

长江上游水利工程 对中下游生态水文的影响

CHANGJIANG SHANGYOU SHUILI GONGCHENG
DUI ZHONGXIAYOU SHENGTAI SHUIWEN DE YINGXIANG

张楠 尚永立 江红 郭海 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

长江上游水利工程 对中下游生态水文的影响

张楠 尚永立 江红 郭海 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了长江上游大型水利工程情况,分析了长江上游的水文气象特征,以及长江上游主要大型水利工程对水文特征的影响,通过改进分布式水文模型、生态调度模型构建了长江上游水文循环模型及三峡水库生态调度模型,最后从长江上游水库群不同蓄水时间、降雨量变化方案下三峡水库来水量,下泄水量,以及中华鲟产卵期、四大家鱼产卵期水文过程变化情况,描述长江上游大型水利工程建设对中下游生态水文的影响。

本书可供水文学及水资源、水利工程、水文模型等专业的科研人员、大学教师、本科生和研究生,以及从事水文模拟、水资源规划与调度工作的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

长江上游水利工程对中下游生态水文的影响 / 张楠
等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013.7
ISBN 978-7-5170-1063-0

I. ①长… II. ①张… III. ①长江—上游—水利工程
—影响—长江中下游—环境水文学—研究 IV.
①TV882.2②X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第158896号

书 名	长江上游水利工程对中下游生态水文的影响
作 者	张楠 尚永立 江红 郭海 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 (发行部)
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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.25印张 219千字
版 次	2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	35.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

作者简介

张楠，男，1981年生，工学博士。2011年毕业于河海大学，研究方向为水文学及水资源。攻读博士期间获得“优秀毕业研究生”、“优秀研究生”等称号。目前，以第一作者发表在 *Water Resources Management*、*Journal of Hydroinformatics*、*Environmental Biology of Fishes*、《水利学报》等刊物上的科研论文共计 10 余篇，其中 SCI 收录 4 篇，EI、ISTP 收录 4 篇。参加了 International Symposium on IWRM International Symposium On Methodology in Hydrology、International Conference on Remote Sensing、Enviroment and Transportation Engineering、黄河国际论坛等国际会议，现工作于黄河水利委员会黄河水利科学研究院。

尚永立，男，1969年生，河南新乡人，武汉大学工程硕士，高级工程师。南水北调沁河倒虹吸施工负责人，从事黄河防汛及工程管理工作 20 年。已发表学术论文 50 余篇，专著 2 部，获水利部黄委会科技进步奖 3 项，现工作于黄河建工集团有限公司。

江红，女，1981年生，工学硕士。2010年毕业于华北水利水电学院，研究方向为水文学及水资源。已在国内外期刊及会议发表学术论文 4 篇，其中 SCI、EI、ISTP 检索 5 篇。参加了黄河国际论坛等国际会议，现工作于黄河水利委员会黄河流域水资源保护局。

郭海，男，1982年生，甘肃环县人，华北水利水电学院硕士研究生，工程师、经济师、一级建造师。从事南水北调中线干线工程项目管理工作，发表学术论文 4 篇，现工作于南水北调中线干线工程建设管理局。

前 言

河流系统是地球上的大动脉，在维系地球的水循环、能量平衡、气候变化和生态发展中具有极其重要的作用。河流开发是一把双刃剑，带来利益的同时也可能带来危害。河流开发过程中，伴随着水资源利用的提高，流域下垫面条件和调蓄作用发生了改变，这种影响随着人类社会的发展，影响范围在迅速加大，影响强度在迅速增大。河流开发后，水库按照社会经济原则和既定的水库调度方案进行调度，调蓄时空不平衡水资源，利用水库调蓄库容，削减洪峰，蓄丰补枯，控制下泄流量，均化了径流过程。经水库调节后的径流过程与自然状态下的径流过程不相同，改变了河流的水流情势，打断了河流的连续性，使原本连续的河流环境变成多级相连的水库环境，连续、多种多样的河流环境将会慢慢消失，不仅使河流的连续性遭到破坏，也将破坏生态系统的完整性。

近年来大坝建设对河流情势、生态环境产生的变化已逐渐引起了各国政府和科学家的重视。随着“河流健康”、“人水和谐”等一些重要理念的提出，水利工程的建设对河流情势、生态环境、流域可持续发展方面带来的影响已成为水文学和水资源领域中的一个热点问题。为减轻水利工程对河流生态系统的负面影响，开展水库生态调度研究，制定合理的大坝调度方法，弥补或减缓水利工程造成的生态环境问题，也是当前大型河流生态恢复中的一项重要举措。

根据长江上游主要河流的梯级开发规划，未来规划建设的大型水库多达30余座，总库容约为2000亿 m^3 ；2020年以前，长江上游主要河流梯级水库布局将基本完成，长江上游40%的径流量将可能被水库拦蓄，通过水库调蓄增加的上游消耗性用水至少在250亿 m^3 以上，如果加上南水北调引水，长江上游未来预计将会减少来水量400亿 m^3 。受到上游水库调节作用影响，长江干流的水文过程特性将发生根本性的变化，汛期洪水将被拦蓄而使径流减少，枯季径流会显著提高，而整个水文过程的周期（汛期起止时间，枯季起止时间）将会被人为缩短。2008年，三峡水库正常蓄水位由145m提高到175m，为保证水库蓄满，三峡水库蓄水时间从10月1日提前至9月15日，但2008~2010年三峡水库10月底仍未蓄满，这与长江上游干旱年径流量减少有着密切的关系。考虑长江上游不出现干旱年，在规划大型水库运行情况下，三峡水库在提前或不提前蓄水情况下能否蓄满是一个尚待解决的问题，直接关系到长江中下游地区防洪、航运、生态环境、干旱等一系列问题。

鉴于此，党和国家高度重视大型水利工程带来的生态问题，将其列为国家

自然科学基金重大项目资助课题，组织了一批强有力的研究队伍进行了专项研究，并取得了丰硕的成果。

本书依托该项目，从长江上游干支流流量、生态要素（流量、泥沙、水温）等方面，详细阐述了长江上游水利工程建设对水文气象要素的影响。通过改进分布式水文模型、生态调度模型，探讨长江上游水利工程不同蓄水时间及降雨量变化情景下对中下游河道河流生态水文的影响。本书在一定程度上回答了长江上游大型水利工程建设对中下游生态影响的问题，并为长江上游大型水利工程联合调度，长江中下游地区的生态环境保护，防洪规划，枯水期航运，对中下游的生态补水，减轻长江中下游地区枯水期干旱，遏制长江中下游以及洞庭湖、鄱阳湖地区的旱情等方面的继续研究提供了借鉴。

本书是在项目研究成果的基础上撰写而成，项目和书稿的完成是各位成员共同努力的结果。编写分工如下：前言、第一、第二章由张楠、尚永立编写，第三章由尚永立、郭海编写，第四章由张楠、尚永立、江红编写，第五、第六章由张楠、尚永立、江红、郭海编写。全书由张楠统稿。

本书在研究、撰写和出版过程中，得到许多专家的专业指导和无私帮助：河海大学国际河流研究所所长夏自强教授，中国水利水电科学研究院的周祖昊教授、桑学峰博士，河海大学郭文献博士、张正良博士、康燕霞博士、王景才博士、黄峰博士，中科院南京土壤研究所张厚喜博士。此外，本书的研究得到了国家自然科学基金重大项目资助课题（30490235）《大型水利工程对重要生物资源不利影响的补偿途径》的支持，在此一并表示感谢！

受时间和作者水平限制，本书许多内容有待于进一步的完善和深入研究，其中错误或不足之处，敬请读者和有关专家给予批评指正。

作 者

2013年5月于金水河畔

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	6
1.2 研究内容	7
第 2 章 长江上游大型水利工程情况	9
2.1 金沙江流域主要大型水利工程	11
2.2 雅砻江流域主要大型水利工程	13
2.3 岷沱江流域主要大型水利工程	14
2.4 嘉陵江流域主要大型水利工程	16
2.5 乌江流域主要大型水利工程	18
2.6 长江上游干流主要大型水利工程	19
第 3 章 长江上游水文气象特征分析	21
3.1 长江上游干支流径流量变化特性研究	21
3.1.1 集对分析法	21
3.1.2 长江上游各流域径流量丰枯变化	22
3.2 长江上游地区降雨量时空变化分析	30
3.2.1 旋转经验正交 (REOF)	30
3.2.2 长江上游各时段降雨量变化	32
3.2.3 长江上游降雨量的空间特征	33
3.2.4 长江上游降雨量的演变趋势	36
第 4 章 长江上游主要大型水利工程对水文特征的影响研究	40
4.1 研究站点及数据收集	40
4.2 河流水文特征变化程度分析研究	41
4.3 宜昌站与长江上游支流流量变化分析	44
4.4 长江上游水利工程对径流量特性影响分析	51
4.4.1 雅砻江流域径流量计算分析	51
4.4.2 嘉陵江径流量计算分析	52

4.4.3 岷沱江径流量计算分析	56
4.4.4 乌江径流量计算分析	57
4.4.5 上游干流径流量计算分析	60
4.5 长江上游水利工程建设对输沙量的影响分析	66
4.5.1 雅砻江流域泥沙计算分析	66
4.5.2 岷沱江流域泥沙计算分析	68
4.5.3 嘉陵江流域泥沙计算分析	68
4.5.4 乌江流域泥沙计算分析	71
4.5.5 上游干流泥沙计算分析	72
4.6 葛洲坝、三峡水库对水温的影响分析	75
4.6.1 葛洲坝水库的影响	76
4.6.2 三峡水库的影响	77
第5章 长江上游水文循环模型及三峡水库生态调度模型研究	80
5.1 长江上游水文循环模型 (SWAT 模型) 的构建及改进	80
5.1.1 模型资料的选取	80
5.1.2 SWAT 模型水库调度模块	87
5.1.3 长江上游人类取用水的设置	91
5.1.4 参数敏感性分析	91
5.1.5 模型的率定与检验	93
5.2 三峡水库生态调度模型的建立	95
5.2.1 三峡梯级水库生态调度模型的建立及求解	96
5.2.2 三峡梯级水库水热平衡模型的建立	98
5.2.3 三峡梯级水库调度运用基本参数与指标	99
5.2.4 三峡梯级水库常规调度运行方式	101
第6章 长江上游大型水利工程对中下游生态水文的影响	103
6.1 三峡水库下游河道内不同时段适宜环境流量的确定	103
6.1.1 下游河道内不同时段适宜环境流量的确定	103
6.1.2 中华鲟产卵繁殖期 (10~11 月) 生态水文要素变化	103
6.1.3 四大家鱼产卵繁殖期 (5~6 月) 生态水文要素变化	104
6.2 长江上游水库不同蓄水时间对中下游河流生态水文的影响	104
6.2.1 上游水库不同蓄水时间方案的设置	104
6.2.2 三峡水库来水量年内变化	105
6.2.3 三峡水库下泄水量年内变化	105
6.2.4 对中华鲟产卵期水文过程的影响	111
6.2.5 对四大家鱼产卵期水文过程的影响	115
6.3 长江上游降雨量变化对中下游河流生态水文的影响	118
6.3.1 降雨量变化方案的设置	118
6.3.2 三峡水库来水量年内变化	119
6.3.3 三峡水库下泄水量年内变化	119

6.3.4 对中华鲟产卵期水文过程的影响	123
6.3.5 对四大家鱼产卵期水文过程的影响	127
6.4 结论	130
参考文献	131

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

河流系统是地球上的大动脉,在维系地球的水循环、能量平衡、气候变化和生态发展中具有极其重要的作用。地球上生命的任何现象都与水紧密相连,生命演化的每一个步骤都离不开水。如果说水孕育了生命,那么河流孕育了人类文明。人类从游牧阶段走向定居从事农业生产,创造农耕文明,完全依赖于河流。从古埃及文明在尼罗河年复一年的泛滥中诞生,幼发拉底河和底格里斯河孕育了苏美尔农耕文明和古巴比伦王国的繁荣,到印度河流域的自然条件、水文条件催生了南亚次大陆青铜时代的文明。再到作为“中华民族母亲河”之一的长江以其生命之水哺育了一代又一代中华民族儿女的成长,孕育了“荆楚”、“长江”、“巴蜀”、“五岳”文明,无一不证实了这点。河流为“择水而居”的人民提供了食物、工农业及生活用水,以及商业、交通、休闲娱乐等诸多服务功能。

人类自从在地球上生存之日起就利用和改造河流,原始文明和农耕文明时期,由于受生产力水平的限制,人类对河流的影响是有限的。进入工业文明以来,随着自然知识和生产力的不断增长,人类开始以自然的主人自居,盲目地开发利用河流、改造河流。随着社会经济的发展,人类对河流的依赖程度也越来越大,人类为了自身的发展,将河流看作是服务于人类的资源,对河流进行了各种方式有目的的开发利用,其中大坝建设是现今人类改造河流最为重要的活动之一。大坝建设是处理人与水关系的重要工程措施,也是维护生态环境的重要途径。我国从 20 世纪 50 年代开始,由于人口的激增和经济发展的需要,各国建造的水坝数量呈明显上升趋势;随着水力发电的出现,国内外河流梯级水电开发进入迅猛的发展,平均每天就有两座大坝交付使用。2005 年底,30m 以上已建、在建大坝共有 4860 座。改革开放以来,特别是近 15 年间,水电开发日益引起各方面的重视,水利工程建设出现新的上升势头,水利部根据我国水资源的分布情况、开发条件和经济发展的需求,提出了建设流域水电开发基地的方案,重点为 13 个大型水电基地,规划总装机容量为 21048 万 kW,年发电量为 9946 亿 kW·h。

相关研究表明,河流的水文过程与生态环境有着十分密切的关系,大坝工程建设也改变了原有的生态系统平衡,对河流生态系统产生了一定的影响:大坝改变了河流季节性的流量,改变了河道水温、化学特性、流量范围,拦截了泥沙,并使下游河床发生冲刷、鱼类的迁徙受阻等,从而对河流野生鱼类、贝类、鸟类及其他水生动植物产生不利的影响。天然河流的流态——包括流量大小、水位高低及其年内在和年际变化特征等,都会对河流生态系统产生重要影响。

埃及尼罗河修建的阿斯旺大坝,建坝后虽然改善了灌溉、防洪条件,但对下游径流和



泥沙量过程的改变,造成了下游河床冲刷、河道蜿蜒摆动、断流、尼罗河三角洲后退、海水入侵、海岸侵蚀,随之带来河口湿地退化、生态环境破坏等危害。美国的密西西比河以及科罗拉多河,由于大坝的兴建,严重改变了鱼类和野生动物的栖息地及其数量,栖息地的减少和破坏直接导致鱼类和鸟类数量的下降。此外,下游径流量减少,造成河口环境严重恶化。在澳大利亚,大坝工程引起的河流水流情势变化是河流及其洪泛区平原生态系统恶化的一个重要因素,造成大量的湿地丧失,河岸森林减少,无水河道和湿地的植被入侵,水生植被群落结构改变,无脊椎动物、鱼类和水鸟数量和物种多样性降低以及一些无脊椎动物的灭绝。伏尔加河流域由于大量水利工程的修建,严重改变了河流径流情势,给生物群落和鱼类生物栖息带来极为严重的影响。在我国,大坝工程建设取得了举世瞩目的成就,同时也对自然环境产生了不良影响。据调查,黑河流域的大坝建设导致了下游地区生态环境的急剧退化,天然植被明显萎缩,绿洲面积缩小;大坝引水工程威胁了青海湖的生物多样性;三门峡大型水坝抬高了渭河河床,下游段形成悬河,造成了土地盐碱化和洪水灾害的无穷后果;云南曼湾电站淹没大量农田,引发库区毁林开荒、陡坡开荒,导致水土流失,加剧生态破坏。

近年来大坝建设引起河流情势、生态变化已逐渐引起了各国政府和科学家的重视。随着“河流健康”、“人水和谐”等一些重要理念的提出,水利工程的建设对河流情势、生态环境、流域可持续发展方面带来的影响已经成为水文学和水资源领域中的一个热点问题。

1.1.1.1 水利工程对河流水文情势的研究

河流是一个完整的连续体,上下游、左右岸构成一个完整的体系,连通性是评判河道连续性的依据。高度连通性的河流对物质、能量的循环流动以及动植物的运动非常重要。大坝工程阻断了河流的自然流动,形成了顺水流方向的非连续性特征,将流动的河流分割成进口河流区、变动回水区、湖泊区和大坝尾水区等,不同流区流速、水温、水深及水流边界条件都发生了重大变化,将一个连续的整体分成了具有不同水文情势的不同的区域,导致其原有的河流水文情势发生很大的变化。人类自诞生以来,一直不断地改变着河流。特别是近100多年来利用现代工程技术手段,对河流进行了大规模开发利用,兴建了大量工程设施,不仅改变了河流的地貌学特征,而且也显著地改变了河流的水流情势。有学者估计,至今,全世界大约有超过60%的河流经过了人工改造,包括筑坝、筑堤、自然河道渠道化、裁弯取直等。一方面,这些工程为人类带来了巨大的经济效益;另一方面却极大地改变了河流自然演进的方向。大坝无疑是近代人类活动显著影响河流情势的一个典型。据统计,全世界坝高超过15m或者库容超过300万 m^3 的大坝有45000座。其中大约40000座大坝是在1950年以后建设的。Nilsson分析了全球水库建设对各大河流水文要素和生态系统的影响,认为大坝建设引起的问题相对其他人类活动较为严重。大坝对河流水文情势的影响主要体现在对河流连续性的破坏和对径流产生的显著的径流调节作用两个方面。一方面,大坝建设本身直接对河流产生了分割作用,使得坝上河流水体向湖泊水体特征转化,是一个人造的可调控湖泊,但水库和天然湖泊的水文特征不完全相同(表1.1)。大坝建设不但改变了河流的水力特性,而且切断了沿河物理特征差异性增加生物种类的过程。大坝的分割作用还导致对于水流和泥沙的蓄滞作用,从而扰乱了整个河流生态系统上下游之间的物质和能量的传递;另一方面,大坝的蓄水作用改变了河流原有的径流



模式，即大、小流量减少，中等流量增加，使流量过程在时间上重新分配，从而改变了河流的水文情势，包括河流高、低流量的频率，时空分布特性，以及河流的流动特性及其时空分布（图 1.1）。

表 1.1 水库与湖泊特征对比

特 征		湖 泊	水 库
定 性	属性	天然	人造
	形成	低洼地积水	河谷筑坝蓄水
	岸线发展系数	小	大
	最大深度的位置	湖中间	大坝处
	纵向梯度起因	因风生	吞吐流
定 量	流域面积/湖面面积	低	高
	水体滞留时间	很长	较短
	几何形态	U 形	V 形
	水动力条件	较有规律	变动很大
	搅动起因	自然	人为

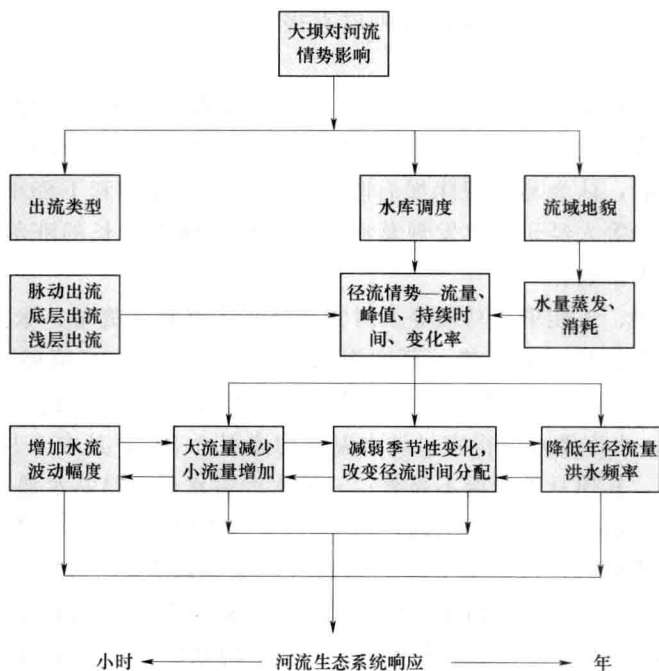


图 1.1 水库对河流水文情势的影响

布托林等指出伏尔加河上的高尔基水利枢纽工程地区，在天然状态下，河流枯水期平均流速的变化范围为 0.26~0.32m/s，但高尔基水库蓄水后，在距大坝约 50km 的回水区内，流速降低了 60%~70%。

Magilligana 采用 IHA 方法分析了美国 21 个水文站大坝建坝前后各水文特征参数的变



化情况,在此基础上分析了水文情势改变的生态影响。

GEEN 研究表明,自加拿大 Fraser 河上修建 Moran 坝之后,在其下游 150km 范围内的江段,8 月平均水温由建坝前的 15~19℃,降至建坝后 13.5~16.5℃。

Black 以近自然河流为参考状况,提出了 DHRAM 方法,该方法可用于评价水库蓄水对河流水文情势的影响,并且可以对水文改变进行分级,进而研究了对水生生物的影响。

Ebel 和 Beiningen 研究报道了哥伦比亚斯内克河整个流域的平均水温由于修建大量水利工程而提高。

Graf 研究了美国大坝建设对坝下水文和地貌的影响,采用 IHA 方法分析了水文情势变化,进而分析了河流地形的变化以及对河岸带生态系统的影响。

Nichols 研究了澳大利亚南部的梯级水库对河流生态系统的影响,从等级理论出发,分析了水文流量变化、河道地形变化以及水生生物变化情况。

Shieh 利用中度干扰假说评估大坝建设对河流环境的影响,采用 HEC-HMS 和 HEC-RAS 软件分析了水力参数如流量、流速、水深、水面宽度以及泥沙通量;并且采用 IHA 和 IHabA 评价了大坝建设前后流量和生境变化情况,最后采用 RVA 方法定量分析了水文和生境改变程度。

Suen 基于台湾地区濒危、外来以及广生性鱼类物种的栖息地以及生态需求,提出了 36 个生态水文指标,认为生态水文指标可以直接联系到鱼类群落流量需求、栖息地的物理条件以及生活习性。

夏自强、陈启慧教授采用 IHA 法分析了葛洲坝对长江径流的影响。从水文参数值及其统计特征(水文值的大小、发生时间、持续时间、发生频率和变化特征等)研究了葛洲坝对长江径流的影响,认为葛洲坝建坝后改变了流量的上涨率和下降率,使其趋于平缓。随后,徐天宝、彭静等人经研究也发现葛洲坝的修建对鱼类生长的涨落水过程影响较大,对鱼类的产卵会产生影响。

郭文献、邹振华、王桂华、马颖等人对宜昌站水文要素(流量、水温、泥沙)进行了研究:宜昌站年均流量呈下降趋势,葛洲坝修建以后,河流水流情势整体水文改变度为 29%,三峡水库 2003 年蓄水以来,多年平均流量减少 $1812\text{m}^3/\text{s}$,约占建坝前的 12.7%,7~11 月下降明显;水库蓄水使得宜昌站水温平均增温 0.3°C ,其中 1 月、2 月、5 月、12 月增温效应较明显,其他月份增温不显著;三峡水库蓄水后宜昌站水温月平均增温 0.4°C ,而对宜昌站各月水温影响程度大小不同,其中 3~5 月为降温,在 10 月至次年 1 月,水温增温明显;葛洲坝建坝后含沙量呈明显下降趋势,减少量为 $0.147\text{kg}/\text{m}^3$,约占建坝前的 20%,建坝后宜昌站含沙量各月份平均值均低于建坝前含沙量,尤其是 4 月、5 月、6 月、11 月和 12 月下降量较大;三峡蓄水后多年含沙量平均减少 $0.575\text{kg}/\text{m}^3$,减少量约占建坝前的 87.1%,各月份表现出不同的下降程度,其中在丰水期间下降量更大,含沙量的急剧减少。

余志堂研究了丹江口水利枢纽工程建坝前后水文条件的变化:建坝前,汉江中下游流量在 $250\sim 3300\text{m}^3/\text{s}$ 之间变动,水位月平均高程的变动幅度为 $88.8\sim 91.6\text{m}$,每年 5~8 月水位出现多次的明显涨落过程;而建坝以后,坝下江段流量的变化幅度缩小,冬季流量达到 $750\sim 900\text{m}^3/\text{s}$,坝下江段水位也较为稳定,变幅很小,变动范围为 $88.6\sim 89.6\text{m}$ 。



由以上分析可知,大坝工程影响到上下游一定范围内河段的水文水力过程变化,对坝下游水文情势规律变化产生影响。由于大坝对水文情势的影响是长期的、缓慢的、潜在的和极其复杂的,要深入认识大量水库群建设对河流水文情势的影响,必须紧密结合水库建设规模,建坝前后河流径流及其他水文要素的变化过程、特点,因此还有很多方面有待深入研究。

1.1.1.2 水利工程对河流生态系统的影响

20 世纪 50 年代以来,人们越来越重视水库、大坝的水文效应研究。1965 年曾召开过水库对环境影响的国际讨论会,而人们注意到大坝等水利工程的修建对河流生态系统产生负效应是在 20 世纪 70 年代。引起人们对美国大坝关注的原因主要有三点:①大坝建设的高潮发生在 19 世纪 60 年代,河流需要一定的时间调整,影响体现得较为明显是在 19 世纪 80 年代;②社会价值的转变,使得人们越来越注重河流生态环境;③河流生态恶化危机到动植物物种,引起研究和观测者的广泛关注。随后几十年内,国内外学者围绕着大坝修建引起的生态问题开展了大量的研究。

1978 年美国大坝委员会环境影响分会出版的 *Environmental Effects of Large Dams* 一书总结了 20 世纪 40~70 年代大坝对环境影响的研究成果,包括大坝的经济效益和社会效益,对鱼类、水生生物藻类、野生动植物、下游河道、水库和下游水质等方面的影响。这些研究主要集中在大坝对水体物理化学性质、生物个体、种群数量、河道变化等较小时空尺度方面产生的影响。

Ward 和 Stanford 针对大坝工程对河流生态系统的影响,提出“序列不连续体”概念,目的是解释大坝对河流生态系统结构和功能产生的相关效应,研究了水流调控对连续性产生的干扰,并作出预测。

Petts 将坝下游的响应归为 3 个层次:第一层次是流量、含沙量、水质、浮游生物等的前后差异,相当于下游河道输入各变量的变化;第二层次是河床形态、河底基质组成、大型水生植物密度等;第三层次是鱼类、无脊椎动物种群等。

Carothers 等通过对科罗拉多大坝的生态影响研究指出,每年流量变化的程度、泥沙冲淤和水温循环变化等是决定河流生物群落生境的重要特点,大坝修建后,水流流量、水温、输沙特性的变化是导致下游生态变化的重要原因。

Graf 研究指出大坝改变了下游河道水温、化学特性、流量范围,拦截了泥沙,并使下游河床发生冲刷、鱼类的迁徙受阻等,从而对河流野生鱼类、贝类、鸟类及其他水生动植物产生不利的影响,并指出恢复河流生态主要是恢复河流物理过程和形态的完整性。

Craig 等通过对鱼类生物多样性的研究指出,大坝改变了河流季节性的流量,减少了总的水量,同时使下游水温、溶解氧含量、泥沙及营养物含量发生了变化,这些对鱼类多样性产生了不利的影响。

L. A. Barmuta 和 P. S. Lake 研究指出,在水库下游,由于泄放深层滞水使得大型无脊椎动物消失,而那些泄放表层水的水库以及那些侵蚀极小的水库,在很大程度上并未削减下游的无脊椎动物。许多当地鱼类是洄游鱼,毫无疑问,由于水坝阻止大大减少了它们的游动,因而削减了它们的种群。

我国大型水利工程建设前,非常关注工程建设产生的生态环境效应,如三峡大坝的建



设,从20世纪50年代起就开始了可行性论证工作,对有关的地质、地理、水文、土壤、水生生物、鱼类资源、湖区环境、河口环境等进行了调查研究,积累了丰富的基础资料。对三峡工程可能的生态环境效应也做了大量的研究工作,如三峡建库后产卵场的位置与规模的变化、下游鱼类产卵涨水条件的破坏、鱼类捕食条件的变化、洄游性鱼类的阻隔、鱼类的搁浅等。

胡传新研究指出温度不仅直接影响有机体的代谢强度,从而控制水生生物的生长、发育、数量消长和分布等,还会影响食物丰度和水中物理、化学因素的动态,间接地支配生物的生活和生存。

杨宇和蔡玉鹏从生态水力学角度,分析了三峡水库建库后葛洲坝下游中华鲟产卵场生境要素的变化情况,并提出了保护措施。

王远坤利用建坝前后中华鲟葛洲坝下游产卵场的水力学环境进行了数值模拟,利用数值模拟结果计算分析了产卵场的平面涡强特征,建立了单位面积上中华鲟卵浓度与区域水平涡量之间的经验关系,得出中华鲟一般选择水平涡量强度较大的地方作为栖息位置,在涡量强度很大或较小的地方亦有中华鲟出现,但数量较少,水流动态过于平缓或剧烈不适合中华鲟生存。主产卵区属于水流紊动强烈地区,紊动剧烈的水流对中华鲟亲鱼具有一定刺激作用。

裴海峰从水质角度,分析了三峡水库蓄水后宜昌江段水质因子变化情况以及对中华鲟产卵的影响。

常剑波研究认为葛洲坝水利枢纽修建以后,中华鲟上溯至金沙江下游产卵场的通道被阻断,尽管现在能够在坝下江段自然繁殖,但由于产卵场范围较建坝之前大大缩小,其种群数量已明显下降。

张春光等研究了葛洲坝和三峡水利工程对长江胭脂鱼资源的影响,认为该工程阻碍了部分到中下游成长发育的胭脂鱼返回上游,导致长江上游胭脂鱼资源量的下降。

毛战坡等综述了大坝建设对河流生态系统的影响,分析了建坝对河流水文特性、生物要素、水生态系统结构和功能的影响。

刘树坤指出下游水温变化不仅对生态环境带来不利影响,同时对水中的生物有机体也会带来影响,特别是对下游鱼类的影响,如白鲟4~5月的繁殖水温要求达到 18°C 以上,若4月下旬水库下泄水温低于 18°C ,则会使白鲟的产卵时间推迟,缩短鱼类生长周期,甚至会导致白鲟产卵终止,鱼苗数量减少,加速白鲟的濒危。如果下泄水温降低幅度小,产卵场会向后推移,甚至永远消失,总体来说,产卵场的数量会减少。

柯福恩等研究认为葛洲坝水利枢纽修建以后,中华鲟上溯至金沙江下游产卵场的通道被阻断,尽管现在能够在坝下江段自然繁殖,但由于产卵场范围较建坝之前大大缩小,其种群数量已明显下降。

1.1.2 研究意义

长江上游(金沙江至宜昌段)地处北纬 $24^{\circ}37'\sim 35^{\circ}54'$,东经 $90^{\circ}13'\sim 111^{\circ}30'$,流域内河网密布,降雨量丰沛,径流量大,包含了我国5个水电能源基地,是我国最重要的水资源富集地区。根据长江上游主要河流的梯级开发规划,未来规划建设的大型水库多达30



余座,总库容约为 2000 亿 m^3 。2020 年以前,长江上游主要河流梯级水库布局将基本完成,将成为完全受到人工控制的渠化河道,长江上游 40% 的径流量将可能被水库拦蓄,通过水库调蓄增加的上游消耗性用水至少在 250 亿 m^3 以上,如果加上南水北调引水,长江上游未来预计将会减少来水 400 亿 m^3 。随着规划水电站的逐步实施,长江上游地区水库总库容将达到河川径流量的 61%,如果考虑大量的小型水库和塘库,水库控制的地表径流量将超过年径流量的 70%,长江上游干流绝大多数河段都将布满梯级水库,相当多的天然河流将转为人工控制的河道。同时,受到上游水库调节作用影响,长江干流的水文过程特性将发生根本性的变化,汛期洪水将被拦蓄而使径流减少,枯季径流会显著提高,而整个水文过程的周期(汛期起止时间,枯季起止时间)将会被人为缩短,长江上游地区具有人类活动的典型代表性。随着长江上游水利工程建设进程的加快,人类活动对径流、生态环境、局地气候的干扰逐渐增强,区域开发与生态环境保护之间的矛盾越来越突出。2008 年,三峡水库正常蓄水位由 145m 提高到 175m,为了保证水库蓄满,三峡水库蓄水时间从 10 月 1 日提前到 9 月 15 日,但 2008~2010 年三峡水库 10 月底仍未蓄满,这与长江上游干旱年径流量减少有密切的关系。考虑长江上游不出现干旱年,规划大型水库运行情况下,三峡水库在不提前蓄水或提前蓄水情况下能否满足水库蓄满是一个尚未解决的问题,直接关系到长江中下游地区防洪、航运、生态环境、干旱等一系列问题。本研究结合国家自然科学基金重大项目资助课题《大型水利工程对重要生物资源不利影响的补偿途径》(30490235),分析长江上游干支流流量的变化、长江上游主要大型水利工程对长江上游水文生态要素(流量、泥沙、水温)的影响以及长江上游降雨量的空间变化特征。在此基础上,利用改进 SWAT 模型、三峡水库生态调度模型,分析三峡水库在不提前蓄水情况下,不同蓄水时间及降雨量变化条件下对中游河道河流生态水文的影响做出初步探讨,为长江上游大型水利工程联合调度,长江中下游地区的生态环境保护,防洪规划,枯水期航运及对中下游的生态补水,减轻长江中下游地区枯水期干旱,遏制长江中下游以及洞庭湖、鄱阳湖地区的旱情以及新兴的“生态调度”研究提供参考。

1.2 研究内容

三峡枢纽工程投入运行后,长江上游大型水利工程建设迅速展开。随着运行水库的增加,河道径流的时空分布也将呈现新情势。长江上游水利工程建设对河流水文情势的影响将对中下游防洪、水资源利用形势和生态环境带来变化。本次研究依托国家自然科学基金重大项目《大型水利工程对重要生物资源不利影响的补偿途径》(30490235),分析宜昌水文站与长江上游干支流流量变化,主要大型水利工程建设对生态水文要素(流量、泥沙、水温)的影响,利用三峡水库入流模型(SWAT 模型)、出流模型(三峡水库的生态调度模型、水热平衡模型)模拟分析长江上游不同情景方案下(不同调度时间、降雨量变化)三峡水库下泄流量、水温的变化以及对中下游河道水文生态的影响。本次研究拟从以下 4 个方面开展:

1. 长江上游流域水文气象特征分析

以水文、降雨数据为基础资料,重点分析枯水期宜昌水文站、长江上游干支流流量变



化,在此基础上,分析长江上游主要大型水库建库前后出入库水文站水文要素(流量、含沙量、水温)变化;采用集对分析判定干支流流量变化是否同步;采用 REOF 分析长江上游降雨量的空间特征和演变趋势。

2. 水文循环模型的建立

基于长江上游流域水文、气象等资料数据,以跨流域调水的方式将长江上游人类取用水引入 SWAT 模型,以无控制措施的水库概化长江上游中型水库,构建长江上游水文循环模型——SWAT 模型。

3. 生态调度模型的建立

以防洪为主,以发电效益最大化为原则,兼顾中下游河道最小适宜性流量的调度规则及水热平衡原理构建了三峡水库生态调度模型。

4. 长江上游大型水利工程建设对中下游生态水文的影响

针对长江上游大型水利工程建设及降雨量变化,构建长江上游水库群不同蓄水时间(提前或推迟)、不同降雨量(降雨量敏感区洪枯期变化)情景方案,模拟分析不同情景下三峡水库下泄流量对中下游河道适宜性生态流量及中华鲟、四大家鱼产卵繁殖期流量涨幅变化、适宜性水温变化以及对中下游河道水文生态的影响。