



水坝工程

生态风险模拟及安全调控

Ecological Risk Simulation and Safety Regulation
on Dam Projects

杨志峰 董世魁 易雨君 刘世梁 尹心安/著



科学出版社



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

水坝工程生态风险模拟及安全调控

杨志峰 董世魁 易雨君 著
刘世梁 尹心安

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍了全球和中国的水坝建设现状,阐述了水坝工程生态风险的概念与内涵,总结了水坝工程生态风险研究进展;提出了水坝工程生态风险的理论框架;论述了水坝工程生态风险源识别、生态风险受体识别和生态风险终点确定;介绍了建坝河流生态水文过程的模拟方法,系统模拟了流域水沙分布及流域水文过程与景观格局变化;论述了建坝河流生态水动力模型;介绍了建坝河流生态水动力过程模拟及鱼类栖息地适宜度模型构建;阐述了基于水环境、生物完整性、格局与过程的水坝工程生态风险评估;论述了基于河流生态流量、水库库容优化设计及水库发电量优化的生态安全综合调控模式。

本书可作为环境科学、水利学、生态学等领域的科研、管理和教学人员的工具书,也可作为相关专业本科生和研究生的学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

水坝工程生态风险模拟及安全调控 / 杨志峰等著. —北京: 科学出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-03-045784-4

I. ①水… II. ①杨… III. ①挡水坝-水利工程-生态安全-研究
IV. ①TV64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 225195 号

责任编辑: 张 菊 刘 超 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 无极书装

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

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 18 1/4

字数: 420 000

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

水坝建设作为人类改造自然的一项工程，在人类社会发展过程中起到了非常重要的作用。人类早在 6000 年前就已经开始了水坝建设，但现代意义上的水坝建设始于 19 世纪末。欧美发达国家在 20 世纪 70 年代已经完成大部分水坝建设。80 年代以来，以中国等为代表的发展中国家正进入水坝建设的迅速发展时期。截至 2005 年年底，中国共有 15m 以上的水坝 22 000 多座，占世界总数的 44%，居世界首位。长期以来，人类过度关注水坝带来的巨大经济效益，却忽视了其潜在的生态风险。一方面，水坝工程可以促进科学合理地使用水能资源，调蓄利用水资源，缓解缺电矛盾，增强防洪能力，改善航运条件，从而为发展养殖业和旅游业、改善农业生产基础提供良好条件，进而带来可观的经济效益，推动区域经济快速发展。另一方面，水坝工程也会对河流生态环境产生深远影响，大型水坝工程会改变河流的自然流态，导致水文情势变化、水环境变化、鱼类以及其他野生动物数量和生境减少，从而给流域生态系统和生物多样性带来一系列生态风险。因此，随着水坝建设带来的生态环境问题的显现，水坝建设区流域生态环境保护问题逐渐成为当前科学研究和社会关注的焦点，协调流域水坝工程建设与生态环境保护的矛盾、维系流域生态系统健康和区域可持续发展成为水坝风险防控的迫切需要。

基于这一科学研究和社会发展需求，作者在中国水坝建设的代表性区域开展了水坝生态风险和生态安全调控研究工作，系统地总结了水坝工程生态风险识别的理论方法、生态风险的定量化模拟技术及安全调控模式，凝练为学术专著《水坝工程生态风险模拟及安全调控》。本书基于对水坝工程的生态风险进行系统识别，通过精细数值模拟模型对各风险组成进行定量化预测和评估，并以之为依据，为流域梯级电站规划和运行提供安全可靠、生态友好的调度方案。科学、合理地提出综合考虑生态效益和经济效益的水坝工程生态安全综合调控方案，可以为流域水资源开发可持续发展提供理论基础和技术保障，有效促进流域社会、经济和生态的协调发展，对建设生态文明型社会具有重要理论和现实意义。

本书共八章，第一章为绪论，主要介绍了全球和中国的水坝建设现状，阐述了水坝工程生态风险与安全调控的概念与内涵，总结了水坝工程生态风险及安全调控研究进展；第二章主要论述了水坝工程生态风险识别，包括水坝工程生态风险源识别、风险受体识别和

生态风险终点确定,提出了水坝工程生态风险的理论框架;第三章主要介绍了建坝河流生态水文过程模型,介绍了水坝影响下的流域径流过程模拟、流域水沙分布模拟以及流域水文过程与景观格局变化;第四章主要论述了建坝河流生态水动力过程模拟,介绍了建坝河流生态水动力学模型,建坝河流鱼类栖息地适宜度模型构建,并给出了建坝河流鱼类栖息地模拟实例;第五章主要阐述了基于水环境的水坝工程生态风险评价,分别从水体、底泥和鱼体三方面对建坝河流重金属污染的生态风险进行分析和评价;第六章阐述了基于生物完整性的水坝工程生态风险评价研究,包括水坝影响下河岸带和坡面植被、河流浮游生物、河流底栖生物以及河流鱼类的生态风险评价;第七章主要论述了基于格局与过程的景观生态风险评价,介绍了景观生态风险的影响因子、景观生态风险指数及空间自相关性,以及景观生态风险度及其时空动态等内容;第八章主要论述了水坝工程生态安全综合调控,包括基于河流生态流量的生态调度模式、基于水库库容优化设计的综合调控,以及基于水库发电量优化的综合调控。

本书旨在将水坝工程生态风险领域的创新性研究成果介绍给广大读者,使水力学、生态学、环境科学、水资源学和相关学科领域的科研人员、管理人员和大专院校师生了解水坝工程生态风险的相关基础理论和应用技术,从而为我国在水电开发时兼顾经济利益和生态保护的可持续水电开发提供理论依据和技术支撑。本书的研究工作得到国家自然科学基金“创新研究群体项目”(51121003)、国家国际科技合作专项项目“全球环境变化下湿地生态流量及调控”(2011DFA72420)和国家自然科学基金重点项目“水坝工程的生态风险及安全调控机理研究”(50939001)等多个国家、省部级项目的资助,在此表示衷心感谢!

本书撰写分工如下:

第一章由杨志峰、董世魁撰写;第二章由董世魁、杨志峰、李小艳撰写;第三章由刘世梁、赵清贺、杨志峰撰写;第四章由易雨君、杨志峰、陈彬撰写;第五章由易雨君、杨志峰、赵晨撰写;第六章由董世魁、李晋鹏、杨志峰撰写;第七章由刘世梁、杨志峰、邓丽撰写;第八章由尹心安、杨志峰、杨晓华撰写。

杨志峰提出了本书研究工作的总体思路并负责本书的总体框架设计,董世魁负责本书的统稿工作。参加研究和书稿整理工作的还有杨盼、唐见、刘采菱、杨林、郭亚男、陈绍晴、王聪、杨珏婕、刘琦、赵晨、安南南、武晓宇、董振慧、尹艺洁、沙威等同学。

由于时间和作者认识水平有限,内容涉及面广,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2015年2月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
一、全球水坝建设现状	1
二、中国水坝建设现状	4
三、水坝的作用与功能	7
第二节 水坝工程生态风险与安全调控的概念与内涵	9
一、生态风险的概念与内涵	9
二、生态安全的概念和内涵	11
三、水坝生态风险	12
四、水坝生态安全调控	12
第三节 水坝生态风险及安全调控研究进展	13
一、水坝生态影响研究进展	13
二、水坝生态风险评价研究进展	15
三、水坝工程生态安全调控研究进展	17
本章小结	21
参考文献	22
第二章 水坝工程生态风险识别	28
第一节 水坝工程生态风险源识别	28
一、河流流量过程改变、库区水质恶化	30
二、上游库区泥沙淤积，下游河床冲刷加剧	31
三、水生生物群落结构改变，物种组成及数量发生变化	31
四、栖息地破碎化，土地利用类型转变	31
五、库区植物群落、物种组成改变及土壤理化性质变化	32
六、流域生态系统完整性变化	32
第二节 水坝工程生态风险受体识别	32
一、陆生风险受体	33

二、水生风险受体	36
第三节 水坝工程生态风险终点确定	40
一、陆生受体的生态风险终点	40
二、水生受体的生态风险终点	43
三、景观水平生态风险终点	47
本章小结	54
参考文献	55
第三章 建坝河流生态水文过程模型	57
第一节 生态水文过程模型选择、参数率定与验证	57
一、生态水文过程模型选择	57
二、SWAT 模型参数率定与验证	59
第二节 水坝影响下的流域径流过程模拟	61
一、漫湾大坝建设前后澜沧江流域入口和出口的径流变化	61
二、漫湾大坝建设前后气候因子与径流相关性分析	62
三、水坝建设对径流变化的贡献程度	63
四、漫湾大坝建设运行对库区径流的影响	63
第三节 水坝影响下的流域水沙分布模拟	65
一、澜沧江中下游水沙分布的 SWAT 模型构建	65
二、澜沧江中下游 1990 ~ 2009 年月均径流泥沙模拟	74
三、澜沧江中下游 1990 ~ 2009 年泥沙产量分布模拟	74
本章小结	80
参考文献	81
第四章 建坝河流生态水动力过程模拟	82
第一节 建坝河流生态水动力学模型	82
一、一维非恒定流水动力模型	83
二、二维水动力模型	85
三、三维水动力模型	86
四、栖息地适宜度模块	87
第二节 建坝河流鱼类栖息地适宜度模型构建	88
一、长江中游四大家鱼及其栖息地介绍	88
二、四大家鱼栖息地适宜度模型建立	90
第三节 栖息地模型验证与应用	91

一、模型验证	91
二、四大家鱼栖息地适宜度模型应用	100
第四节 基于食物网的多受体综合生态风险模拟	106
一、基于食物网的多受体生态风险网络构建	106
二、水坝生态风险的多受体间传递模拟	107
本章小结	109
参考文献	110
第五章 基于水环境的水坝工程生态风险评价	112
第一节 澜沧江中游底泥重金属及营养元素污染的生态风险	112
一、研究区及研究方法	113
二、沉积物粒度分布特征	114
三、沉积物中重金属元素与营养元素含量分布特征及相关性	115
四、重金属元素的聚类分析	117
五、金属元素的生态风险评价	118
六、结论	122
第二节 长江中下游底泥重金属污染风险评价	123
一、研究区及研究方法	124
二、底泥中重金属含量分布	125
三、潜在生态风险评价	126
四、重金属之间的相关关系	128
五、主成分分析	129
第三节 长江中下游鱼体重金属污染健康风险评价	131
一、长江中下游鱼体内的重金属含量分布	132
二、靶标危害系数的确定 (THQ)	135
三、食用鱼类可能造成的健康风险评价	136
第四节 鱼体重金属含量影响因素分析	137
一、鱼体重金属含量与环境中重金属浓度的关系	137
二、鱼体内重金属含量与鱼体大小的关系	139
三、鱼体内重金属含量与空间分布的关系	144
本章小结	147
参考文献	148
第六章 基于生物完整性的水坝工程生态风险评价研究	154
第一节 水坝影响下河岸带和坡面植被的生态风险评价	154

一、植被与环境因子调查	155
二、大坝蓄水对植被的生态风险	157
第二节 水坝影响下河流浮游生物的生态风险评价	160
一、浮游生物的采样方法及数据处理	161
二、浮游生物完整性指数构建与评价	163
第三节 水坝影响下河流底栖生物的生态风险评价	166
一、底栖动物采样与监测分析	167
二、水坝建设对底栖动物的生态风险	169
第四节 水坝影响下河流鱼类的生态风险评价	174
一、鱼类调查与采样	174
二、鱼类生物完整性指数构建与分析	176
三、水坝建设对鱼类的生态风险	178
本章小结	182
参考文献	183
第七章 基于格局与过程的景观生态风险评价	185
第一节 大坝建设对漫湾库区景观格局破碎化风险	185
一、漫湾库区植被格局变化的定量研究	187
二、植被格局变化的空间分布特征	189
第二节 基于格局与过程的景观生态风险评价模型构建	191
一、景观生态风险指数的构建	192
二、景观生态风险指数的计算	193
三、空间变异原因分析	193
第三节 景观生态风险指数空间分析	194
一、景观生态风险指数的空间自相关	194
二、景观生态风险度地统计分析	195
第四节 景观生态风险度的时空动态分析	196
第五节 大坝建设的景观生态风险的影响因子分析	198
本章小结	199
参考文献	200
第八章 水坝工程生态安全综合调控	204
第一节 流域生态安全综合预警	204
一、生态安全预警关键指标确定	204

二、生态安全预警模型构建 205

第二节 生态水文情势扰动度量 207

一、研究进展 208

二、水文指标次序变化对水文情势扰动评价的影响 209

三、月尺度水文情势扰动评价方法描述水文情势信息有效性 217

第三节 水库生态调度模式 225

一、调度模式建立 226

二、典型水库调度参数优化 231

第四节 水库合理生态库容确定 233

一、水库最小库容确定方法 233

二、水库适宜库容确定方法 241

第五节 水电站合理发电量规划 243

一、方法建立 244

二、典型水电站规划发电量优化 247

本章小结 249

参考文献 250

附录 254

第一章 | 绪 论

水坝建设一度被视为人类文明进步和经济发展水平的标志，但是随着水坝建设带来的生态环境问题的逐渐显现，水坝工程与流域生态环境保护问题成为当前科学研究和社会关注的焦点。一方面，水坝工程可以促进科学合理地使用水能资源，调蓄利用水资源，缓解缺电矛盾，增强防洪能力，改善航运条件，从而为发展养殖业和旅游业、改善农业生产基础提供良好条件，进而带来可观的经济效益，推动区域经济快速发展。另一方面，水坝工程也会对河流生态环境产生深远影响，大型水坝工程经常改变河流的自然流态，导致水文情势变化、水环境变化、鱼类以及其他野生动物数量和生境减少，从而给河流生态系统和生物多样性带来一系列生态风险。本章在综述国内外水坝建设现状、水坝生态影响和生态效应等相关研究的基础上，结合环境风险管理、生态模拟、生态评价等学科的理论知识，提出了水坝工程生态风险与安全调控的概念和内涵，明确了水坝生态安全调控的内容和措施，梳理了国内外水坝生态风险及安全调控研究进展。

第一节 概 述

水坝建设作为人类改造自然的一项工程，在人类社会的发展过程中起到了非常重要的作用。人类早在 8000 年前就已经开始了水坝建设，但现代意义上的水坝建设始于 19 世纪末。欧美发达国家在 20 世纪 70 年代已经完成大部分水电坝建设。80 年代以来，以中国等为代表的发展中国家正进入水坝建设的迅速发展时期，而与此同时，欧美等发达国家也在重新审视水坝建设的利弊得失问题。在水坝发展的历史进程中，早期人们建造水坝的目的主要是为人类生活提供用水、灌溉、防洪、建设航道以及娱乐场所等，随着社会的发展，水坝的功效主要转向于蓄水发电，为国民经济的发展作出贡献。本节将重点介绍全球和中国水坝建设的现状，阐明水坝建设的功能和作用。

一、全球水坝建设现状

全球河流水系众多，人类为了能充分利用水能，所以在河流上修建了众多水坝工程，为自身的发展提供能源、食物和水源。水坝工程的历史与人类发展的历史相伴相随。关于水坝的记录最早可以追溯到公元前 6000 年的美索不达米亚（亚洲西南部）。在公元前 2000 年，以灌溉和水源供给为主要目的的水坝建设已经遍布世界各个地方（WCD, 2000）。最古老的、仍在使用的中国四川省的都江堰，它修建于公元前 256 年，至今仍然为成都平原的广大农田提供灌溉水源（Zhang and Jin, 2008）。然而，第一座具有现代意义的水坝

(世界水坝委员会定义为坝高 15m 的大坝) 于 1890 年在美国建成 (WCD, 2000)。

在 20 世纪前, 全世界仅有 700 座大坝, 而现存的多数大坝是在 20 世纪修建完成的。水坝建设在全球范围内快速发展是在第二次世界大战后, 尤其是 20 世纪前叶, 全球大约有 5000 座大坝在此期间修建。在北美和欧洲国家, 修建水坝的速度在 1980 年后开始下降 (Zankhana and Dinesh, 2008; WCD, 2000)。截至 2008 年, 世界上已修建的大型水坝超过 58 000 座 (图 1-1)。

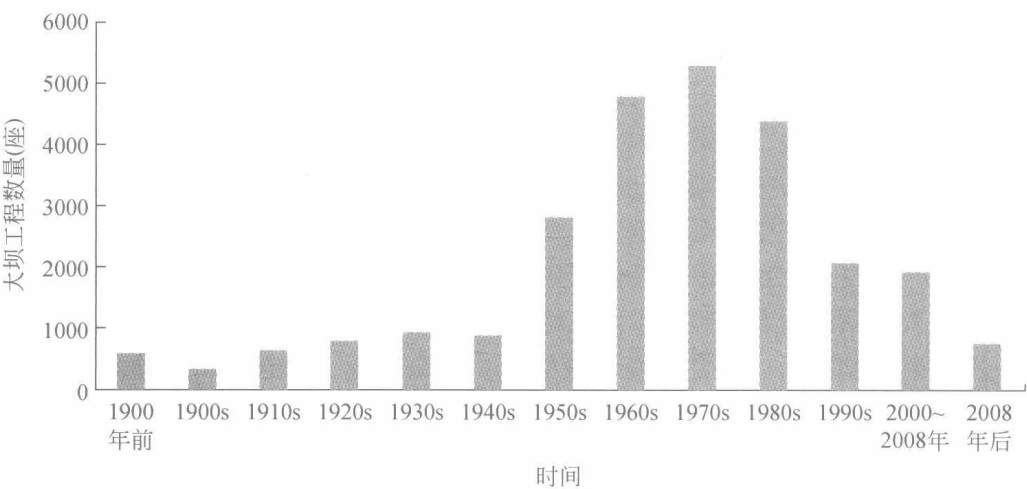


图 1-1 国外不同时期大坝工程数量

2008 年前的数据引自 ICOLD (2014); 2008 年后的数据引自中国大坝协会 (2015)

世界范围内大型水坝工程的实施主要取决于社会经济发展速度, 东亚、南亚、北美、南美和欧洲是全球水坝建设数量或密度最高的 5 个区域。世界银行 (World Bank, 2009) 公布的数据显示, 经济合作与发展组织 (OECD) 成员国通过筑坝已经开发了本国 70% 的水能资源, 而发展中国家仅开发了 30% 的水能资源, 非洲国家通过筑坝仅开发了不到 10% 的水能资源。目前, 发达国家已经在大多数河流上修建了水坝 (表 1-1), 所以这些国家的工作重点是如何科学地管理和高效地运行现有的水坝。但是, 对于发展中国家而言, 水坝工程作为有利于经济发展的活动应得到推崇。

表 1-1 全球建坝 (坝高大于 60m 的大坝) 最多的河流

流域名称	流域面积 (10 ³ km ²)	流经国家	大坝数量 (座)
长江	1722	中国	46
拉普拉塔河	2880	阿根廷、玻利维亚、巴西、巴拉圭、乌拉圭	27
底格里斯河与幼发拉底河	766	土耳其、伊拉克、伊朗、叙利亚、约旦	26
怒江-萨尔温江	272	中国、缅甸、泰国	26
克兹勒河	78	土耳其	15
恒河	1016	中国、印度、尼泊尔、孟加拉	14
托坎廷斯河	764	巴西	12

续表

流域名称	流域面积 (10 ³ km ²)	流经国家	大坝数量 (座)
亚马孙河	6145	巴西、秘鲁、玻利维亚、哥伦比亚、厄瓜多尔、委内瑞拉、圭亚那、苏里南、巴拉圭、法属圭亚那	11
澜沧江-湄公河	806	中国、泰国、老挝、柬埔寨、越南、缅甸	11
雅鲁藏布江	651	中国、印度、不丹、孟加拉	11
珠江	409	中国、越南	10
多瑙河	801	德国、奥地利、斯洛伐克、匈牙利、克罗地亚、塞黑、罗马尼亚、保加利亚、摩尔多瓦、乌克兰	8
黄河	945	中国	8
库那-阿拉斯河	205	阿塞拜疆、伊朗、格鲁吉亚、亚美尼亚、土耳其	8
耶希尔河	36	土耳其	7
比约克湾河	25	土耳其	7
乔鲁赫河	19	土耳其	7
苏苏尔卢克河	22	土耳其	7
埃布罗河	83	西班牙、安道尔	6
印度河	1082	中国、阿富汗、巴基斯坦、印度	6
克孜勒奥赞河	60	伊朗	6

资料来源：Schelle et al. , 2004

亚洲不仅是世界上建有水坝最多的区域，还是目前建设强度最大的区域（图 1-2）。中国和印度作为世界上两个人口最多的国家，修建了许多新的水坝。两国经济的快速发展不仅需要更多的能源和水资源，而且也为这些大型水坝工程项目提供了雄厚的资金支持（Liu and Diamond, 2005；Bawa et al. , 2010）。目前，世界上在建水坝数量最多的 5 个国家都在亚洲：印度有 700 ~ 900 座水坝在建、中国有 280 座水坝在建、土耳其有 209 座水坝在建、韩国有 132 座水坝在建、日本有 90 座水坝在建（WCD, 2000）。



图 1-2 世界范围内大坝分布情况（Wang et al. , 2014）

美国是北美洲建有水坝数量最多的国家，大约有 8000 座（图 1-2）。然而，在 20 世纪末，美国拆除了一批明显陈旧的水坝。20 世纪 90 年代初，美国垦务局作为负责在西部修建大型水坝的机构，其最高官员宣称水坝建设的时代已经结束（Longman, 2008）。1998 年，美国水坝拆除的速度首次超过了修建的速度（WCD, 2000）。拆除的旧水坝对于河流系统的修复具有诸多益处。然而，部分学者的研究结果表明，拆除旧水坝仍然会对生态系统造成许多负面效应，因为生态系统需要被迫适应新的水文条件。

目前，在欧洲大约有 6000 座大坝。整个欧洲的水坝建设情况可以通过英国和西班牙的案例来说明。在英国，19 世纪上半叶是水坝数量快速增长的时期。1950 年后，英国平均每年都会兴建 5.4 座水坝，直至 1990 年降为 0，2010 年英国共有 486 座大坝。在西班牙，1900 ~ 1950 年的年均水库数量增长速度为 4 座，1975 年西班牙共建成 741 座水坝。1990 年，西班牙的水坝修建速度增长 2 倍多，截至 2010 年西班牙共有 1172 座水坝，是欧洲水坝数量最多的国家（Anonymous, 2010）。由于适合修建水坝的地点越来越少和人们日益增强的环保意识，欧洲修建水坝的速度正在逐年下降。

二、中国水坝建设现状

（一）中国水坝建设历史

中国在建设防洪和灌溉所用的水坝和防洪堤方面具有悠久的历史，部分建设于 2000 多年前的水坝目前仍在运行。这些水利工程为中国古代的农业文明作出了卓越的贡献。但是，古代多数水坝的高度远达不到现代意义上大坝的高度（15m）。

根据世界水坝委员会的数据显示，1950 年前世界范围内的 5196 座水坝中，中国仅占 22 座。然而在 1950 ~ 1982 年，随着水坝建设速度的快速增长，中国修建的水坝数量位居世界第一。1990 年后，中国年均修建 250 ~ 320 座水坝，占同期世界大坝建设数量的 1/5 左右（同期全球每年均建坝 1100 ~ 1700 座）。截至 2005 年年底，中国共有 15m 以上的水坝 22 000 多座，占世界总数的 44%，居世界首位。1950 年以来，中国的水坝建设历史可以分为以下 4 个阶段。

第一阶段是 1950 ~ 1957 年，这个阶段水坝建设刚刚开始。这个时期国家的战略决策着眼于管理那些具有较高风险的河流，如淮河、海河和黄河。大多数水坝的高度为 50 ~ 100m，这些水坝的目的是调节该流域的洪水。这个时期修建了一些著名的水坝，如北京的官厅水坝（46m）、安徽的佛子岭水坝（74.4m）和河南的三门峡水坝（106m）。

第二阶段是 1958 ~ 1966 年，这个阶段建设了许多大型基础设施。中国各级政府均参与到此建设活动中，以至于中国的大型水坝数目明显增长。这个时期建设的大型水坝如黄河干流的刘家峡大坝（147m）。

第三阶段是 1967 ~ 1986 年。这个时期水坝建设速度明显下降。然而，仍有许多重要的水坝修建于这个时期，如位于长江上的葛洲坝。这个阶段所建成的水坝在质量和工艺上都有了显著的提升。

第四阶段是从 1987 年至今。中国经济的快速发展不仅为大型基础工程建设提供了资金支持，同时也产生了大量的用电需求。这种全国范围内的用电需求催生了大量的水坝工程建设。黄河干流的小浪底大坝、长江干流的三峡大坝、澜沧江干流的小湾大坝等都是在这个时间段内建成的。

在中国水坝建设发展的过程中，水库的管理以水库的库容作为划分依据（Pan and He, 2000）：库容超过亿立方米的水库由省级或者更高的机构管理；千万立方米到亿立方米的水库由地市级所在地政府管理；百万立方米到千万立方米的水库由县级政府管理；十万立方米到百万立方米的水库由镇级政府管理；库容在十万立方米以下的水库由所在村委会管理。

（二）中国水坝分布

在 20 世纪 80 年代，中国政府便制定了长期的水利工程发展规划，并重点建设水电工程。水电被认为是一种比化石能源更清洁、廉价的能源。目前，中国 80% 的电力由火力发电提供。为了减少能源消耗及其对环境的压力，中国政府致力于通过发展水电，更改能源结构。中国政府制定的水电发展规划涵盖中国所有的大流域，并且其建设速度在快速发展的经济要求下变得更快。截至 2013 年 12 月，中国规划建有十三大水电基地，主要分布的区域有黄河水系、长江水系、珠江水系、西南诸河、东北诸河、东南诸河和湘西诸河。

1. 黄河水系

黄河发源于中国青海省巴颜喀拉山脉，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区，最后于山东省东营市垦利县注入渤海，全长为 5464km，是中国第二长河，仅次于长江，其也是世界第五长河流。在中国历史上，黄河及沿岸流域给人类文明带来了巨大的影响，是中华民族最主要的发源地，中国人称其为“母亲河”。目前，黄河水系包括黄河上游水电基地和黄河北干流水电基地，共建有中大型水电站 15 座，包括拉西瓦水电站、李家峡水电站、公伯峡水电站、盐锅峡水电站、青铜峡水利枢纽、万家寨水利枢纽、天桥水电站、三门峡水利枢纽、小浪底水利枢纽等。其中，小浪底水利枢纽坝顶高程为 281m，正常高水位为 275m，库容为 126.5 亿 m^3 ，水库面积达 272.3 km^2 ，控制流域面积为 69.42 万 km^2 ；总装机容量为 180 万 kW，年平均发电量为 51 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；每年可增加 40 亿 m^3 的供水量。

2. 长江水系

长江发源于唐古拉山脉各拉丹冬峰西南侧，流域横跨中国东部、中部和西部三大经济区，共计 19 个省、市、自治区，是世界第三大流域，流域总面积约为 180 万 km^2 ，占中国国土面积的 18.8%，流域内有丰富的自然资源。全长约为 6300km，比黄河长 800km，在世界大河中长江的长度仅次于非洲的尼罗河和南美洲的亚马孙河，居世界第三位。但尼罗河流域跨非洲 9 国，亚马孙河流域跨南美洲 7 国，长江则为中国所独有。目前，长江水系包括金沙江水电基地、雅砻江水电基地、大渡河水电基地、乌江水电基地以及长江上游水电基地，共建有水电站 43 座，包括溪洛渡水电站、二滩水电站、铜街子水电站、龚咀水电站、宝珠寺水电站、碧口水电站、乌江渡水电站、洪家渡水电站、安康水电站、五强溪

水电站、凤滩水电站、丹江口水利枢纽、隔河岩水电站、三峡水利枢纽、柘溪水电站、陈村水电站等。其中，三峡水利枢纽坝顶高程为 185m，大坝长为 2335m，正常蓄水位为 175m，总库容为 393 亿 m^3 ，总装机容量为 2250 万 kW，年发电量为 988 亿 kW，建成后可通行年货运量由 1000 万 t 增至 7000 万 t。

3. 珠江水系

珠江水系泛指由西江、北江、东江及珠江三角洲诸河 4 个水系组成的流域，流域面积为 453 690 km^2 ，其中我国境内面积为 442 100 km^2 。目前，珠江流域建有南盘江、红河水电基地，共建有水电站 20 座，包括鲁布革水电站、天生桥一级水电站、天生桥二级水电站、龙滩水电站、岩滩水电站、大化水电站、新丰江水电站等。其中，龙滩水电站位于红水河上游，广西壮族自治区天峨县境内，该水电站具有较好的调节性能，发电、防洪、航运等综合利用效益显著。龙滩的水电清洁能源将为广东省经济社会的可持续发展提供优质电能。

4. 西南诸河

西南诸河包括澜沧江流域和怒江流域，建有澜沧江干流水电基地和怒江水电基地。西南诸河发源于西藏自治区唐古拉山，其中澜沧江主干流总长度为 2139km，流经青海、西藏和云南 3 省区，在云南省西双版纳傣族自治州出境，后始称其为湄公河。湄公河流经老挝、缅甸、泰国、柬埔寨和越南，于越南胡志明市流入中国南海。怒江全长为 3240km，经青海、西藏和云南 3 省区，流入缅甸后改称其为萨尔温江，最后注入印度洋的安达曼海。目前，澜沧江共规划建有 8 座梯级水电站，包括糯扎渡水电站、小湾水电站、漫湾水电站、大朝山水电站等。怒江水电资源丰富，规划建有十一级水电站，然而在国内多方的争辩下，迟迟未开发建设。小湾水电站总库容约为 150 亿 m^3 ，装机容量为 420 万 kW，坝高为 292m，以发电为主，兼有防洪、灌溉、拦沙及航运等综合利用效益。

5. 东北诸河

东北诸河包括黑龙江、牡丹江、松花江、鸭绿江、嫩江在内的 5 条主要河流，建有东北水电基地，总发电量达 1.132 亿 kW。其中，白山水电站是东北诸河流域最大的水电站，正常蓄水位为 413m，总库容为 62.15 亿 m^3 ，坝顶高度为 676m，总装机量为 150 万 kW。

6. 东南诸河

东南诸河主要指福建省、浙江省和江西省的河流，建有闽浙赣水电基地。目前，共建有 15 座水电站，包括新安江水电站、湖南镇水电站、石塘水电站、沙溪口水电站、天荒坪水电站等，总发电量达 1680 万 kW。

7. 湘西诸河

湘西诸河包括湖南省西部沅水、资水和澧水流域，建有湘西水电基地。三水的流域面积总计为 13.7 万 km^2 ，其中湖南省境内约为 10 万 km^2 ，水能资源蕴藏量总计为 1000 万 kW。目前，建有凤滩水电站、三江口水电站、柘溪水电站和马迹塘水电站。其中，凤滩水电站坝高为 112.5m，总库容为 17.33 亿 m^3 ，年平均发电量为 20.43 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，总装机容量达到 81.5 万 kW，以发电为主，兼顾防洪、航运、灌溉、养殖等。

三、水坝的作用与功能

(一) 灌溉

现在世界上淡水消费最多的是农业灌溉，确保农业用水是粮食生产安全的第一要务。将水坝用于灌溉的历史已经有好几个世纪，一些水坝的寿命已经超过 500 年。具有灌溉功能的水坝高度为 15 ~ 100m 或 100m 以上，然而用于灌溉的水坝高度往往低于用于防洪和发电的水坝高度。水坝的灌溉功能对快速发展的现代农业具有较大的贡献。世界上有 1/5 的农业土地通过灌溉的方式进行补水，灌溉农业的产量占世界总产量的 40%。世界上半以上的水坝建设的目的是灌溉，并且全球范围内 2.68 亿 m^3 的农田有 30% ~ 40% 依靠水坝补充水源。扣除地表水和地下水的综合利用，水坝对世界粮食生产的贡献率为 12% ~ 16%。中国、印度、美国和巴基斯坦的灌溉面积占世界总面积的 50%。从农业灌溉比例和大型水坝提供灌溉用水的比重来说，大型水坝在灌溉中的规模和重要性对不同国家的差别很大。埃及农田的灌溉用水几乎 100% 来自阿斯旺水坝的供给，而尼泊尔和孟加拉的水坝只为本国提供了 1% 的灌溉用水。在中国和印度，大型水坝提供了 30% ~ 35% 的灌溉用水。在中国北方地区，由于降水较少、河道水位较低，许多水坝建设的目的是为了满足不同农田的灌溉用水。

随着 21 世纪粮食需求的增加、土地面积的减少、灌溉需求的增加以及泥沙淤积导致的库容的减少，2000 ~ 2050 年对灌溉库容的需求增加 2 倍左右。到 2050 年，水坝灌溉用水可能是现在的 1.5 ~ 2.5 倍。目前，在坝高超过 60m 的 350 座在建水坝中，有 50 座完全用于灌溉，100 座部分用于灌溉。灌溉用途的水坝主要集中于土耳其、伊朗和摩洛哥等国家。

(二) 供水

世界上大约有 2500 座水坝用于供水，但大多数大型水库是多功能并举，只有小型水库只用于供水。从全球角度来看，城市用水和河流抽取淡水的总量为 7%，从湖泊抽取淡水的总量为 22%。很多水坝的建设，都是为日益增长的城市用水和工业用水需求提供可靠的水源供给，尤其是在自然水源供给不足的干旱地区，这一现象更为明显。全球范围内，大约 12% 的水坝是为供给水源而建，其中 60% 位于北美和欧洲。这些水坝有 60% 建设在北美和欧洲（WCD, 2000）。根据供水安全研究表明，水坝建设的密度与供水安全等级呈显著正相关关系（Vörösmart et al., 2010）。就一个国家而言，各城市的民用水和工业用水对水坝和水库的依赖程度差别很大。在德国的萨克森地区，水库为 200 万居民提供 40% 的水源，洛杉矶供水的 55% 来自本底地下水资源。越南胡志明市从地表水获取 89% 的用水，而河内市的用水 100% 取自地下水。

2000 ~ 2050 年，世界人口可能增加 50%，耗水量也将随之大幅度增加。当气候变化减少枯水季节可用水量时，相应的需水量增加 2 倍多。除新建水坝外，共享水电站库区的