

水能梯级开发 生态影响评价

李绍才 孙海龙 龙 凤 著



科学出版社

水能梯级开发生态影响评价

李绍才 孙海龙 龙 凤 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书依托公益性行业科研专项经费环保项目《生态型水能梯级开发的评价指标阈值构建与示范(200809086)》,基于流域水资源保护、管理及可持续利用理念,系统总结水能梯级开发生态影响评价综合研究成果,为流域水资源保护和管理提供新思路和方法。本书主要内容包括:水能梯级开发行为表征及度量;水能梯级开发对流域生态系统的影响特征与规律;水能梯级开发生态影响评价指标和阈值;基于流域生态影响阈值的水库群调度模型等,最后通过案例研究,对某流域水能梯级开发的生态影响进行了评价,并提出了减少生态影响的水能梯级开发优化方案。

本书可供环境科学、生态学、水资源管理和水利工程学等学科研究工作者、高校师生参考,也可作为环境管理和水资源管理部门的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

水能梯级开发生态影响评价/李绍才,孙海龙,龙凤著. —北京:科学出版社,2014.3

ISBN 978-7-03-039988-5

I. 水… II. ①李…②孙…③龙… III. ①水利资源-梯级开发-环境生态评价 IV. ①TV213②X826

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 041226 号

责任编辑:马俊 孙青 / 责任校对:郑金红

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京威通印刷股份有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



2014 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张:10 插页:2

字数:189 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

序 言

我国作为一个发展中的人口大国,资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作,提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下,“十一五”环境保护工作成效显著,在经济增长超过预期的情况下,主要污染物减排任务超额完成,环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长,资源环境约束进一步强化,环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减,环境质量改善的压力不断加大,防范环境风险的压力持续增加,确保核与辐射安全的压力继续加大,应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点,解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题,确保环保工作不断上台阶出亮点,必须充分依靠科技创新和科技进步,构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年,我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》(以下简称《规划纲要》),提出了建设创新型国家战略,科技事业进入了发展的快车道,环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求,原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会,出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》,确立了科技兴环保战略,建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来,在广大环境科技工作者的努力下,水体污染控制与治理科技重大专项启动实施,科技投入持续增加,科技创新能力显著增强;发布了502项新标准,现行国家标准达1263项,环境标准体系建设实现了跨越式发展;完成了100余项环保技术文件的制订、修订工作,初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构,支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动,“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技

部的总体部署,环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题,立足环境管理中的科技需求,积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间,环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 234 项,涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域,共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与,逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前,专项取得了重要研究成果,提出了一系列控制污染和改善环境质量技术的方案,形成一批环境监测预警和监督管理技术体系,研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术,提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议,为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果,及时总结项目组织管理经验,环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果,具有较强的学术性和实用性,可以说是环境领域不可多得的资料文献。丛书的组织出版,在科技管理上也是一次很好的尝试,我们希望通过这一尝试,能够进一步活跃环保科技的学术氛围,促进科技成果的转化与应用,为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011 年 10 月

前 言

20 世纪中叶以后,水电开发的规模和影响不断扩大。大坝越建越高,水库越来越大,随之而来的水库土地淹没和移民也越来越多,水电开发对环境的影响也越来越引起人们的关注。水能梯级开发对流域生态系统的扰动强烈,而我国水能开发区域主要集中在中西部典型生态环境脆弱地区,这与我国生态脆弱区保护及恢复之间的矛盾突出。开展水能梯级开发生态影响评价研究,对于科学合理推动流域水资源的开发利用,推进流域生态环境管理工作具有积极意义。

水能梯级开发对流域生态系统的影响具有群体性、系统性和累积性特征。目前水能开发的生态影响研究,主要集中在单个电站的局部影响阶段,对流域系统多级电站影响的驱动力和累积性问题研究不够深入,缺乏诸多层次影响效应的模拟模型,使得水能梯级开发生态影响特征难以有效揭示及度量,无法进行科学、可行的影响评价。为解决这些问题,需要站在流域系统尺度,认识水能梯级开发生态影响的本质与规律,并建立具有系统性及可操作性的评价方法。

本书以流域水能梯级开发为背景,从水能梯级开发行为的表征与度量出发,分析其对生态系统的影响与驱动本质,揭示水能梯级开发对生态因子的影响特征与规律,构建水能梯级开发生态影响评价指标框架,建立水能梯级开发生态影响评价阈值,开发基于生态影响阈值的水库群调度模型与软件。在此基础上,以某流域水能梯级开发为评估对象,进行了生态影响评价的综合示范应用,提出了降低水能梯级开发生态影响的优化策略与方法。

感谢四川大学曹叔尤教授、林鹏智教授,中国水电顾问集团成都勘测设计研究院卢宏伟副院长的悉心指导;为本书出版做过贡献的人们,他们是四川大学罗麟教授、辜彬教授,三峡大学徐刚副教授等,李绍才教授的研究生田甜、陈敏等参与了水能梯级开发生态影响评价指标与阈值的相关研究工作,以及科学出版社编辑付出辛勤劳动,在此深表谢意。同时还要感谢国家环境保护部科技标准司、四川省环境保护厅、中国水电顾问集团成都勘测设计研究院的大力支持,在此一并致谢。

限于我们知识水平和实践经验,书中疏漏和缺点在所难免,衷心希望广大读者提出批评指正。

作 者

于 2013 年 7 月 10 日

四川成都

目 录

序言

前言

第 1 章 水能梯级开发行为表征及度量	1
1.1 引言	1
1.2 水能梯级开发模式	1
1.2.1 水能利用形式	1
1.2.2 水能梯级开发模式	4
1.3 水能梯级开发行为特征	7
1.3.1 水资源特征	7
1.3.2 水环境特征	8
1.3.3 水生态特征	8
1.4 水能梯级开发行为度量	9
1.4.1 梯级电站数量(N)	9
1.4.2 分级回水长度(L)	10
1.4.3 梯级分级库容(V)	10
1.4.4 年发电量(E)	10
1.4.5 分级下泄量(Q)	11
1.4.6 淹没土地(S)	11
第 2 章 水能梯级开发对生态因子的影响	12
2.1 引言	12
2.2 水能梯级开发生态响应因子的层次结构	12
2.3 水能梯级开发对非生物因子的影响	13
2.3.1 水能梯级开发对流域水文的影响	13
2.3.2 水能梯级开发对河流形态的影响	43
2.3.3 水能梯级开发对流域气候的影响	51
2.3.4 水能梯级开发对覆被变化的影响	53
2.3.5 水能梯级开发对廊道连通性的影响	55
2.4 水能梯级开发对生物因子的影响	57
2.4.1 水能梯级开发对水生生物的影响	58

2.4.2 水能梯级开发对陆生生物的影响	63
第3章 水能梯级开发生态影响评价指标	67
3.1 引言	67
3.2 水能梯级开发生态影响评价指标构建原则	67
3.2.1 科学性原则	67
3.2.2 整体性原则	67
3.2.3 动态性原则	68
3.2.4 实用性原则	68
3.2.5 主导性原则	68
3.3 水能梯级开发生态影响评价指标构建流程	68
3.4 水能梯级开发生态影响评价指标构建方法	70
3.4.1 水能梯级开发生态因子响应网络	70
3.4.2 水能梯级开发生态影响评价指标层次	70
3.4.3 水能梯级开发水生生态完整性评价指标	72
3.4.4 水能梯级开发陆生生态完整性评价指标	76
3.5 水能梯级开发生态影响评价指标框架	78
3.5.1 水能梯级开发生态影响评价指标框架	78
3.5.2 水能梯级开发生态影响评价指标属性	79
第4章 水能梯级开发生态影响评价阈值	83
4.1 引言	83
4.2 水能梯级开发生态影响评价阈值构建流程	83
4.3 水能梯级开发生态影响评价指标权重	84
4.3.1 专家咨询问卷设计	85
4.3.2 指标权重计算	85
4.4 水能梯级开发生态影响评价阈值等级	88
4.4.1 评价指标阈值等级划分方法	88
4.4.2 评价指标阈值等级划分	90
4.5 水能梯级开发生态影响评价阈值	98
4.5.1 综合评价阈值等级	98
4.5.2 综合评价阈值	99
第5章 基于生态影响阈值的水库群调度模型	100
5.1 引言	100
5.2 基于生态影响阈值的流量模型	101
5.2.1 生态阈值流量模型	101
5.2.2 生态阈值流量计算	102

5.3 基于生态影响阈值的多目标优化决策水库群调度模型	104
5.3.1 模型构建	104
5.3.2 模型求解算法	105
5.4 水库群水量分配调度软件	111
5.4.1 基于 GIS 技术的水库群水量分配调度软件	111
5.4.2 系统采用的关键技术	113
第 6 章 水能梯级开发生态影响评价示范——以某流域为例	116
6.1 引言	116
6.2 评价工作流程	116
6.3 某流域水能梯级开发工程概况	117
6.3.1 某流域干流梯级规划概况	117
6.3.2 工程概况	118
6.3.3 梯级工程指标	119
6.4 生态现状调查	120
6.4.1 水生生态系统现状调查	120
6.4.2 陆生生态系统现状调查	123
6.5 生态影响预测	128
6.5.1 水生生态系统影响预测	129
6.5.2 陆生生态系统影响预测	131
6.6 生态完整性评估与优化	133
6.6.1 生态完整性评判与分析	133
6.6.2 优化途径与替代方案	135
主要参考文献	144
图版	

第 1 章 水能梯级开发行为表征及度量

1.1 引言

水能是人类目前唯一可大规模开发应用的可再生清洁能源,是我国能源战略结构的重要组成部分。我国是世界上水能资源最丰富的国家之一,全国水能蕴藏量约 6.8 亿 kW,经济可开发容量为 3.8 亿 kW,但我国水能资源地域分布极不均匀,主要集中在生态脆弱的黄河上游、长江上游干流的金沙江和支流雅砻江、大渡河、乌江以及与金沙江并流的澜沧江、怒江等河流。按照我国能源中长期发展规划,到 2020 年全国水电总装机容量将达到 3 亿 kW,水电开发利用程度将达到约 75%,根据我国流域水能资源的特点,规划的水能梯级开发占总开发量的 80%,是我国水能利用的最主要开发形式。

水能梯级开发是指在河流或河段上布置一系列阶梯式水利枢纽的开发方式,主要目的是为了充分利用河流落差和渠化河道,最大限度地开发河流的水能资源。水能梯级开发在极大推动经济社会发展的同时,其引起的生态问题也日益显现,如河流水动力条件改变、传统的饵料输送过程和食物链被破坏、生物栖息环境恶化、标志性生物消失等。原有河流生态完整性的破坏,成为流域生态安全保障的最主要限制因素。如何协调水资源开发利用与生态保护的关系,做到人与自然和谐共处,是水能梯级开发必须考虑的重大问题。

由于流域本身是一个完整的生态系统,与单一电站建设的水能开发利用相比,水能梯级开发在生态系统中的镶嵌与驱动作用更为显著,对流域生态系统的影响具有群体性、系统性、连续性和累积性特征,目前对其行为特征还缺乏有效的表征与度量,导致在评估其生态影响时还无法进行科学决策。本研究从水能梯级开发行为出发,基于其与生态系统的相互作用方式,对其开发模式、行为特征与度量表征进行了系统揭示,目的是为进一步研究水能梯级开发生态影响特征与规律提供依据。

1.2 水能梯级开发模式

1.2.1 水能利用形式

水能利用的本质是对水体流动产生的能量进行直接或间接转化利用,对河流

而言,其能量利用的大小取决于集中落差和引用流量。目前水能利用形式根据集中落差方式的不同,分为坝式、引水式和混合式。

1. 坝式

坝式是指在天然河道中拦河筑坝,形成水库,以抬高上游水位,集中河段落差(图 1-1)。坝式水电站由挡水建筑物、泄水建筑物、压力管道、厂房及机电设备等组成。这一类水电站大都建于流量大、河段坡降较缓,同时还有适合建坝的地形、地质条件的河段。根据水电站厂房的位置可分为河床式、坝后式、坝内式水电站;根据堤坝高低可分为高坝式和低坝式(径流式)水电站。目前国内典型的坝式水电站有葛洲坝水电站、三峡水电站、小浪底水电站等。

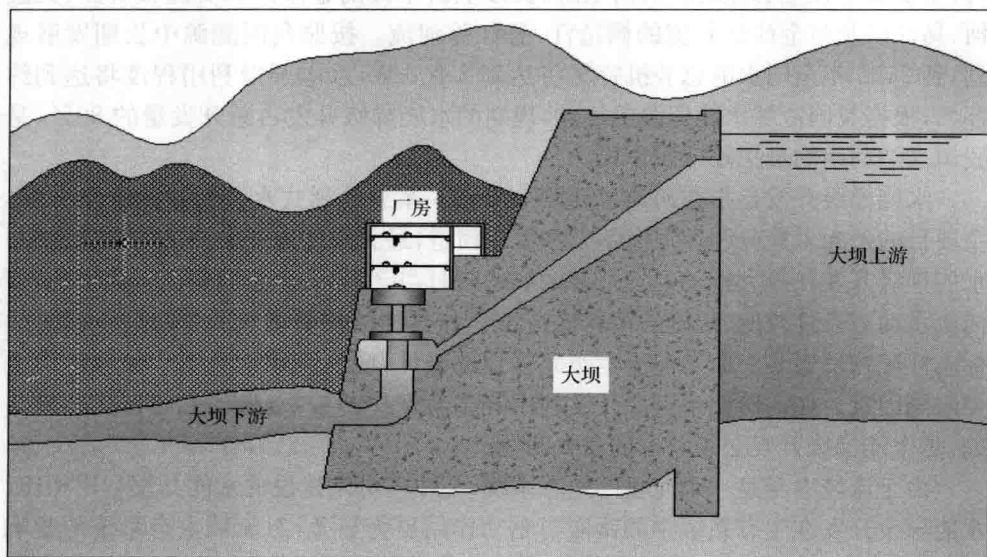


图 1-1 坝式水电站示意图

坝式水电站具有以下特点:①具有日调节以上性能时,适宜担任电力系统的调峰、调频和备用任务,可增大电站的电力效益和提高供电质量;②枢纽布置集中,便于运行管理;③不会像引水式水电站那样要出现脱水河段,相反其库区可增加河道水深,相对有利于通航;④对调节性能好的水电站,库水位变幅较大,低水位时减少了利用水头,有时会影响通航,在水轮机选择时要考虑低水头的影响;⑤水库淹没损失大。

2. 引水式

引水式是指在河道上建低坝和引水工程,将水导入人工建造的引水道(明渠、隧道、管道等),在引水道末端集中落差(图 1-2)。在河流比降较大、流量相对较小的山区或丘陵地区的河流上,可在较短的河段中,以较小尺寸的引水道取得较大的水头和相应的发电功率;在河流曲度较大时,可采用裁弯取直引水或跨流域引水,建造经济合理的引水式水电站;在丘陵地区,引水道上下游的水位相差较小,常采用无压引水式水电站;在高山峡谷地区,引水道上下游的水位相差很大,常建造有压引水式水电站。与坝式水电站相比,引水式水电站具有以下特点:①引用的流量常较小,又无蓄水库调节径流,水量利用率较差,综合利用效益较小;②无水库淹没损失,工程量又较小,单位造价往往较低,成为其主要优点。目前国内典型的引水式水电站,如云南以礼河盐水沟水电站。

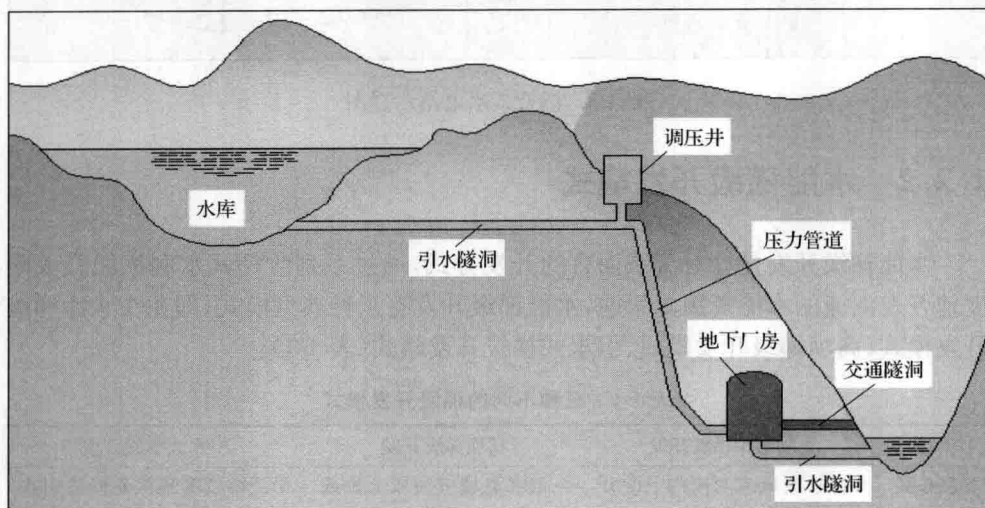


图 1-2 引水式水电站示意图

3. 混合式

混合式是指在一个河段上,用坝集中一部分落差,再通过有压引水管道集中坝后河段的另一部分落差(图 1-3)。如果河段上游坡降较小且筑坝后淹没损失不大,有筑坝建库条件,下游河段坡降陡(如有急滩或大河湾)且有条件集中较大落差时,采用混合式开发往往比较经济。这种水电站通常兼有坝式水电站和引水式水电站的优点和工程特点。目前国内典型的混合式水电站,如四川狮子滩水电站、福

建古田溪水电站、广东流溪河水电站等。

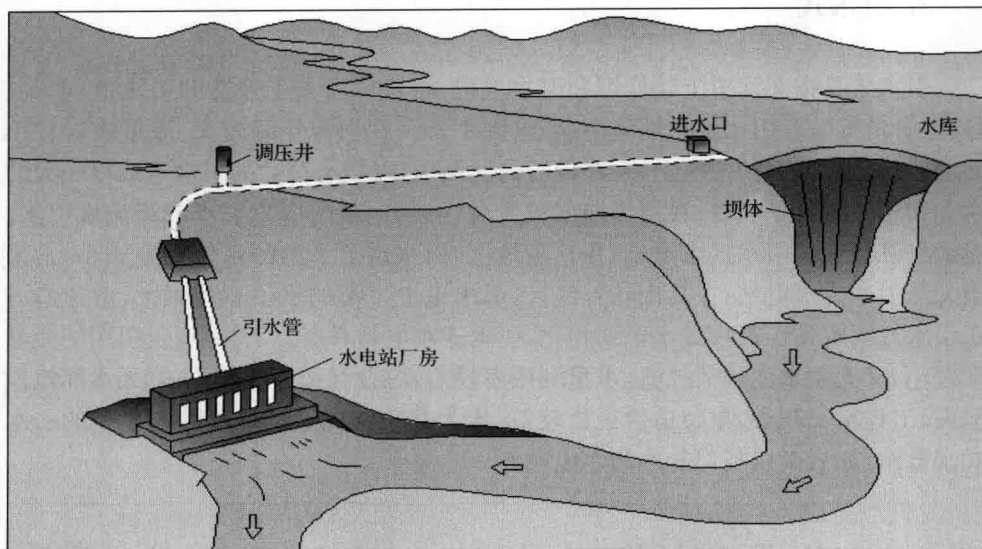


图 1-3 混合式水电站示意图

1.2.2 水能梯级开发模式

水能梯级开发是针对流域而言的开发方式,通过系列阶梯式水利枢纽最大限度地开发河流的水能资源。目前,水能梯级开发有三种典型模式,即龙头水库梯级开发模式、高坝梯级开发模式、引水式梯级开发模式(表 1-1)。

表 1-1 三种不同的梯级开发模式

项目	龙头水库梯级开发	高坝梯级开发	引水式梯级开发
梯级布局	一般在流域或河段的上游开始处修建高坝,以下是一系列调节能力较弱的低坝	一般在流域或河段上游或中游尾处修建高坝	沿流域坡度较大处修建引水道,下一级引水口一般接着上一级发电尾水
开发任务	发电为主,将来水蓄积在流域的上游,调节下游水电站的来水,增加发电量	首先解决流域防洪、拦沙、灌溉供水等任务	无调节能力,利用落差发电为主
开发时序	先建龙头水库,再建下游水电站	先在上游尾处建高坝,将整个流域分成两个或多个部分,然后分别进行梯级开发	按梯级高程顺序逐级修建
生态影响	大水库的形成对上游的生态影响较大,对下游生态影响相对较小	多坝镶嵌,形成生态阻断效应	全梯级形成较多的连续脱水河段,对流域生态影响较严重

1. 龙头水库梯级开发模式

梯级布局一般在流域或河段的上游开始处修建高坝,以下是一系列调节能力较弱的低坝(图 1-4)。其开发任务是将来水蓄积在流域的上游,调节下游水电站的来水,增加发电量,其开发时序往往是先建龙头水库,再建下游较小的系列径流式水电站,具有下游流域淹没面积较小的特点。

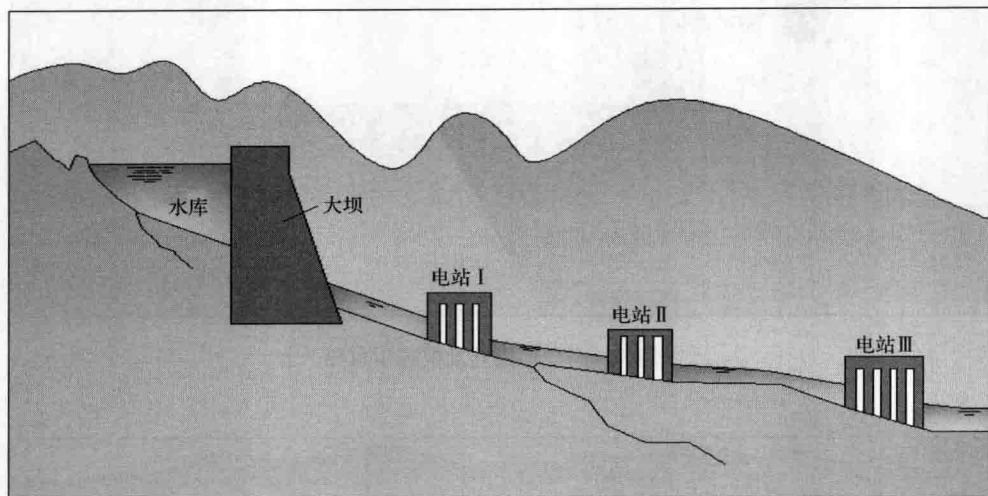


图 1-4 龙头水库梯级开发模式示意图

2. 高坝梯级开发模式

梯级布局一般在流域或河段上游或中游尾处修建高坝(图 1-5)。这类布局在具有发电任务的同时,还具有防洪、拦沙、灌溉供水等功能,其开发时序往往是先在上游尾处建高坝,将整个流域分成两个或多个部分,然后分别进行梯级开发。

3. 引水式梯级开发模式

其梯级布局一般沿流域坡度较大处修建引水道,下一级引水口一般接着上一级发电尾水(图 1-6)。这种梯级开发模式将水直接引到下游发电,有效利用落差,在较小流量情况下获取较大出力,其开发时序按梯级高程顺序逐级修建,一般是上一级发电尾水接下一级电站引水建筑物,全梯级形成较多脱水河段,对流域生态影

响较严重。

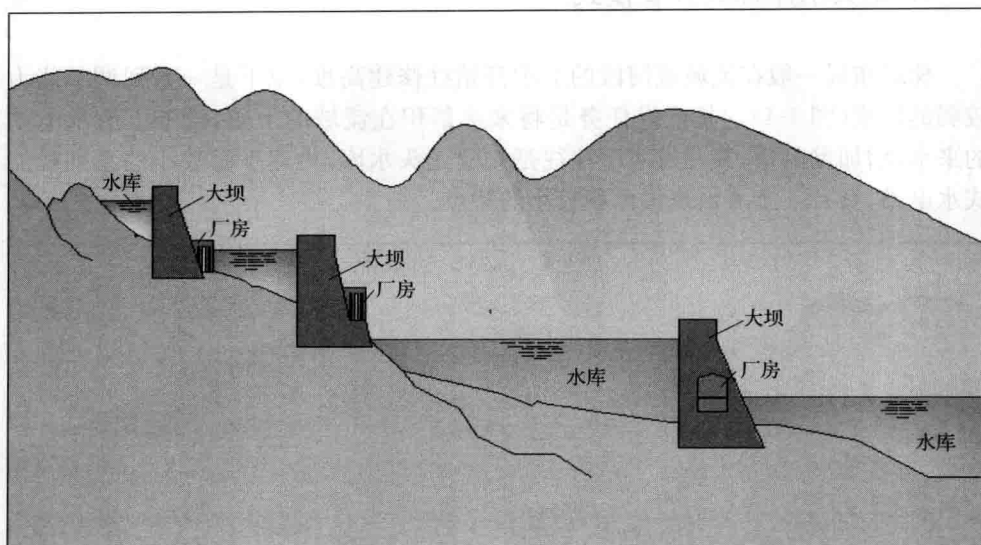


图 1-5 高坝梯级开发模式示意图

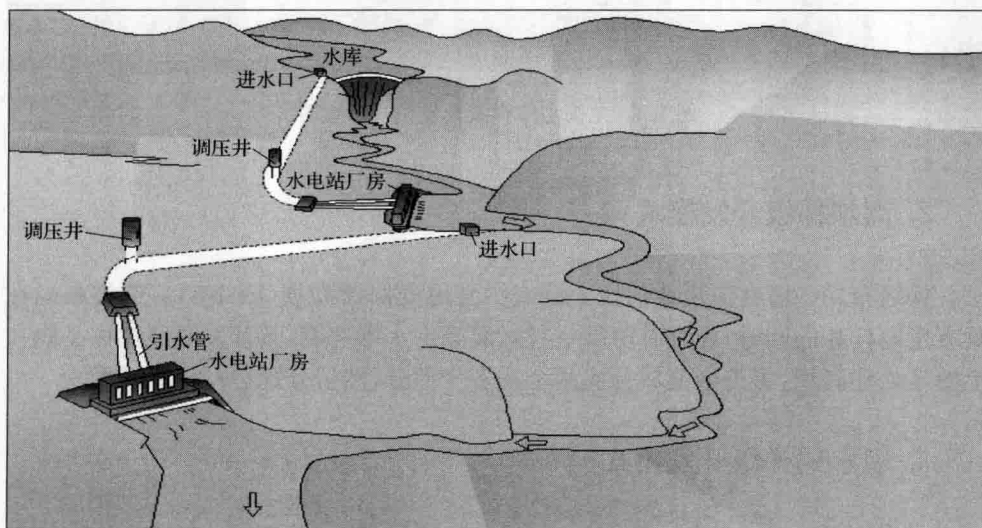


图 1-6 引水式梯级开发模式示意图

1.3 水能梯级开发行为特征

1.3.1 水资源特征

自然流域的水资源在时空尺度上具有循环性、相对规律性、状态不均一性及动态平衡性特征,以水为依托与纽带形成了流域丰富多彩且相对稳定的自然生态系统。由于水能梯级开发行为在自然生态系统的镶嵌过程,导致流域水资源特征也发生改变(图 1-7)。具体表现为:

(1) 在流域空间尺度上导致自然水体连续性阻隔,其自然的相对规律性及动态平衡性被破坏,而在流域时间尺度上打破了天然河道的丰期、枯期分界,水资源状态的不均一性丧失,在年际、年内流量过程上均呈均匀化特征;

(2) 在流域尺度上由于水量分配格局的变化,不仅相应的水流流速、水深发生改变,而且水域面积的改变影响蒸发、下渗作用,引起水资源循环性发生变化,进一步影响局地气候。

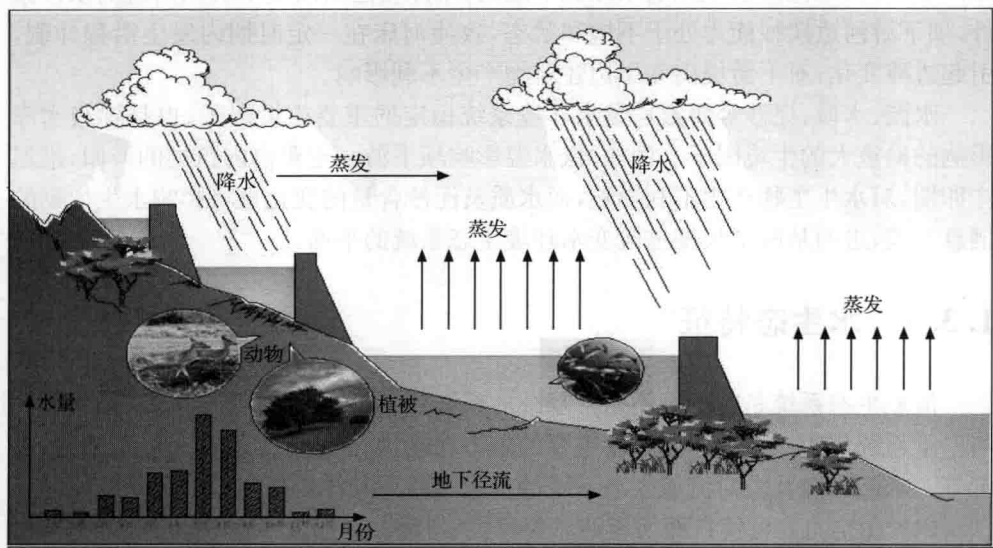


图 1-7 水能梯级开发对水资源的影响示意图

梯级开发行为通过对水资源特征的改变作用,进而影响流域水生生物、陆生生物的栖息环境,在空间尺度上将影响整个流域范围内的生态系统平衡性,在时间尺度上将影响流域生态系统的演替过程。

1.3.2 水环境特征

水能梯级开发行为的水环境特征主要体现在对水温、水质、泥沙等方面的作用。主要表现如下所述。

(1) 水温:由于梯级水库的形成,梯级电站运行后完全改变了天然河道的水温年变化过程,春季、夏季电站下泄水温低于天然水温,秋季、冬季电站下泄水温高于天然水温,并具有时间累积效应,同时受梯级水库的影响,河道年内升温过程不同于天然河道,水温年变幅缩小,与天然水温相比,电站下泄水温年变化过程更趋于均化,并且越往下游梯级电站均化过程越明显,表现出梯级电站的空间累积效应。

(2) 水质:对于水质而言,由于下泄量被梯级电站反复利用开发及库体的形成,水体滞留时间增加、水体流速减缓,增加了无机物的沉淀,氮、磷等有机物的滞留时间加长,水中浮游生物滞留时间增加,因此各梯级电站建成后水体多出现富营养化特征,并且梯级电站的形成导致水体自净距离减小,进一步导致水质恶化。

(3) 泥沙:对于泥沙来说,由于梯级坝的形成,上游流域内流失的泥沙冲入水库内淤积,大量泥沙淤积影响水库调节能力,水库投运后改变了天然河流的水沙条件,坝下游河道挟沙能力处于不饱和状态,致使河床在一定时期内发生沿程冲刷,引起边滩变化,对下游堤防和岸边建筑物产生不利影响。

水温、水质、泥沙等要素均是水环境系统稳定的重要生境因子,也是梯级水库影响的最重大的生境因子。例如,低水温影响坝下游一定距离内鱼类的产卵,推迟产卵期,对水生生物产生不利影响,而水质及泥沙含量的变化也将影响水生生物的栖息环境,进而从时空尺度上改变水环境生态系统的平衡。

1.3.3 水生态特征

流域生态系统是一个结构非常复杂的系统,在流域生态系统中,河流子系统和河岸子系统作为一个整体发挥着重要的生态功能,如栖息地、过滤与屏障、通道、源汇等。水能梯级开发对流域生态系统的干扰与驱动具体表现为以下两个方面。

(1) 在空间上可使自然河道的弯曲程度、岸滩湿地等发生变化,同时也影响河道纵横断面形态,如纵横断面形状、比降、河宽、水深等相关生境要素,形成生境的破碎化及水生生境质量改变(图 1-8)。

(2) 水能梯级开发还可对水生生态系统的能量、物质(悬浮物、生源要素等)输送通量产生重要影响,导致其生态特征发生根本性改变,打破原有生态系统的平衡状态。

总体而言,水能梯级开发对流域水生态具有重要的影响特征,其本质是造成流