

三峡水库

运行对其生态环境的影响与机制

——典型支流澎溪河水环境变化研究

郭劲松 李 哲 方 芳 / 著



科学出版社

三峡水库运行对其生态环境 的影响与机制

——典型支流澎溪河水环境变化研究

郭劲松 李 哲 方 芳 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者十余年来关于三峡水环境生态研究工作的总结。重点阐释在水库运行下,如何基于藻类生境选择学说和生态功能分组概念,建立藻类群落结构的生态特征与演替模式;在物理边界不稳定的系统中,如何建立藻类生态功能组与环境变量的多元统计模型的理论成果。较系统地介绍了三峡水库小江支流营养物赋存形态及其相对丰度的变化关系,以水体滞留时间为参量的TN/TP对藻类生长的基本驱动模式及实验验证等成果。

本书可作为环境、水利、生态、地理、土木等学科及工程专业高年级本科生、研究生教学,以及相关领域教学科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

三峡水库运行对其生态环境的影响与机制:典型支流澎溪河水环境变化研究 / 郭劲松, 李哲, 方芳著. —北京: 科学出版社, 2017.1

ISBN 978-7-03-051461-5

I. ①三… II. ①郭… ②李… ③方… III. ①三峡水利工程-影响-生态环境-研究 IV. ①TV632.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 319789 号

责任编辑: 李小锐 唐 梅 / 责任校对: 韩雨舟

封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 罗 科

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年1月第一次印刷 印张: 21

字数: 500千字

定价: 147.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

三峡工程是治理和开发长江的特大型水利枢纽工程，举世瞩目，必将对我国长江经济带和“一带一路”建设发挥重要的支撑作用。客观地讲，三峡工程的建设运行也将改变长江水文情势，并可能潜在地对长江生态与环境，乃至社会经济发展产生不同程度的影响。2016年1月5日，习近平总书记在推动长江经济带发展的座谈会上明确指出，“要把修复长江生态环境摆在压倒性位置，共抓大保护，不搞大开发，依托长江水道，统筹岸上水上，正确处理防洪、通航、发电的矛盾”。因此，科学地审视三峡工程对长江生态环境的影响，充分发挥其正面效应，并对其可能的不利影响开展防控、减缓、修复等研究工作具有极为重要的意义。

自2003年三峡水库开始蓄水(135m水位高程)后，受水位壅升、回水顶托影响，库区支流回水区呈现水体更新周期延长、营养物滞留的水库特征。与此同时，每年春夏和夏秋之交，温度、水文等环境条件的变化更是促使大部分支流频繁发生严重的水华。尽管定性的我们知道三峡支流富营养化及水华现象同水库蓄水运行存在一定关联，但限于水库水生态系统有别于湖泊的复杂性，三峡支流富营养化与水华成因依然需要以科学的态度深入研究。

郭劲松教授及其科研团队长期致力于三峡水库水环境生态的研究工作。该专著凝练了郭教授及其团队在过去十余年对三峡水环境生态研究的成果。专著尝试从水库水环境生态普适的基本学科要素入手，对特定地域背景及水文水动力条件下三峡支流回水区水体光热条件、生源要素迁移转化、藻类演替机制等进行剖析，总结分析了水库运行下水环境与水生态的一些新现象，并提出了一些新的观点。该专著的学术价值在于以环境与生态交互的视角分析三峡水库运行同水环境、水生态变化的关联性，这将为后续系统甄别并阐明三峡水库调度运行对驱动其水生态系统演化的科学规律，积累重要的知识和资料基础。

相信该专著的问世定会丰富和启发三峡水库水环境与水生态研究，并对支撑水库环境生态管理、推动三峡库区生态文明建设起到积极的作用。



中国工程院院士
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任

前 言

2010年10月26日,三峡工程首次蓄水至175m的设计水位,标志着三峡工程正式由建设阶段转入运营阶段。三峡工程运行以来,在防洪、发电、航运、改善人居环境以及对区域经济发展的带动等方面均发挥了重要作用。与此同时,三峡工程自构想、论证、设计、建设至运营,其对生态环境的影响的争论和研究就从来没有停止过。不同的研究单位、不同的专家、不同的地域空间、不同的年际时段所得到的认识差异很大,但一个基本的事实和共识是自2002年139m蓄水以来,支流水体富营养化明显,水华频繁发生,支流与干流交汇区有水质恶化的迹象。这是一个十分独特的现象,更表明三峡工程对生态环境的影响不仅是多方面而且立体全方位的,也将是持久和深远的。因此,在该水域开展相关基础研究问题复杂,也凸显科学必将追求完美之魅力。

笔者近年一直希望尝试将课题组十多年来关于三峡水环境生态方面的研究工作进行系统的总结,但限于三峡水环境生态问题的复杂性一直未敢触碰,今受科学出版社的鼓励才最终成文。本书以三峡生境变化驱动藻类群落演替为主线,在系统讨论了水库生态学研究的理论、方法和进展的基础上,重点围绕三峡水库中段典型支流富营养化现象与水华过程展开相关论述。

本书介绍的主要内容是笔者在研究中获得的第一手资料。研究的手段包括野外跟踪观测、室内模拟实验、原位受控实验、数学模型和计算模拟等。虽然许多相关成果已分别在国内外多种学术刊物上发表,但本书以明晰的理论主线为统领,是在对数据进行进一步深入分析、对研究成果进行补充完善的基础上,系统地归纳而成。本书重点阐释在水库运行下如何基于藻类生境选择学说和生态功能分组概念建立藻类群落结构的生态特征与演替模式,在物理边界不稳定的系统中如何建立藻类生态功能组与环境变量的多元统计模型。较系统地介绍了三峡水库小江支流营养物赋存形态及其相对丰度的变化关系,以水体滞留时间为参量的TN/TP对藻类生长的基本驱动模式及实验验证等成果。

本书共8章。第1章梳理筑坝蓄水对流域生态环境,尤其是水库水环境的影响,并着重分析水库生态系统的总体特征和水库生态学研究进展,本章由郭劲松主笔完成。第2章介绍三峡水库及其典型支流澎溪河的总体特点,从水库运行导致水环境与水生态的时空异质性的角度,探讨选择澎溪河开展水库生态学研究的主要原因,本章由郭劲松主笔完成。第3章和第4章分别介绍澎溪河回水区水文、水动力条件与水体光热特点,本章由李哲主笔完成。第5章则着重分析水库运行下澎溪河N、P、Si等关键营养物的时空分布特征,本章由方芳主笔完成。第6章则在前述营养盐、光热条件等生境要素特征分析基础上,探讨澎溪河回水区藻类群落结构变化及其演替特点,并结合典范对应分析结果,归纳水库运行下澎溪河回水区藻类群落演替的宏观生态模式,本章由李哲、方芳共同完成。第7章对澎溪河水库水-气界面碳通量与水体碳循环机制进行初步探讨,本章

由李哲主笔完成。第8章重点梳理近年来对澎溪河回水区野外研究的感受与体会,从新的视角对水库运行下支流水华形成、富营养化发展等问题进行探讨,以期为三峡水库水环境与水生态管理提供更多新的思路,本章由郭劲松主笔完成。全书由郭劲松负责统稿。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金、国家重大科技专项——水体污染控制与治理科技重大专项、国家科技支撑计划以及重庆市重大科技项目等资助。本书的研究成果也是课题组集体智慧和辛劳的结晶,课题组鲁伦慧、肖艳、欧阳文娟、蒋滔、刘静、陈杰、张超、田光、贺阳、盛金萍、周红、陈园、王胜、李伟、白镭、谢丹、王琳、杨梅、张呈、冯婧、张树青等老师和研究生在野外采样、实验测试、数据整理、模拟计算、书稿校核等方面都作出了重要贡献。本书的写作得到了中国水利水电科学研究院王浩院士、河海大学王超院士、中国科学院水生生物研究所胡征宇研究员等专家的关心和支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书虽然出版面世,但因三峡水环境生态问题复杂,涉及的学科领域众多,加之本书展示的实例成果主要基于对澎溪河流域的研究,以及知识和认识水平有限,所以笔者内心一直十分忐忑。如果书中的观点和认识能够得到同仁们的批评、指正和争鸣,则既是本书的目的,更是笔者的幸运。

郭劲松 李哲 方芳

2016年10月于重庆

目 录

第 1 章 水库生态学研究理论、方法与进展	1
1.1 水库与人类社会发展	1
1.2 水库主要生态过程与基本特征	8
1.2.1 水库地理分布、形态特征及其同流域的关系	8
1.2.2 水库生态系统的物理生境	13
1.2.3 水库的化学、生物过程与生态系统发育、演化	17
1.2.4 水库生态系统的综合特征	23
1.3 水库生态学研究进展与本书总体构架	26
1.3.1 湖沼学发展的回顾与简述	26
1.3.2 水库生态学发展现状与研究进展	30
1.3.3 本书总体构架与内容设置	34
主要参考文献	37
第 2 章 三峡水库及其典型支流澎溪河概况	40
2.1 三峡水库生态系统总体特征概述	40
2.1.1 三峡工程简况	40
2.1.2 三峡水库生态系统特征	42
2.2 三峡水库典型支流澎溪河流域基本情况	52
2.2.1 区位与水系	52
2.2.2 地形地貌与地质特征	53
2.2.3 气候气象特点	54
2.2.4 水文径流特征	55
2.2.5 植被覆盖与水土流失	57
2.2.6 流域行政区划与社会发展现状	58
2.2.7 澎溪河流域污染负荷现状	60
2.3 澎溪河流域在三峡库区的典型性与代表性	62
主要参考文献	66
第 3 章 澎溪河水文与总体水动力特征	67
3.1 2003~2012 年成库 10 年澎溪河流域降雨、径流过程	67
3.2 澎溪河回水区总体水动力模型构建	70
3.2.1 HEC-RAS 模型基础与应用现状	70
3.2.2 澎溪河回水区一维水动力模型构建	72
3.3 水库运行下澎溪河回水区总体水动力特征	76

3.3.1 典型时断河道水力学特征	76
3.3.2 水体滞留与更新交换特点	79
主要参考文献	84
第4章 水库运行下澎溪河水体光热特征	86
4.1 澎溪河流域光合作用有效辐射基本特点	86
4.2 澎溪河真光层深度估算及其影响因素分析	91
4.2.1 澎溪河真光层深度的时空变化特点	91
4.2.2 水库运行下澎溪河水体光学特性的影响因素分析	99
4.3 水库运行下澎溪河水温及其垂向分布特征	107
4.3.1 湖泊、水库垂向垂向水温结构研究背景简述	107
4.3.2 澎溪河水体表层水温与水气温差变化特征	109
4.3.3 澎溪河垂向水温结构的逐月与昼夜变化过程	112
主要参考文献	119
第5章 水库运行下澎溪河关键生源要素动态	121
5.1 澎溪河消落带/淹没区土壤营养物调查	121
5.1.1 背景	121
5.1.2 开县消落带受淹前土壤氮磷含量调查	122
5.1.3 水库运行下澎溪河主要消落带土壤氮磷含量与赋存形态	125
5.1.4 澎溪河主要淹没区底泥氮磷含量调查	133
5.1.5 澎溪河消落带/淹没区土壤氮、磷含量总体特征	134
5.2 水中关键生源要素赋存形态与时空变化	138
5.2.1 澎溪河回水区水体氮素的时空变化过程	138
5.2.2 澎溪河回水区水体磷的时空变化过程	146
5.3 营养盐相对丰度变化及其对藻类生长的影响	150
5.3.1 关键生源要素的化学计量关系与限制性评价	150
5.3.2 水库运行下澎溪河关键生源要素产汇特点	151
5.3.3 水库运行下澎溪河关键生源要素动态对藻类群落的影响	156
主要参考文献	159
第6章 澎溪河藻类群落动态及其对生境的响应	161
6.1 三峡支流水华现象及其研究进展	161
6.1.1 成库后三峡库区支流水华特征概述	161
6.1.2 三峡支流富营养化与水华研究进展	165
6.2 澎溪河回水区藻类群落动态	167
6.2.1 澎溪河回水区藻类物种调查与藻种名录	167
6.2.2 澎溪河回水区藻类生物量变化	172
6.2.3 澎溪河回水区藻类群落演替过程(2007~2009年)	175
6.2.4 澎溪河回水区藻类群落多样性与演替速率(2007~2009年)	183
6.3 藻类群落的生境选择学说与生态功能分组	186

6.3.1 藻类群落的生境选择学说	186
6.3.2 澎溪河回水区的藻类功能分组(2007~2009 年)	193
6.4 藻类群落演替的宏观生态模式与水华形成机制	199
6.4.1 梯度分析的基本原理及其在藻类生态研究中的运用	199
6.4.2 基于功能分组的生境变化—藻类群落演替梯度分析	201
6.4.3 澎溪河回水区水华成因分析	210
6.4.4 澎溪河回水区藻类群落季节演替的宏观生态模式	216
6.5 澎溪河回水区藻类原位生长试验研究	219
6.5.1 基于藻类原位生长试验预测藻类群落演替与水华的总体思路	219
6.5.2 不同生长策略藻种的原位生长试验研究	221
6.5.3 流速对藻类生长影响的原位生态槽试验研究	232
主要参考文献	238
第7章 澎溪河水—气界面 CO₂、CH₄ 通量研究	242
7.1 水库温室气体通量研究简述	242
7.2 水库温室气体监测技术与方法	245
7.2.1 水库温室气体产汇路径与监测	245
7.2.2 水—气界面温室气体通量监测技术现状	248
7.2.3 三峡水库温室气体通量监测方案的总体设计	249
7.2.4 水库温室气体通量主要监测方法的改进、比较与适用性	252
7.3 澎溪河温室气体通量时空特征与影响因素	262
7.3.1 澎溪河温室气体通量监测方案	262
7.3.2 澎溪河温室气体通量时空特点	264
7.3.3 澎溪河典型库湾气泡释放通量和消落带土—气温室气体通量	271
7.4 水库运行下澎溪河温室气体通量估算	283
7.5 澎溪河水体二氧化碳分压变化及其影响因素	291
主要参考文献	307
第8章 澎溪河回水区水体富营养化与水华特点	311
8.1 富营养化与水华	311
8.2 澎溪河回水区营养状态与初级生产力结构	312
8.2.1 营养状态评价与长序列分析	312
8.2.2 澎溪河回水区初级生产力结构调查	314
8.3 澎溪河回水区富营养化与水华成因的探讨	320
主要参考文献	323

第1章 水库生态学研究的理论、方法与进展

1.1 水库与人类社会发展

水库通常是指在河流上或依托一定地势人工筑坝拦截蓄水后形成的人工水体,亦称人工湖泊。水库通过对陆地淡水资源的拦蓄调节,发挥灌溉、发电、防洪、供水、养殖、航运、旅游等多种功能,服务人类经济社会发展。

河流流域是孕育人类文明的摇篮。作为人类改造自然、开发利用水资源的主要工程手段,在河流流域筑坝蓄水,发挥其服务功能,几乎与整个人类文明的演进史相伴而行,其在人类发展史中的重要性并不亚于火的发现与使用。早期的筑坝蓄水主要用于灌溉、供水。人类历史上最早大坝记载可能是在公元前 6000 年,美索不达米亚的农民便开始在扎格罗斯山脉(现今伊朗西南部)的高山峡谷中修建大坝引渠灌溉(McCully, 1996)。现存历史最悠久的大坝可能是公元前 3000 年古约旦人在 Jawa 修建的大坝,包括 200m 长的溢流堰以及周围数个小型水库,大坝最长有 80m,高 4m(Garbrecht, 1986),它实际上是一个综合的供水工程。公元前 3000 年,古印度人在干旱的 Girnar 山区开始修建水库用以农业灌溉。古埃及人在公元前 2900 年开始修建水库向首都孟菲斯引水,并设计出水轮用于农业灌溉(引自网页:Wikipedia—Dam^①)。古巴比伦人于公元前 1300 年在底格里斯河修建的水库至今仍在使使用。古罗马人在西班牙普洛色皮纳修筑的高 12m 混凝土芯大坝,成为现代填土坝的先驱;在科纳尔市修筑的另一座大坝采用了倾斜的迎水面,更趋完善(引自网页:互动百科—大坝^②)。公元前 700 年至公元前 250 年,亚述人、巴比伦人、波斯人修筑了多座灌溉用的大坝。同一时期,在也门、斯里兰卡、印度也修筑了各种大坝用以供水、灌溉。

位于我国安徽省寿南县境内建于春秋时期的安丰塘(古称“芍陂”)可能是我国现有文字记载最早的水库,距今已有 2500 年的历史,是我国古代四大水利工程之一(图 1-1)。安丰塘坝高 6.5m,水库水域面积 34km²,可灌田万顷,为当地粮食丰产做出了卓越贡献。成都平原的都江堰水利工程已有近 2300 年历史,至今还在为 8000km² 良田提供灌溉。我国关于水库养殖的最早记载可能是春秋末越国南池(今浙江省绍兴县鉴湖镇),距今约 2400 年^③。据水利部门查考,其上池系白色黏土填筑,水库水域面积约 0.24km²。下池残存塘坝遗址水域面积约 0.53km²,库容约 300 万 m³。迄今,虽然人类历史上筑坝蓄水的具体工程数量难以详细考证,但筑坝蓄水已然成为人类认识自然、改造自然的重要成

① <http://cn.wikipedia.org/wiki/Dam>.

② <http://www.baike.com/wiki/大坝>.

③ <http://www.xcny.net/html/zjs/nyzzView/2006031431293.html>.

果,遍布于除南极洲以外的所有陆地,广泛服务于人类生产生活,孕育并见证了一个又一个新的文明。



图 1-1 中国安徽省寿南县境内的安丰塘^①

资料来源: Google

18~19 世纪期间,以机器取代人力、以大规模工厂化生产取代个体手工生产为标志的工业革命,推动了人类社会生产力膨胀式地发展。筑坝蓄水对人类社会的贡献自 19 世纪中叶开始越发重要。18 世纪 70 年代中期,法国水利工程师 Bernard Forest de Bélidor 在《Architecture Hydraulique》一书中首次提出了水轮机组带动转刷发电的构想(引自: Wikipedia-Bernard Forest de Bélidor^②)。英国于 1870 年在 Rothbury Cragside 建成了世界上第一个水力发电站。1880 年美国开始尝试使用水轮驱动电刷发电以供给密歇根州 Grand Rapids 地区剧院和商铺照明;1881 年美国运用尼亚加拉瀑布的水能驱动电刷发电供给纽约市道路照明;1882 年美国将电刷同水轮机组相互耦合,在威斯康星州 Fox 河上建成了全球第一座真正意义上的水电站(图 1-2)。这些尝试极大地刺激了以美国为主的西方新兴工业化国家掀起修建水库的浪潮。在美国国会和联邦政府的支持下,以美国陆军工程师兵团、美国垦务局、田纳西河流域管理局等水利水电开发机构为核心,美国在 19 世纪末至 20 世纪初,尤其是在 20 世纪 30 年代罗斯福新政时期,相继修建了罗斯福坝、胡佛大坝、大古力坝、邦尼维尔坝等一大批影响深远的水利水电工程,筑坝蓄水带来的发电、灌溉、供水等综合效益,为美国西部地区发展乃至美国经济实力、综合国力的迅速提升奠定了不可磨灭的重要贡献(McCully, 1996)。据国际大坝协会(International Commission on Large Dams, ICOLD)1998 年的不完全统计,1900 年以前,全球大型大坝^③总数仅 630 座,主要用于供水和灌溉。在 1900~1930 年建成使用的大坝则达到了 2727 座。另据

① 安丰塘,古称“芍陂”、“期思陂”,位于今安徽寿县城南 30km 处,距今已有 2500 多年历史,为春秋时期楚国相国孙叔敖主持修筑的大型水利工程,因为引淠水经白芍亭东积水而得名,是中国古代四大水利工程之一,现蓄水约 7300 万 m^3 ,灌溉面积 4.2 万公顷。

② http://en.wikipedia.org/wiki/Bernard_Forest_de_B%C3%A9lidor.

③ 国际水坝协会(ICOLD)对大型大坝的定义为:坝高 15m 以上,或坝高为 5~15m 且形成水库库容超过 $3 \times 10^6 \text{m}^3$ 的坝。

L'vovich 等(1990)的不完全统计, 1900 年以前全球大型水库^①(库容 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ m}^3$)仅 41 座, 总库容不超过 15 km^3 ; 而到了 1950 年, 全球大型水库达到 539 座, 总库容达到 528 km^3 , 其中近 70%位于北美洲(图 1-4)。第二次世界大战(简称“二战”)时期, 美国大古力坝、邦尼维尔坝等水电工程所产生的电能几乎全部被用于核弹原料提炼、电解铝生产等军工行业, 美国著名的反坝学者 McCully(1996)指出: “西部大坝的电力帮助美国打赢了二战”(图 1-3)。

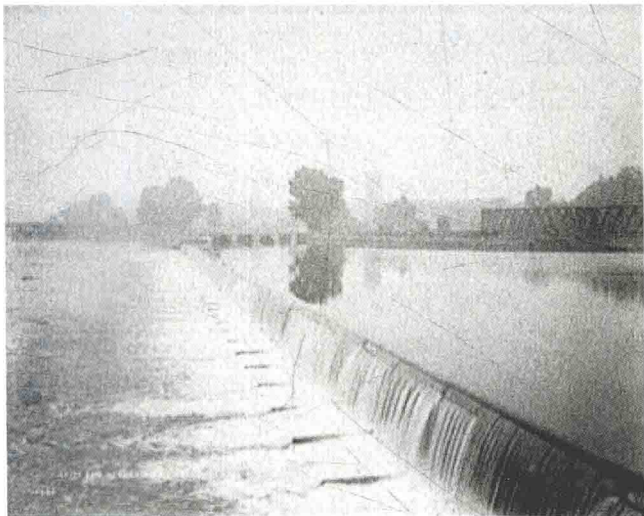


图 1-2 世界上第一座水电站^②

资料来源: 美国国会图书馆



图 1-3 美国著名的 Hoover Dam^③

资料来源: Google

① 根据 L'vovich 等和 Straškraba 等的划分, 大型水库库容介于 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ m}^3$; 中型水库库容介于 $10^8 \sim 10^{10} \text{ m}^3$; 小型水库库容介于 $10^6 \sim 10^8 \text{ m}^3$; 微型水库库容则小于 10^6 m^3 。
② 世界上第一座真正意义的水电站位于美国威斯康星州 Appleton 地区 Fox 河上, 装机容量 12.5 kW 。
③ 美国科罗拉多河上著名的 Hoover Dam 是 20 世纪 30 年代全球具有重大意义的标志性水利工程, 所形成的 Lake Mead 防洪库容 117 亿 m^3 , 调节库容 196 亿 m^3 , 为美国西部沙漠地区的社会经济发展作出了不可磨灭的贡献。

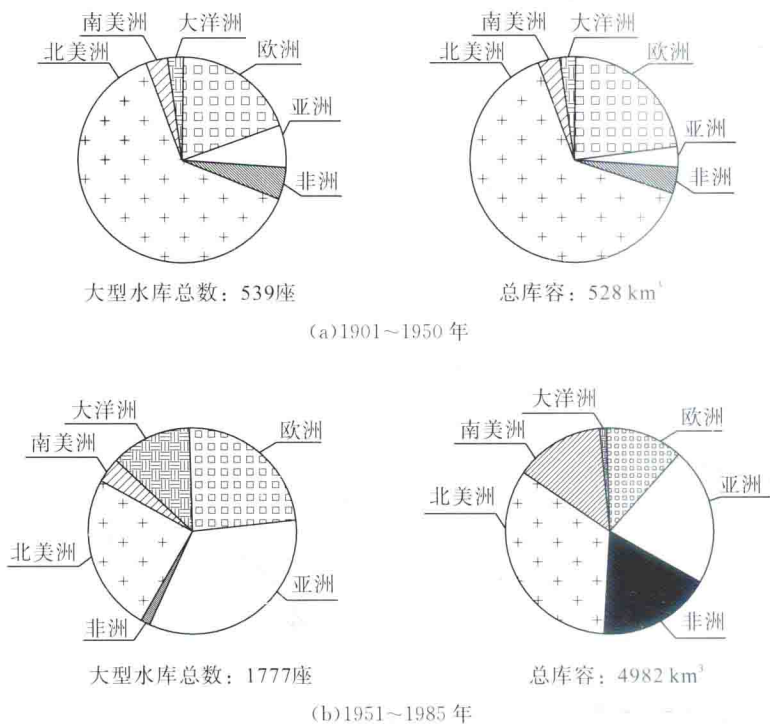


图 1-4 1901~1950 年、1951~1985 年各洲大型水库分布情况(L'vovich et al. , 1990 , 有修改)

二战后的经济重建与复兴对能源的巨大需求在人类社会掀起了又一次筑坝建库蓄水的高潮。根据 ICOLD 的统计(图 1-5 和图 1-6), 20 世纪 50 年代全球共兴建大坝 2735 座(不含中国), 而 20 世纪 70 年代兴建大坝 5418 座(不含中国)。至 1998 年全球共建有库容超过 $1 \times 10^6 \text{m}^3$ 以上的水库 49248 座, 其中中国有 25831 座。至 2010 年, 全球大型大坝已超过 50000 座(表 1-1 和表 1-2), 所形成的水库总库容为 $7000 \sim 8300 \text{km}^3$ (其中有效库容约为 4000km^3), 接近全球陆地天然湖泊储水总量的 10%, 是全球河流入海总量的 1/6 (Lehner et al. , 2011b), 其中大型水库总水域面积约为 500000km^2 。另据 Lehner 等 (2011b)推算, 目前全球小型水库、堰塘等约 1670 万座, 形成总库容约为 8069.3km^3 , 总水域面积约为 305723km^2 。根据上述数据推断, 目前全球各种水库所形成的总库容约为 15500km^3 , 占全球河流年径流总量($55 \text{万亿 m}^3/\text{a}$)的 28.2%, 筑坝蓄水形成的水面面积约相当于全球陆地天然水域总面积的 19.2%。

表 1-1 世界前十大已建、在建水库(贾金生等, 2008)

序号	坝名	库容/亿 m ³	主要建库目的	国家
1	Kariba	1806	发电	津巴布韦/赞比亚
2	Bratsk	1690	发电/航运/供水	俄罗斯
3	High Aswan Dam	1620	灌溉/发电/防洪	埃及
4	Akesombo	1500	发电	加纳
5	Daniel Johnson	1419	发电	加拿大

续表

序号	坝名	库容/亿 m ³	主要建库目的	国家
6	Guri	1350	发电	委内瑞拉
7	Bennett W. A. C.	743	发电	加拿大
8	Krasnoyarsk	733	发电/航运	俄罗斯
9	Zeya	684	发电/航运/防洪	俄罗斯
10	LG-Deux Principal	617	发电	加拿大

注：中国三峡水库总库容 393 亿 m³，在全球排名第 22 位

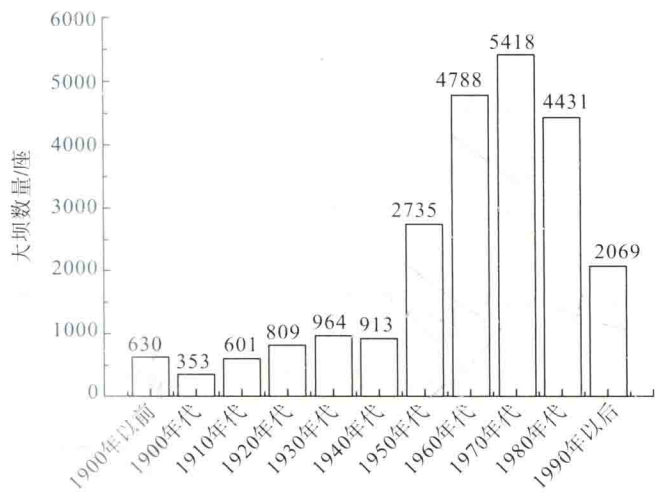


图 1-5 全球 20 世纪各年代建成使用的大型大坝(ICOLD, 1998)

注：不含中国

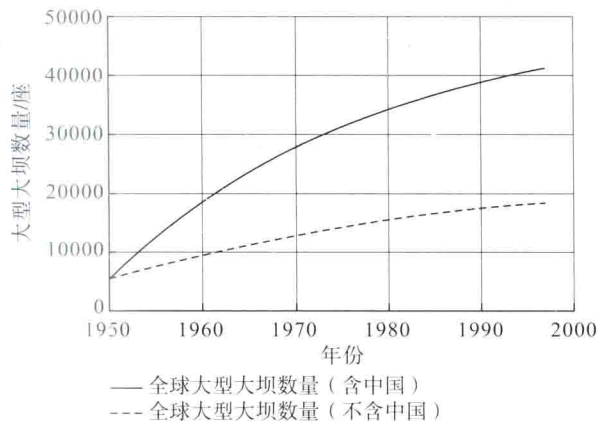


图 1-6 1950 年后全球大型大坝统计

表 1-2 世界前十大已建、在建大坝(贾金生等, 2008)

序号	坝名	完工年	装机容量/MW	年均发电量/GWh	国家
1	三峡	2009	22500	84000	中国
2	Itaipu	1991	12600	90000	巴西/巴拉圭
3	溪洛渡	在建	12600	57120	中国
4	Guri	1986	10000	52000	委内瑞拉
5	Tucuruí	1984	8370		巴西
6	Sayano-Shushenskaya	1990	6400	22800	俄罗斯
7	向家坝	在建	6000	30747	中国
8	Krasnoyarsk	1967	6000	19600	俄罗斯
9	龙滩(广西)	2001	5400	18710	中国
10	Bratsk	1964	4500	22500	俄罗斯

水库是全球粮食安全保障的重要基础。根据最新统计, 全球 2. 68 亿 hm² 的灌溉农田中 30%~40% 由水库提供(图 1-7), 据此推断, 水库为全球粮食生产的直接贡献率为 12%~16%。根据联合国粮农组织(FAO)的估计, 至 2050 年全球粮食需求将比现在(2008 年)增加 70%, 农业灌溉用水量预计将增加 11%, 修建水库是满足上述灌溉用水需求的最主要手段(WCD, 2000)。

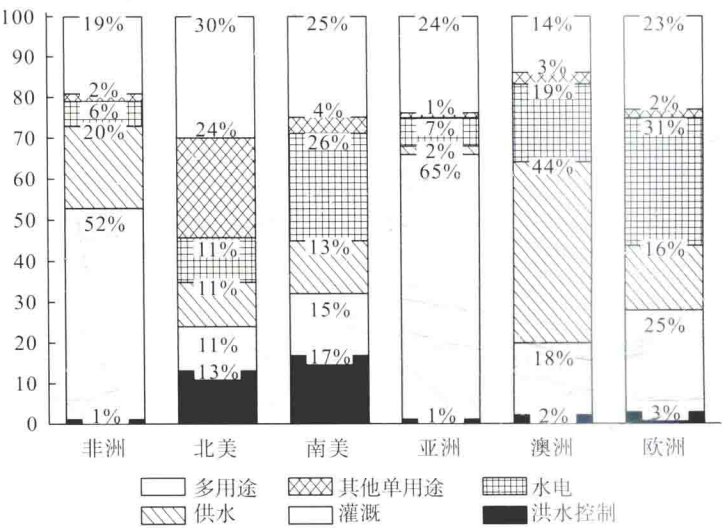


图 1-7 现有大型大坝的区域和用途

水库同样为城镇居民生产生活提供重要的淡水资源。有统计资料表明, 全球约 12% 的大型水库将城镇供水作为主要设计目标, 其中约 60% 的供水水库位于北美洲和欧洲(WCD, 2000)。德国萨克森地区约 40%、洛杉矶 37% 的城镇供水依赖于水库。在我国重庆市的供水水源中, 34.6% 的集中式城镇饮用水源地为水库。若将三峡水库重庆市域

内长江干支流考虑在内，则上述比例将超过 50%。

发电是筑坝蓄水的另一重要功能。截至 2009 年，全球水电装机容量为 926GW，年水力发电总量为 3551TWh，约占全球电力供应总量的 16%(图 1-8)，相当于每天 440 万桶原油(火力发电)的发电量(Kumar et al.，2011)。据国际大坝委员会 2000 年的不完全统计，全球有 65 个国家电力供应中的 50%以上来自水电，24 个国家电力供应的 90%以上来自于水电(如挪威、瑞士、瑞典等)，10 个国家的全国电力供应甚至全部来自水电(IEA，2010)。水力发电已成为最主要的可再生能源形式，为缓解全球气候变化发挥了重要作用。在中国，水能资源投资对 GDP 增长贡献率约为 3.08%(王明杰等，2009)。

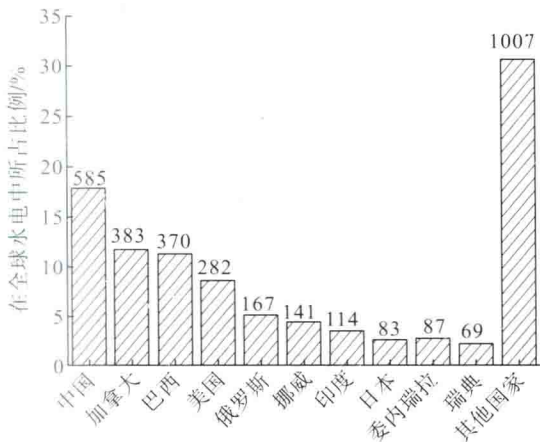


图 1-8 2008 年全球各国水力发电总量及其比例(IEA，2010)

注：图中数字为各国 2008 年水力发电量，单位为 TWh

全球每年至少约有 520 万人受到洪水的影响，约 25000 人死于洪水，造成的经济损失 500 亿~600 亿美元。亚洲国家受洪水影响首当其冲。防洪是筑坝蓄水对人类社会的又一重要贡献。全球大约 13% 的大型大坝具有防洪功能。而据测算，2010 年我国长江流域中，仅三峡水库、丹江口水库的防洪效益就超过 300 亿元(廖鸿志等，2010)，对长江中下游平原地区的社会经济发展提供了重要保障。除此之外，筑坝蓄水带来的养殖、旅游、航运等功能亦为人类社会的发展做出了巨大的贡献。

时至今日，全球每年用于大坝建设的投资为 300 亿~450 亿美元(Kumar et al.，2011)。广大发展中国家为满足本国经济发展的需要，过去十年中每年投入 250 亿~300 亿美元用于大坝建设，其中 150 亿美元用于水电站的建设，100 亿用于水库灌溉工程，而其他数十亿美元则用于城镇供水(WCD，2000)。尽管目前关于筑坝建库蓄水对人类社会发展的实际贡献率仍未有更确切的数据，但毋庸置疑，筑坝蓄水已成为人类社会发展的成果，铭刻于地球陆地表面并记载在人类文明史中。

1.2 水库主要生态过程与基本特征

1.2.1 水库地理分布、形态特征及其同流域的关系

一般意义上,只要是人工筑坝蓄水而形成的水体都可以称之为水库。按此广义概念,储水水池、地下蓄水水池等都可以称为水库。但通常人们更愿意将水库和水池概念分开,将水库视为依托大坝及水面接触到的最高一条等高线所共同组成的封闭或半封闭的大型露天人工水体^①,本书亦沿袭此概念而展开后续的讨论,露天修建的蓄水水池等人工小水体不在本书讨论范畴。

水库修建选址需要考虑自然环境条件和水库功能要求等多重因素。为蓄水方便、节约工程量,通常水库选址为河谷、山谷地区“口袋形”盆地或洼地处,谷边高地作为自然屏障封闭水域。对于发电型水库而言,地势落差大、水头较大,能够为水电站创造更多水能的地方是较佳的选址地。对于防洪型水库而言,防洪调蓄能力是水库选址的重要因素。水库选址除应考虑具有较大库容系数(水库调节库容与多年径流量的比值)以外,还需结合水文过程综合分析。此外,流域水资源分配、地质稳定性、地震可能性、移民搬迁、淹没区情况、社会经济条件、工程经济与施工组织等综合因素亦对水库修建决策产生极大影响。因此,受上述自然、人为等多种因素影响,水库的地理分布难以呈现规律性(Downing et al., 2006)。

Walker(1981)曾对美国大陆 309 个天然湖泊和 106 个水库的分布情况进行了比较分析(图 1-9),认为美国大陆天然湖泊多为第四纪冰川期形成,主要分布于美国大陆中北部地区(五大湖、明尼苏达州),年降水量通常大于年蒸发量;此外亦有相当数量的潟湖(海成湖)分布于美国南部佛罗里达州。美国水库主要分布于美国大陆中西部(偏南),年蒸发量通常大于年降水量,主要用于淡水存储,故多位于淡水资源相对匮乏且湖泊数量并不丰富的地区。然而,水库修建主要受人类生产需求主导,其在全球其他地区的分布特征却并未如此。以中国为例,我国山脉纵横交错、河流水系发达的地貌特点为水库修建提供了得天独厚的条件,水库主要集中于东部、南部山地丘陵地区(图 1-10)。其中,我国大中型水库主要用于防洪、发电等,多与河流水系分布及地貌特征相关,且以防洪保护范围为选址首要考虑因素;中小型水库主要用于供水、灌溉、养殖,多与城镇分布、区域水资源供需情况等相关。我国水库分布同我国天然的五大湖区分布并无关联性。Straškraba 等(1993)曾尝试建立巴西亚马孙河流域水库自然地理分布规律。尽管将研究约束于相同流域范围内(具有相似的气候、气象条件),但受地区经济发展、水库实用功能等因素影响,亚马孙河流域水库自然地理分布特征依然复杂。

^① Straškraba 等对水库的定义:具有河流入流、库容大于 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的人工湖盆(artificial basin)水域。