

多维均衡生态调控理论与实践

——以长江流域为例

殷峻暹 张丽丽 蒋云钟 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

多维均衡生态调控理论与实践

——以长江流域为例

殷峻暹 张丽丽 蒋云钟 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

水电梯级开发在带来巨大社会经济效益的同时,不可避免地给流域或区域的生态环境造成一定的影响。本书依托“十一五”国家重大科技支撑计划课题——“三峡及长江上游特大型梯级枢纽群联合调度技术(2008BAB29B08)”研究成果,对多维均衡生态调控理论基础与技术体系进行了研究,并以长江流域为研究对象,结合长江流域生态环境问题,识别了长江中下游关键生态水文过程,构建了长江流域梯级枢纽多维均衡生态调控技术模型,分析了长江中下游环境流需求,确定了梯级枢纽生态调度目标,定量评估了梯级枢纽生态调控效果,提出了梯级枢纽生态调控技术准则,研究成果为保障长江流域健康可持续发展提供科学依据。

本书可作为长江流域的研究、开发、保护和管理工作者的参考用书,也可作为水利、环境、生态等相关专业的学生、老师和科研人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

多维均衡生态调控理论与实践:以长江流域为例 / 殷峻暹等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2011.12
ISBN 978-7-5084-9387-9

I. ①多… II. ①殷… III. ①长江流域—水环境:生态环境—研究 IV. ①X321.201.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281562号

书 名	多维均衡生态调控理论与实践——以长江流域为例
作 者	殷峻暹 张丽丽 蒋云钟 等 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 11印张 220千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	38.00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

前言

水电开发是人类利用水能资源的一种形式。事实证明，水电工程在防洪、发电、供水、灌溉、航运等方面发挥了巨大的作用，取得了显著的社会经济效益。与此同时，建库筑坝造成的通道阻隔、水库淹没、人为径流调节、水温结构变化等，改变了河流原有的水文、物理、化学和生态特征，进而对河流生态系统的结构和功能产生影响。

随着生态环境问题的日益凸显，生态环境保护意识的逐渐增强，人们逐渐认识到河流生态系统健康和可持续发展的重要性，并试图通过采取一定的人工干预措施，减缓建库筑坝对河流生态系统的影响。生态调控便是国内外河流生态系统修复实践中普遍采用的一种非工程措施之一，即将生态因子纳入到水库调度中来，改变传统的以兴利调度为主的运行方式，优化水库调度规则，制定合理的调度规程。但由于生态系统的复杂性、动态性、多维性，使得建立和求解水库生态调度模型存在一些难于克服的障碍，如生态价值和社会经济价值难以在同一经济价值平台核算，时空分布广泛的生态目标难以同时纳入到调度模型中。

《多维均衡生态调控理论与实践——以长江流域为例》一书提出了“多维均衡生态调控”的概念，以事后评估代替事前假定，通过对水电工程优化调度方案和调度结果的后评估，不断将生态指标纳入到生态调控模型中来，以期通过调整梯级水电工程的调度运行方式，促使河流向生态系统健康方向发展。在此基础上，以长江流域作为研究对象，结合长江流域梯级水电开发和工程建设情况，通过识别长江中下游重点生态水文过程，确定梯级枢纽生态调度目标，定量评估梯级枢纽生态调控效果，提出了梯级枢纽的生态调控准则，研究成果为保障长江流域健康可持续发展提供一定的科技支撑。

本书研究工作得到了国家自然科学基金创新研究群体基金项目“流域水循环模拟与调控”(51021006)、“十一五”国家重点科技支撑计划课题“三峡及长江上游特大型梯级枢纽群联合调度技术(2008BAB29B08)”北京市科技计划课题“北京市南水北调水质安全保障体系研究”(Z111100074511005)的资助。全书共分为9章,其中,殷峻暹负责编写了第2、第4、第5、第9章,张丽丽负责编写了第6、第7、第8章,于义彬负责编写了第1、第3章,祝雪萍参与编写了第7、第8、第9章,蔡文君参与编写了第4、第8章,潘明祥参与编写了第5、第6章,梁云参与编写了第1、第3章,康婧参与编写了第6章。全书统稿工作由殷峻暹、蒋云钟完成,王浩院士对全书进行了审核。此外,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!

本书在编写过程中,参考了大量的文献资料,这些成果是前人辛勤工作的结晶,保护他人的知识产权是每位学者必须遵守的品德,故作者在引用时尽量注明文献出处,如有遗漏,请原谅我们的疏忽。另外,由于时间和作者水平有限,书中错误和纰漏在所难免,恳请各位读者对本书的不足之处给予批评指正。

作者

2011年10月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 国内外研究与实践	3
第 2 章 多维均衡生态调控理论基础与技术体系	13
2.1 问题的提出	13
2.2 多维均衡生态调控的概念和内涵	15
2.3 多维均衡生态调控的理论基础与概念模型	19
2.4 多维均衡生态调控技术体系	22
第 3 章 长江流域概况及生态环境问题分析	26
3.1 研究区域概况	26
3.2 长江流域生态环境问题分析	34
3.3 长江流域生态环境特点	42
3.4 长江流域生态环境问题修复策略	43
第 4 章 长江中下游关键生态水文过程识别与评估	45
4.1 三峡工程对中下游生态水文过程的影响评估	45
4.2 关键生态水文过程及重点研究目标识别	59
第 5 章 长江流域梯级枢纽多维均衡生态调控模型技术	61
5.1 模型技术体系	61
5.2 环境流分析模型	62
5.3 多目标优化调度模型	65
5.4 水动力学模拟模型	67
5.5 生态水文评估模型	79
第 6 章 长江中下游环境流研究	83
6.1 典型鱼类环境流需求分析	83

6.2	洞庭湖生态水位控制需求	86
6.3	鄱阳湖生态水位控制需求	89
6.4	河口地区盐水入侵控制需求	97
第7章	长江流域梯级枢纽生态调度目标研究	104
7.1	梯级枢纽生态调度环境流需求分析	104
7.2	梯级枢纽生态设计流量过程提出的原因分析	109
7.3	梯级枢纽生态设计流量过程研究	116
第8章	长江流域梯级枢纽生态调控效果评估	124
8.1	梯级枢纽生态调控对中下游水文过程改变度的影响	124
8.2	梯级枢纽生态调控对中下游水文频率的影响	139
8.3	梯级枢纽生态调控对中下游重点研究目标的影响	146
第9章	长江流域梯级水电工程生态调度准则研究	150
9.1	人与河流和谐发展对梯级水电工程运行的要求	150
9.2	基于和谐理念的梯级水电工程生态补偿技术准则框架	151
9.3	梯级水电工程生态补偿技术准则研究	152
	参考文献	162

1.1 研究目的与意义

水是地球生命的来源，是人类和一切生物赖以生存的物质基础，水资源既是宝贵的自然资源和环境资源，又是重要的战略性经济资源，是一个国家综合国力的有机组成部分。水资源的状况制约着工农业的发展与布局，影响着人民物质生活水平的提高。随着人口的急剧增长和社会经济的快速发展，人类对水资源需求量不断增加，受到水资源时空分布不均匀性的影响，需要借助一定的水利工程措施对水资源的年内和年际分布进行一定的干预和调控，以满足人类不断增长的生产生活需求。因此，在过去的 50 年里，尤其是第二次世界大战以后，由于人口和经济的增长而造成的对灌溉、供水、水力发电需求的急剧膨胀造成大坝和水库数量的急剧增加。据统计，1950 年，全球共有大型大坝（坝高 15m 以上）5000 座，其中 3/4 位于北美、欧洲及其他工业化区域；到 2000 年，坝高 15m 以上的大型大坝已经攀升到 45000 余座，遍及 140 多个国家和地区。也就是说在 1950~2000 年的 50 年里，平均每天修建两座大型大坝。截止到 2006 年，在坝高 30m 以上的大坝中，中国有 5191 座，占全球的 1/10，位居世界第一；美国 1533 座，位于第二；其他国家依次为：日本 1075 座，西班牙 517 座，印度 504 座，土耳其 376 座，意大利 332 座。

中国是世界上人口最多的农业大国，又是世界上水旱灾害最严重的国家之一，兴水利、除水害一直是国家治国安邦的大事。1949 年，新中国成立以来，随着国家在水利基础设施投入的加大，水利工程建设发展速度突飞猛进。1949 年，全国只有 6 座大型水库、17 座中型水库和一些小型水库，总库容不足 300 亿 m^3 。截止到 2008 年年底，全国拥有大中小型水库 8.64 万座，总库容 6924 亿 m^3 ，为 1949 年的 20 多倍。其中大型水库（库容大于 1 亿 m^3 ）529 座，总库容约为 5386 亿 m^3 ，占全国总库容的 77.8%；中型水库（库容 1000 万~1 亿 m^3 ）3181 座，总库容 910 亿 m^3 ，占全国总库容的 13.1%。1949 年以前，海河、黄河、珠江、澜沧江等主要河流上基本上没有控制性水利工程，目前这些河流上基

本上有一座或多座控制性水利工程。2008年各水资源一级区的用水情况见表1-1和表1-2,其中,水资源开发利用程度最低的为西南诸河,仅为1.9%;水资源开发利用程度最高的为海河流域,为100.3%,其次为淮河流域和黄河流域,分别为67.1%和53.4%,远远超过国际公认的水资源合理开发程度30%和极限开发程度40%;长江流域、珠江流域以及松花江流域的水资源开发利用程度均处于合理开发程度之内。

表 1-1 2008 年全国水资源一级区已建水库分布情况表

水资源一级区	已建水库		大型水库		中型水库		小型水库	
	座数	库容 (亿 m ³)	座数	库容 (亿 m ³)	座数	库容 (亿 m ³)	座数	库容 (亿 m ³)
松花江区	2240	584	42	497	188	596	2010	278
辽河区	1254	393	39	350	106	298	1109	135
海河区	2063	3209	34	263	149	413	1880	166
黄河区	2731	827	28	730	177	629	2526	341
淮河区	8944	621	57	477	287	879	8600	558
长江区	42710	2313	167	1760	1100	2873	41443	268
东南诸河区	7172	567	47	442	274	760	6851	49
珠江区	16442	1096	81	757	685	201	15676	138
西南诸河区	2009	425	5	109	69	180	1935	136
西北诸河区	788	159	29	985	146	471	613	134
全国总计	86353	6924	529	5386	3181	910	82643	628

注 表中数据来源于《水利统计年鉴 2008》。

表 1-2 2008 年全国水资源一级区水资源开发利用程度 (%)

水资源开发利用程度	松花江	辽河	海河	黄河	淮河	长江	东南诸河	珠江	西南诸河	西北诸河
按多年平均水资源量计	27.6	40.7	100.3	53.4	67.1	19.6	12.8	18.6	1.9	50.3
其中:地表水	18.2	21.6	57.1	41.8	63.9	18.9	12.6	17.7	1.9	44.4
按当年水资源量计	41.8	51.4	126.1	68.7	58.4	20.6	19.8	15.5	1.9	48.4
其中:地表水	29.9	28.9	97.2	55.9	55.3	19.9	19.3	14.7	1.8	42.6

注 表中数据来源于《中国水资源公报 2008》。

毋庸置疑,水库和大坝的建设为人类社会和经济发展做出了重要贡献。据估计,水力发电提供的电能约占世界总电能的19%,世界上约1/3国家依靠水电来满足至少一半的电能需求。全球约1/2的水库主要是为灌溉修建的,全球约

12%~16%的粮食生产直接归功于水库大坝的修建。然而,当一座用于发电、灌溉、供水、航运为目的的水库建成后,改变了河流的自然流态和变化过程,改变了水生态系统的生态功能,对其赖以生存的生物产生影响。在《大坝与发展:一种新的决策框架》(Dam and Development: A New Framework for Decision-Making)中,世界大坝委员会明确指出:“大坝对人类发展贡献重大,效益显著;然而,很多情况下,为确保从大坝获取这些利益而付出了不可接受的,而通常是不必要的代价,特别是社会和环境方面的代价。以‘一个群体之所得,抵另一群体之所失’的资产负债表式的方法来评估,大坝的成本和利益是不能接受的,特别是在各界都已承诺保护人权和可持续发展的背景下。”^[1] 水库大坝对河流生态系统的影响途径可以简单归纳为4种:通道阻隔、水库淹没、人为径流调节、水温结构变化。如在1963年大峡谷上游的格林峡谷大坝竣工以后,科罗拉多河上就出现了一系列的连锁反应。随着大坝闸门的关闭,原来浑浊的红泥水被清澈透明的绿色水体取代,阳光穿过清澈的水体,促使水底生物和昆虫爆发性生长,改变了河流原有的食物链结构,适应浑浊水体的鱼类被如鲤鱼、鲮鱼等喜清水环境的外来鱼种所取代,如今大多乡土鱼种已基本绝迹。大坝修建前,水体温度在冰点和30℃之间上下波动,如今大坝下泄的水温基本稳定在9℃左右。在埃及尼罗河上的阿斯旺大坝修建以前,尼罗河的峰值流量和谷值流量的比例平均为12:1,大坝修建以后,两者的比例变成2:1。

随着生态环境问题的日益凸显,生态环境保护呼声的日益高涨,人们逐渐意识到要实现河流生态系统健康和可持续发展,必须做到河流开发与保护并重。通过实施一些工程措施、生物措施、管理措施,一定程度上可以减轻水库大坝建设对河流生态系统健康的影响。如为洄游性鱼类设置“鱼道”,为野生动物设置迁徙通道等。而改进水库调度方式,优化水库调度规则,制定合理的调度规程,以弥补或缓解建库筑坝对河流生态系统的影响,是国内外河流生态系统修复实践中普遍采用的一种非工程措施。目前,中国三横四纵的水资源开发利用格局已基本形成,各大流域水利工程建设也正在进行之中,如何将生态因素纳入到水库调控中,结合兴利调度和防洪调度,综合考虑社会、经济、生态、环境等各方面因素,制定科学合理水库调控方式,使得水库调度在满足社会经济需求时,减缓建库筑坝对河流生态系统的影响,是一个亟待深入研究的课题。

1.2 国内外研究与实践

1.2.1 建库筑坝的生态水文效应

河流是由左右岸和上下游构成的一个整体,自然河流具备高度的纵向连续性和横向连通性,河流系统是由一系列不同级别的支流形成的完整系统。在河流上

大规模筑坝拦截河流水量（主要用于发电、灌溉、控制洪水等），是河流生态环境受人为影响最显著、最广泛、最严重的事件之一^[2]。据统计，在全球 292 条大河中，36% 受到强烈影响，23% 受到中等影响，只有 41% 基本未受到影响^[3,4]。2003 年国际大坝委员会统计资料表明，全球大坝总数近 49697 座，控制着全球 20% 左右的径流量^[5]。大坝建设人为的改变河流原有的物质场、能量场、化学场和生物场，直接影响生源要素在河流中的生物地球化学行为，从而对河流生态系统中的物种组成、栖息地分布等产生影响^[6]。大坝建设首先影响河流生态系统的非生态变量（如水文、水量、泥沙、水质等），进而影响流域地形地貌和初级生产力，最后对高等生物群落产生影响，其影响过程见图 1-1^[7,8]。

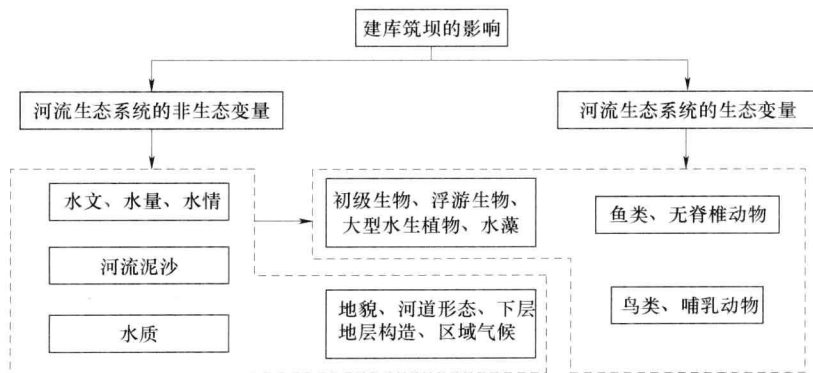


图 1-1 建库筑坝对河流生态系统的影响

大坝的生态效应研究是从大坝建设对洄游鱼类的影响开始的^[9,10]，20 世纪 40 年代，美国的资源管理部门就开始关注由于大坝建设而导致的渔场减少问题^[11]。1978 年美国大坝委员会环境影响分会出版的《大坝的生态环境效应》（Environmental Effects of Large Dam）一书总结了 20 世纪 40~70 年代大坝对环境影响的研究成果，主要包括大坝对鱼类、藻类、水生生物、野生动植物、水库蒸散发、下游河道、下游水质等的影响。建库筑坝通过通道阻隔、水库淹没、人为径流调节等途径改变了河流的水文、物理、化学、生态特征等，从而影响了河流生态系统的结构和功能^[12]。

1. 对水文过程的影响

建库筑坝切断了河流的连续性，导致河流水面线由自然的连续状态变成阶梯状，使河流沿水流方向呈现非连续化、片段化。蓄丰补枯的径流调节方式改变了河流天然流态，对河流的水文、水力学特征产生影响。筑坝蓄水形成的水库引起水动力学条件的改变（流速减缓），导致颗粒物迁移、水团混合性质等发生显著变化^[3]，强水动力学条件下的河流搬运作用，将逐渐演变成成为弱水动力学条件下的“湖泊”沉积作用^[13]。Grany 大坝水力发电产生的脉动泄流引起科罗拉多河

流量明显波动,流量从自然状态下的 $0.57\text{m}^3/\text{s}$ 急剧上升到 $5\sim 9\text{m}^3/\text{s}$,下泄流量冲刷了下游河道的泥沙和藻类^[2]。三峡大坝蓄水后,库区水体的平均深度增加,库区的水流速度锐减,库区水体的滞留时间较建坝前增加了4倍^[14]。丹江口水库建成后,坝下江段流量的周年变化幅度缩小,坝下江段水位也较为稳定,周年变幅很小^[15]。黄河干流大型水库建设后,水库下游汛期实测径流量占全年径流量的比例减小,非汛期增加,水库运用改变了黄河干流水体交换周期^[16]。

2. 对物理过程的影响

水库大坝的建设改变了流域水量的分布和受感河段的水位,引起了水温在河流沿程方向和水深方向的梯度变化。水库底部深处下泄的水流,夏季比河水水温低,冬季比河水水温高;水库上层顶部附近下泄的水流,全年都比河流水温高^[17]。水库的温度分层将直接影响生源要素在水库中的迁移、循环和更新速率^[18]。对多数水库而言,水库具有比自然湖泊更强的河流水量补给和换水频度,太阳辐射和热量传输不平衡导致水库水体的季节性分层^[16]。科罗拉多河上格伦峡谷大坝修建以后,水库水温由建库前的 $0\sim 27^\circ\text{C}$,变化到建库后最高不超过 8°C 。瑞士的提契诺河梯级水库库区夏季平均水温比建库前高,冬季水温比建库前低,但坝下河流夏季水温比建库前低,冬季水温比建库前高;且水温的波动范围很小,波动频率远远高于建库前^[19]。红水河天生桥一级水库下泄水流使龙滩水库入库年平均水温降低 3.9°C ,最高降幅达 6.3°C ^[20]。水库水体的季节性分层,直接导致水体垂直剖面上不同水团的物理、化学特性的差异,上层水体的强烈混合使得水体中溶解氧含量较高,下层水体缺乏复氧机制补偿溶解氧,使得水体溶解氧呈典型的 Clinograde 分布^[21]。水体温度的变化有利于冷水物种生长繁殖,导致温水植物多度的降低以至于物种灭绝^[21],同时也会影响坝下河流中生物的生长繁殖,特别是鱼类^[22]。

3. 对化学过程的影响

水库大坝建成后,库区水流流速降低,流速趋于稳定,改变了营养盐输移转化规律,导致库区富营养化程度加剧。如乌江干流的乌江渡水库建成后,库区总磷严重超标,水质总体下降,富营养化趋势明显^[23];美国密苏里河的 Callahan 水库,出流水体的磷酸盐含量比入流降低50%,悬移质中总磷含量降低4倍^[13]。蓄水后水位抬高,库尾回水区及支流的水流流动和波动明显减缓,水体纳污能力明显降低,导致“水华”等水污染事件发生。据长江水利委员会水资源保护局的《长江发展和保护报告》指出:2003年三峡库区蓄水至135m以后,12条一级支流在汇水区出现不同程度的“水华”现象。对于香溪河、大宁河、小江等支流,蓄水后每年春夏季节均发生“水华”,2004年累计发生“水华事件”6起,2005年累计发生“水华事件”19起,2006年仅2~3月累计发生“水华事件”10余起^[24]。水库蓄水后,形成广阔的水域面积,在气候炎热的干旱地区,库区大量

的蒸散发活动导致水体盐度增加。

4. 对地形地貌过程的影响

自然河流具有冲淤输沙能力, 水库大坝拦截了部分泥沙, 促使库尾地形迅速抬高, 而水库的清水下泄, 加剧了下游河道的冲刷, 导致大坝下游河道将变深变窄, 使得由诸多礁石、沙滩、浅滩、河湾组成的复合型弯曲河道变得相对简单平直。据估计, 世界上所有水库每年要截留 $5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的泥沙, 约等于全球水库库容的 1%。美国科罗拉多的格伦峡谷大坝每年截留泥沙 6.6 亿 $\text{t}^{[25]}$ 。澜沧江漫湾水库蓄水运行 3 年后, 坝前库底最低高程已升高到 913.8m, 比建库前抬高了 30m^[11]。乌江渡水库运行前 5 年, 坝前淤积达 650m, 淤积厚度达 40m, 泥沙淤积共 2 亿 $\text{t}^{[26]}$ 。丹江口水库在 1960~1993 年的 33 年中, 累积淤积 $1.4 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占整个库容的 8.1%^[23]。水库清水下泄导致河床再造, 而河床、河岸带是重要的生物栖息地, 没有充足的泥沙来源, 河心洲中的物种和生境也随之消失^[27]。

5. 对生物过程的影响

河流蓄水形成水库后, 库区流速变缓, 透明度提高, 有机物和营养盐增加, 使得水生生态体系由“河流型”异养体系(以底栖附着生物为主)向“湖沼型”自养体系(以浮游生物为主)演化^[28], 有利于浮游及低等生物的生长繁殖, 喜缓流和静水的鱼类数量增加^[29]。在塞内加尔河, 水库中淡水滞留有利于一种很高的宽叶香蒲迅速生长, 除了为风景增加绿色外, 一无用处, 不仅增加水体的蒸散发量, 且导致渔业受损^[30]。

建库筑坝影响了河流纵向连续性和横向连通性, 改变了水生生物栖息繁殖的生境条件, 阻隔了洄游性鱼类的洄游通道, 损害了部分陆生植物的栖息地, 进而对其赖以生存的水生、陆生动植物产生影响。葛洲坝水利枢纽修建后, 中华鲟上溯至金沙江下游产卵场的通道被阻隔, 产卵场被压缩至葛洲坝坝下不到 8km 的河段^[31]。三峡和葛洲坝建成后, 长江胭脂鱼资源量下降, 主要是该工程阻碍了部分到中下游成长发育的胭脂鱼返回上游^[32]。丹江口水库修建后, 导致坝下江段鱼类繁殖季节滞后 20d 左右, 且出生的幼鱼个体较小、生长速度缓慢^[33]。美国犹他州的格林河上的弗莱明峡大坝于 1967 年运行后, 格林河下游虹鳟鱼生长速度减缓、濒危鱼类数量下降^[34]。Morita 等构建了逻辑斯蒂模型, 分析了大坝建设对嘉鱼的影响, 结果表明, 由于大坝的屏障效应, 87.5% 的嘉鱼和 1/3 的栖息地将在 50 年后消失^[35]。

1.2.2 河道内外环境流需求分析

自 20 世纪 40 年代, 随着水库建设和水资源开发利用程度的提高, 美国资源管理部门开始关注渔场减少的问题。美国鱼类和野生动物保护协会对河道内流量进行了许多研究, 主要是关于鱼类生长繁殖和产量与河流流量关系, 从而提出了

河流最小环境流量的概念^[36]。此后,随着流域管理目标和管理模式的变化,生态需水的理论和方法取得了长足发展,出现了一系列有关生态环境需水的概念,如生态需水、生态用水、环境需水、环境用水、生态环境需水、生态环境用水、环境流等。下面从基本概念解析入手,对环境流的研究方法及发展历程进行综述。

1. 概念解析

(1) 生态需水:维持生态系统中具有生命的生物物体水分平衡所需要的水量^[37]。

(2) 生态用水:根据当前生态系统所处的状态所对应的需水量,为维持现状或者在不同状态之间转化系统所消耗的水量^[38]。

(3) 环境需水:为保护和改善人类居住环境及其水环境所需要的水量^[37]。

(4) 环境用水:改善水质、协调生态和美化环境的用水^[39]。

(5) 生态环境需水:在水体生态系统本身生态需水的基础上,满足对环境具有不同功能要求的需水^[38]。

(6) 生态环境用水:广义生态环境用水是指维持全球生物地理生态系统水分平衡所需要的水,包括水热平衡、生物平衡、水沙平衡、水盐平衡等所需要的水量,狭义生态环境用水是指维护生态环境不再恶化并逐渐改善所需要消耗的水资源总量^[40]。

(7) 环境流:为维持河流生态环境需要保留在河道内的基本流量及过程^[41]。

对比生态需水、生态用水、环境需水、环境用水、生态环境需水、生态环境用水、环境流的基本概念可以发现,无论生态需水还是环境需水,主要是指维持生态环境功能所需的水量,重点强调生态或环境需水的“总量”;“环境流”主要是指维持河流生态系统基本功能所需的流量过程,重点强调生态或环境需水的“过程”,故环境流除了包括水量、流量、水位等基本水文要素之外,还包括流量变化率、持续时间、发生时机以及河流物理、化学、地形地貌、生物等指标因子,如水温、含沙量、溶解氧、矿化度、COD、BOD等。

其实,环境流(environmental flows)的概念最早出现在20世纪后期的西方国家,其初衷是为无限扩张的人类用水设定一个不可逾越的界限,以恢复河流的自然功能,实现人类利益和其他群体利益的平衡、人类近期利益和远期利益的平衡^[42]。环境流分为狭义和广义两种,狭义环境流针对河流自然生态系统的用水需求,维持河流生态环境所需要的流量或水量;广义环境流是指除了满足河流自然生态系统用水需求之外,还要满足人类生产生活用水需求的流量或水量。目前,国内外关于环境流的定义有很多,童国庆认为环境流是指保留或者释放到河流生态中的流量,其目的是为了管理生态系统,如果不能保持河流的环境流,将会导致河流生态系统退化^[43]。Megan等认为环境流是指在有竞争性用水需求的

地区,除了获取水的社会经济效益外,在尽可能的范围内实施水量调配以维系生态系统健康的水流过程^[44]。

仔细分析环境流的基本概念,可以发现其有两层基本含义:一是从河流自然生态系统本身出发的,维持河流生态环境健康需要的流量过程;二是“保留”在河道内的流量过程,强调人类在水资源调度及河道配水活动中的主观能动性。

2. 计算方法

有关生态需水的计算方法有很多,全球生态需水计算方法超过200种^[45],包括河流、湿地、湖泊、植被、城市、地下水等不同类型水生态系统,河道内和河道外生态需水的计算方法,尤其以河道内生态需水研究较为系统完善。

目前,关于河道内生态需水的计算方法大致可以分为四类:水文学法、水力学法、栖息地法、整体法。水文学法也称作“历史流量法”,是利用历史流量资料来推导河流生态流量。主要方法有Tennant法^[46]、Texas法^[47]、NGPRP法^[48]、基本流量法^[49]、最小月平均流量法^[50]、逐月频率法^[51]、枯水年天然径流估算法^[52]等。水力学法是应用现场数据,分析河流流量与鱼类栖息地指示因子之间的关系。主要方法有湿周法^[53]、R2CROSS法^[54]、CASMIR法^[55]等。栖息地是植物和动物能够正常生活、生长、觅食、繁殖以及进行生命循环周期中的重要组成部分,栖息地法是根据指示物种所需的水力条件确定河流流量的一种方法。主要方法包括有效宽度法^[52]、加权宽度法^[52]、河道内流量增加法^[53]、RCHARC法^[55]、Basque法^[56]等。整体法是从研究区域生态环境整体性出发,通过研究河道内流量、泥沙运输、河床形状、与河岸带群落之间的关系,确定河流生态流量的一种方法。主要方法包括南非的BBM法^[53]、澳大利亚的整体评价法^[57]等。此外,还有针对水生态系统特殊需求设定生态需水量计算方法。针对水质目标的十年最枯月平均流量法^[58]、水质目标设定法^[59],维持河流冲刷和侵蚀动态平衡的输沙需水量计算方法^[59,60]。

对比各种计算方法可以发现,水文学法不需要现场测定数据,简单快速,但因缺乏考虑生物需求和生物间的相互作用,具有较大的任意性,存在地区适用性问题,一般用于河流系统优先度不高的河段,或者作为其他方法的一种检验。水力学法只需简单的现场测量,包含了河道断面形状、流速、水深等水力参数,不需要详细的物种—生境关系信息,数据相对容易获得;但该方法假定河道在时间尺度上是稳定的,忽视了流速和河道断面的变化,未能考虑具体生物物种不同生命阶段的用水需求^[61],没有体现河流的季节性变化因素^[62]。栖息地法是在水力学的基础上考虑了水量、流速、水质和水生物等各种因素,考虑了生物物种在不同生命阶段的栖息地变化,故对水生态系统有足够的了解,掌握一定的生物资料数据,这对于生态监测资料匮乏地区来说是比较困难的。整体法综合了专家小组意见和生态整体功能,克服了栖息地法只针对一两种生物的缺点,强调河流生态

系统的整体性,但由于该方法需要更多的生态数据,其应用范围受到限制。

对于河道外生态需水而言:针对植被生态需水的面积定额法、潜水蒸发法、改进彭曼公式法等^[63-67],基于遥感和地理信息系统的计算方法^[68]。针对城市景观用水、城市绿化和园林建设用水、公园湖泊用水以及控制地面沉降用水的城市生态需水计算方法^[69,70],针对湖泊生态用水需求的水量平衡法、换水周期法、最低水位法、功能法等^[71]。

目前,对河道内生态需水研究较多,河道外需水研究相对较少,河道内生态需水计算方法相对系统完善,且研究主要集中在生态用水矛盾较为突出、生态环境相对脆弱的地区,中国主要集中在干旱半干旱地区,如黄河流域、海河流域、淮河流域等。生态环境需水量(水位)大多是指人类开发利用前的天然状态的河道需水量,对于人类活动频繁、社会经济用水和生态环境用水矛盾突出的河道用水现状,指导意义有限。

1.2.3 水库生态调度

水库是一种具有特殊形式的人工和天然结合的“人工湖泊”,体现了人类利用自然和改造自然的智慧。但是,水库阻断了天然河道,导致河道的流态发生了变化,进而引发了整条河流上下游和河口水文特征的变化。现行水库调度方式(兴利调度和防洪调度)在保障经济社会发展的同时,也引起了一系列的流域生态和环境问题,致使河流生态系统健康受到严重的威胁。因此,建立水库运行管理新理念新模式对于缓解生态环境日趋恶化的局面是非常必要的。水库生态调度就是将生态因子纳入到现行的水库运行调度中来,通过调整水库的运行调度方式,减轻、缓解拦河筑坝对生态环境造成的负面影响。

1. 国外相关研究

以美国为代表的西方发达国家,包括亚洲的日本、印度等,在修建水利水电工程与实施水利水电工程调度方案时,都对河流生态问题给予了足够重视。早在20世纪70年代,国外学者就开展了水利水电工程与生态问题研究,但这些研究主要集中在水库对生态环境影响的识别方面。近20年来,随着人们生态环境意识逐渐增强,避免、减轻和缓解水库对生态环境影响的措施是当前国际上研究的热点和焦点。

美国加利福尼亚州的中央河谷工程(CVP)始建于20世纪20年代,包括大约20座水库。1937年美国的农垦法提出,“CVP的大坝与水库首先应用于调节河流、改善航运和防洪;其次,用于灌溉和生活用水;第三用于发电”。20世纪90年代,CVP修改了1937年法规并专门指出,CVP的大坝与水库现在应当“首先用于调节河流、改善航运与防洪;其次用于灌溉与生活用水及满足鱼类与野生动物需要;第三用于发电和增加鱼类与野生动物”^[72]。1996年,美国联邦能源委员会(FERC)在水电站运行许可审查过程中,要求针对生态与环境影响

制定新水库运行方案,包括提高最小泄流量、增加或改善鱼道、周期性大流量泄流和陆域生态保护措施等^[73]。20世纪90年代,田纳西流域管理局(TVA)以下游河道最小流量和溶解氧浓度为指标,对20个水库调度运行方式进行了优化调整。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^[74]。Cavallo A^[75]、Lence Barbara J^[76]等研究了各种水库生态调度模型,并在实际工程中应用。

1995年日本河川审议会的《未来日本河川应有的环境状态》报告就指出推进“保护生物的多样生息和生育环境”、“确保水循环系统健全”、“重构河川和地域关系”的必要性,1997年日本对其河川法做出修改,不仅治水、疏水,而且“保养、保全河川环境”也写进了新河川法。鉴于认识到筑坝使下游河流水流稳定而丧失活力,导致河床形态改变和浸水频率减少;沙石供给减少使河床下降、河床材料粗粒化,这些变化最终导致多种生物的栖息地减少。日本通过弹性管理大坝对下游放水、将蓄沙堰临时沉积的泥沙还原给大坝下游、设置排沙闸来提供泥沙等新尝试,尽可能使因泥沙供给、移动造成的对自然环境冲击得到恢复^[77]。

此外,在非洲南部的津巴布韦,研究人员在Odzi河的Osborne水库观测站开展研究,运用Desktop模型,估算河流的生态环境需水流量,为水库调度提供了切实可行的指导^[78]。在澳大利亚,要求每个州和地区都要对“水依赖的生态系统”做出评价,并提出水的永续利用和恢复生态系统的分配方案。水的分配方案必须要考虑到5~10年之后可能出现的情况,通过一些数据指导重新调整径流的季节变化特征以达到最佳生态状态^[79]。

2. 国内相关研究

水利水电工程为人类带来经济效益的同时,却对生态系统产生了胁迫,威胁着人类的可持续发展。生态调度就是将生态因子纳入现行水利水电工程运行调度中,充分考虑生态系统的健康状况,通过调整水利水电工程的运行调度方式,减轻、缓解拦河筑坝等人类活动对生态环境造成的负面影响。目前,我国水利水电工程的运行调度主要是围绕防洪、发电、灌溉、供水、航运等综合利益而进行的。因此,现行水利水电工程管理和调度运行模式的主要任务是处理、协调防洪和兴利的矛盾以及兴利任务之间的矛盾^[80,81],较少考虑生态与环境需水,但水利工作者并没有忽视生态问题的存在。水利部黄河水利委员会在1964年就利用三门峡水库两次进行人造洪峰试验;2002年又利用小浪底水库进行了调水调沙试验,达到输沙入海、减轻下游河道淤积的效果;长江流域在规划金沙江中游水电工程时,明确提出发电流量不得低于生态基流,以满足下游基本生态需水和景观要求;丹江口水库为控制汉江下游水体富营养化,加大枯季下泄流量;三峡水库针对下游水文情势改变对荆江段“四大家鱼”产卵场产生不利影响这一问题,拟调整三峡水库调度方案,制造人造洪峰来诱导产卵^[82]。太湖流域调整河