰水年、平水年和枯水年的水文和气象特征,确定各自对应的代表性年份。建立一维非恒定流水动力模型,模拟研究河段不同水文年和水库不同调度模式下下游河道的水力特性,主要包括日均流量、水位和流场,根据流场特征确定关键的水流突变区和回水区。收集研究区域主要水文监测断面的水质监测数据,通过时间序列分析掌握水质的长期变化趋势,分析关键水质指标(水温、浊度、溶解氧和营养盐等)在特征水文年内的季节性和沿程变化特点。建立一维水质模型,模拟关键水质指标在特征水文年内的季节性