

水电可持续发展 评价指标体系研究

STUDY ON EVALUATION INDEX SYSTEM
OF HYDROPOWER SUSTAINABLE DEVELOPMENT

王金国 著



西南交通大学出版社
Http://press.swjtu.edu.cn

水电可持续发展 评价指标体系研究

王金国 著



西南交通大学出版社

[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

图书在版编目 (C I P) 数据

水电可持续发展评价指标体系研究 / 王金国著. —
成都: 西南交通大学出版社, 2011.7
ISBN 978-7-5643-1228-2

I. ①水… II. ①王… III. ①水利电力工业—可持续发展—评价—指标—研究 IV. ①F407.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 116325 号

水电可持续发展评价指标体系研究

王金国 著

责任编辑	李晓辉
封面设计	原谋书装
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	148 mm×210 mm
印 张	7.312 5
字 数	204 千字
版 次	2011 年 7 月第 1 版
印 次	2011 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1228-2
定 价	57.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

人类日益面临人口爆炸性增长、资源过度消耗、环境污染严重、生态遭到破坏、贫富差距增大等挑战，威胁着人类未来生存与命运。与此同时，以化石原料为主的世界能源系统排放大量温室气体，正导致全球变暖并频繁引发灾害，如干旱、暴雨、洪水、飓风、沙尘暴等。愈演愈烈的全球能源与环境危机，迫使全球不得不对发展方式进行重新定位和反思。人类开始理性地重新审视发展过程，并逐步意识到现行以“高投入、高消耗、高污染”为特征的生产模式和消费模式已不再适应当今和未来的发展需要，必须寻找一条“人口、经济、社会、环境和资源”相互协调的低碳可持续发展之路。

水电在能源回报率、技术、成本、电力调度等方面优势明显，是重要的可再生能源，是全球解决可持续发展面临的节能减排、气候变化和实施环境友好能源战略的必然选择。尤其是在水能资源丰富但能源却严重依赖煤炭的发展中国家（如中国、印度和古巴等）。

近年来，全球和我国水电事业正蓬勃发展，成绩显著，但随着人们对自然和生态的关注，加之个别水电项目开发中也存在一些问题，水电开发受到误解、非议甚至反对，正经受着前所未有的考验，这制约了水电发展。国际上，个别水电项目对江河流域和地区生态系统的破坏以及对流域居民生活的负面影响，导致了水电项目在西方发达国家受到越来越多的限制和阻碍。在发展中国家，开发水电也出现了少数急功近利的现象。由于对生态环境保护及移民安置重视不够，产生了激烈争论和影响，甚至造成项目延期和停工，付出了沉重代价。

在中国，改革开放 30 多年和西部大开发以来，水电事业取得了辉煌成就。自 2004 年中国水电就一直处于世界首位。但随着社会经济发展和变化，水电开发面临许多新情况、新问题和新挑战，如：现在水电开发的理念、标准、方法已不适应可持续发展的新要求；缺乏国家层面的水

电可持续发展规划(含西电东送规划);水电移民和生态环境问题备受关注;同一流域资源无序开发现象突出;能源结构不协调;减排任务艰巨;极端气候频繁等。自2007年,大型水电项目的审批基本停滞,水电优先发展的能源发展战略受到严重挑战。与中国作为一个发展中国家,资源十分困乏而水电资源丰富的现实形成了极大的反差。尤其在四川等西部贫困落后的民族地区显得更加突出,尽管实施十年的“西部大开发”使西部水电取得长足发展,但开发程度仍然很低,资源富集与民族地区相对贫困落后的现状形成鲜明对比。

面对水电发展中的问题和挑战,必须开展水电可持续发展研究,在“科学、规范、公正、公开、高效”的基础上做出评价和决策,开创一条经济发展、民生保证和环境保护共赢的水电可持续发展之路。因地制宜、因时制宜地发展水电,寻求开发水能资源、优化能源结构、减少温室气体排放、推动脱贫致富、保护生态环境、增进民族团结和区域和谐的结合点,努力构建政府、企业、移民、居民、利益相关群体等的利益平衡点,使水电发展焕发生机,步入可持续发展的正常轨道。

目前,国内外还没有基于可持续发展理论,并被公认可操作性强的水电可持续发展评价指标体系,评估和监测水电发展的状态和进程,引导和规范水电发展行为,把水电发展从不可持续的轨道调整到可持续发展的正常轨道,这就是本次研究的初衷。

作 者

2011 年春

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 研究背景	1
第二节 研究目的和意义	29
第三节 国内外水电开发评价方法研究现状	31
第二章 水电可持续发展的理论基础	48
第一节 可持续发展理论	48
第二节 区域协调发展理论	79
第三节 生态环境价值理论	81
第四节 利益相关者（群体）理论	82
第五节 增长极理论	90
第六节 梯度推进理论	90
第七节 点轴开发理论	91
第八节 水电开发与可持续发展的关系	91
第三章 水电可持续发展综合评价指标体系研究	99
第一节 概 述	99
第二节 水电可持续发展的系统关系	100
第三节 水电可持续发展的定义	102
第四节 水电可持续发展的基本内涵	103
第五节 水电可持续发展的模式与程序	105
第六节 水电可持续发展解决和需要注意的问题	108

第七节	水电可持续发展综合评价模型及 指标体系的构建	109
第四章	雅砻江中游水电可持续开发研究	144
第一节	概 况	144
第二节	雅砻江中游可持续开发规划方案研究	149
第三节	雅砻江中游水电可持续开发对策与建议	175
第五章	区域协调发展与地区稳定	177
第一节	四川省的战略地位	177
第二节	四川省可持续发展面临的问题	181
第三节	中国区域发展战略及主要问题	183
第四节	雅砻江中游干流梯级水电开发的显著效益	185
第五节	地区稳定及区域可持续发展的根本途径	204
第六章	结论与展望	207
第一节	结 论	207
第二节	对促进中国水电可持续发展的对策与建议	209
第三节	课题展望	224
参考文献		226

第一章 绪 论

第一节 研究背景

一、国内外水电发展成绩与问题同在，机遇与挑战并存

1. 国际水电发展成就显著，发展中国家面临机遇与挑战

(1) 全球水电资源概况及开发历程。

根据 2003 年国际水力发电协会统计资料，全世界水电理论蕴藏量约 40 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、技术可开发约 15 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、经济可开发约 8.8 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

古埃及人以尼罗河为依托，形成了古埃及文明，在天文学、文字、数学、建筑艺术和科学技术都等方面给人类留下了宝贵财富；古巴比伦王国以发源于土耳其亚美尼亚的幼发拉底河、底格里斯河形成的“美索不达米亚”平原为依托，在两河流域得天独厚条件哺育下，孕育了苏美尔文明；古印度人以发源于喜马拉雅山冰雪融水印度河为依托，孕育了古印度文明，其文学、哲学和自然科学等方面对人类文明做出了独创性的贡献；中国先祖以长江和黄河为母亲河，孕育和形成了灿烂的中华文化并昌盛至今。世界上最古老的大坝被公认为是埃及的 Sadd-el-Kafara 大坝，大约建于公元前 2600—2700 年。

电能被认识和利用以后，利用水力发电造福人类更是一度成为人类文明进步的象征。1871 年，法国工程师 Thome de Gamond 及其好友拿破仑三世提出将“原始野性”的河流改造成为文明之河，让河流成为政权稳定的有力保障。他的计划包括将河流转变成一系列联系的河段，每个河段保持水位恒定，以使得河流能够通航，便于引水灌溉，并能够形成 4 万个水位落差进行水力发电从而替代蒸汽机发电。在古巴，20 世纪

60 年代，菲德尔卡斯特罗崇尚大坝建设，声称其目标是“不让一滴水损失，不让一滴水流入大海，不让一条河流上没有大坝”。到了 20 世纪初期，建筑大型水坝成了经济发展和社会进步的 synonym。美国 20 世纪三十年代建成的不少重要水坝和水电站就纷纷以历任总统的名字命名。由于建坝被视为是现代化和人类控制、利用自然资源能力的象征，以此为手段的水电开发风起云涌。水资源的狂热开发始于 20 世纪前半期，并于 20 世纪五六十年代达到顶峰，导致了巨大的社会和环境成本，还引发了对水利开发的激烈讨论。到 70 年代达到顶峰时，全世界几乎每天都有两、三座新建的水库或水电站投入使用。据统计，至 20 世纪末，世界上有 24 个国家的 90% 电力来自水电，有 1/3 的國家的水电占到一半以上。水坝建设、水力发电已经成为当今人类社会文明的重要组成部分。

(2) 国际水电发展现状

世界上有 24 个国家依靠水电为其提供 90% 以上的能源，如巴西、挪威等国；有 55 个国家依靠水电为其提供 50% 以上的能源，包括加拿大、瑞士、瑞典等国；有 62 个国家依靠水电为其提供 40% 以上的能源，包括南美的大部分国家。全世界水电的发电量占所有发电量总和的 19%，水电总装机容量 728.49 GW。总体看，发达国家水电开发程度已经比较高，平均开发程度已在 60% 以上。其中美国约 82%，日本约 84%，加拿大约 65%，德国约 73%，法国、挪威、瑞士也均在 80% 以上，而发展中国家水电开发比例则相对较低。如图 1-1 所示。

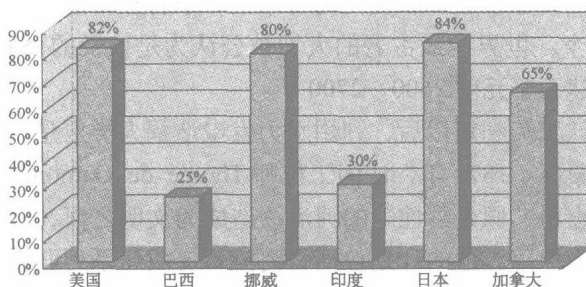


图 1-1 部分国家水电资源开发情况

(3) 国际水电发展前景

全球近 16 亿人口还用不上电能或其他商业能源。世界上大约有经济可开发水资源 8.8 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{年}$ ，约 150 个国家仍存在开发潜力，大约 70% 经济可行的水电资源有待开发，其中 90% 在能源紧缺的发展中国家。在非洲，水电开发率还不足 5%。在发展中国家，通过水电区域开发和工业化发展，将极大地促进当地减轻贫困、实现经济快速增长。

2. 中国水电发展成绩辉煌，但也存在着问题

(1) 全国水电资源开发情况

① 资源总量。国家发展和改革委员会于 2000 年组织开展了水力资源复查，2005 年 11 月 25 日正式发布了结果。我国水力资源理论蕴藏量在 10 000 kW 及以上的河流共 3 886 条，蕴藏年电量为 60 829 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 、平均功率为 69 440 万 kW ，技术可开发装机 54 164 万 kW 、年发电量 24 740 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，其中经济可开发装机 40 180 万 kW 、年发电量 17 534 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ （数据不包括台湾省）。全国水电资源理论蕴藏量、技术可开发量和经济可开发量均居世界首位。全国水电资源复查成果平均功率、装机容量汇总如图 1-2 所示。

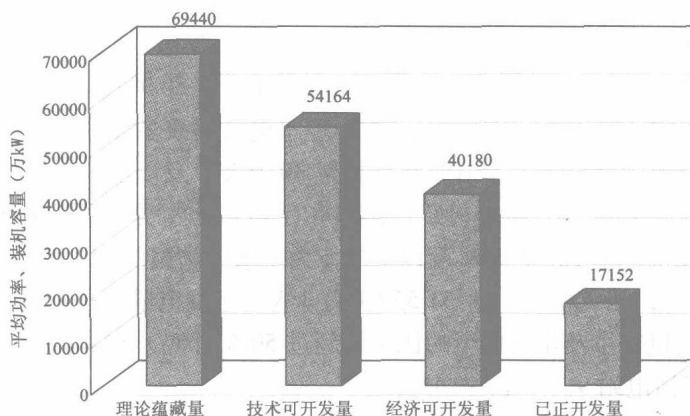


图 1-2 全国水电资源复查成果平均功率、装机容量汇总

② 我国水电资源的特点。总量大，但水电资源地域分布不均，需要“西电东送”。西部（云南、贵州、四川、西藏、重庆、陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆、广西、内蒙古等 12 个省级行政区域）水能资源约占全国总量的 81.46%，其中西南（云南、贵州、四川、重庆、西藏）占 66.70%；东部（辽宁、北京、天津、河北、山东、江苏、浙江、上海、广东、福建、海南）仅占 4.88%。全国水电资源地区分布如图 1-3 所示。

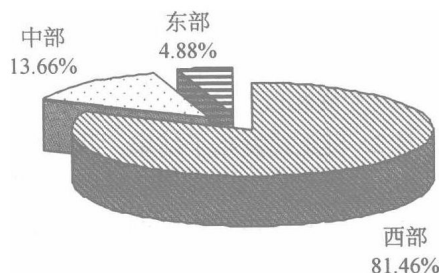


图 1-3 全国水电资源地区分布图

水电资源集中于大江大河，利于集中开发和规模外送。我国水电资源富集于金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、乌江、长江上游、南盘江、红水河、黄河上游、湘西、闽浙赣、东北、黄河北干流以及怒江等十三大水电基地，其总装机容量约占全国技术可开量的 50.9%。

大型水电站装机容量比重大，中小型水电站座数多、分布地域广。全国水电资源技术可开发量中，装机容量 30 万 kW 及以上的大型水电站 263 座+国际界河 10 座，但装机容量和发电量比重分别达 71.76% 和 72.43%。装机容量 100 万 kW 及以上的特大型水电站虽仅 111 座+国际界河电站 5 座，但装机容量达 31 559.4 万 kW，年发电量达 14 579.07 亿 kW·h，其装机容量及年发电量的比重均超过 50%。小型水电站共有 12238 座+国际界河电站 9 座，占 92.1%。

全国水电资源的装机规模及相应水电站情况如图 1-4 所示（按技术可开发量统计）。

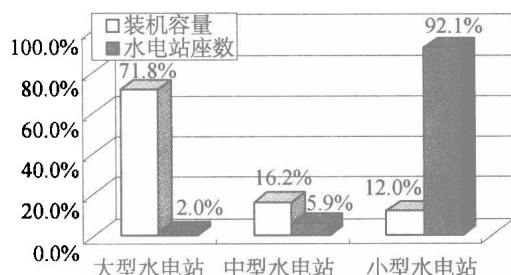


图 1-4 全国水电资源装机规模及相应水电站情况

③ 我国水电资源开发利用现状。新中国成立初期，水电建设主要集中于经济发展及用电增长较快的东部地区，大型水电站不多。20 世纪 50 年代末，开始在黄河干流兴建刘家峡等大型水电站。1949 年，水电装机容量为 16.3 万 kW；1980 年改革开放初期，电力装机 6 587 万 kW，其中水电装机 2 032 万 kW，占 30.8%；2000 年，水电装机 7 935 万 kW；到了 2008 年底，我国发电装机容量已达 79 253 万 kW，其中水电装机达 17 152 万 kW，占全国总装机容量的 21.6%。应该说，发展成绩喜人，但与国外相比，开发利用程度还比较低，如图 1-5 所示。

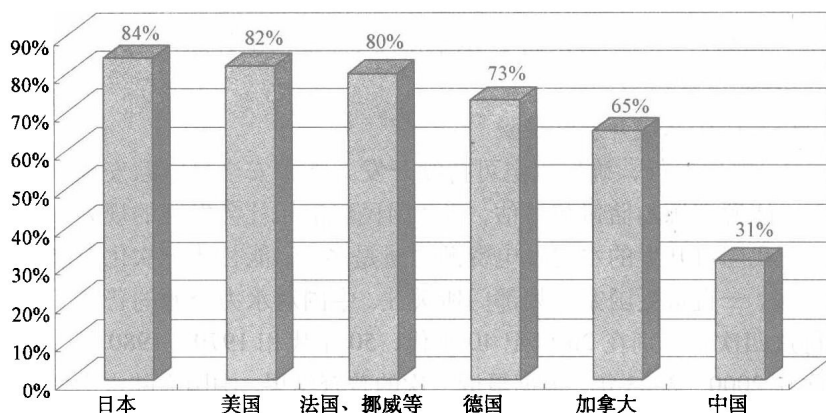


图 1-5 水电开发程度比较

(2) 四川水电资源开发情况

① 资源总量及分布特点。四川省内,理论蕴藏量 1 万 kW 及以上河流共 781 条,蕴藏量 14 351.47 万 kW、年发电量 12 571.89 亿 kW·h,技术可开发装机 12 004.0 万 kW、年发电量 6 121.59 亿 kW·h,经济可开发装机 10 327.07 万 kW、年发电量 5 232.89 亿 kW·h。理论蕴藏量占全国 20.7%,仅次于西藏,居全国第二位,技术可开发量和经济可开发量分别占全国的 22.2%和 25.7%,均居全国首位。截至 2008 年底,全省水电装机 2 223.67 万 kW,占技术可开的 18.5%。

四川省水力资源主要特点是:境内河流控制流域面积大,径流丰沛;落差大而集中;淹没损失较小;大型水电站多,规模优势突出;多数梯级拥有建设龙头水库的资源条件,梯级整体调节性能较好。

② 开发利用现状。截至 2008 年底,四川电力总装机 3 500.17 万 kW,其中水电 2 223.67 万 kW,占 63.5%,占全国水电总装机容量 17 152 万 kW 的 13.0%,居全国首位。但另一方面,四川水电装机容量占技术可开发量和经济可开发量的比例仅为 18.5%和 21.5%,远低于全国水电装机容量占技术可开发量和经济可开发量的比例 31.7%和 42.7%,开发利用程度还比较低。另外,四川水电电源中,除二滩、宝珠寺、大桥、紫坪铺具有季以上调节性能外,其余水电调节能力均较差,多为径流式电站,而且在电网中所占比重大,造成水电出力在年内分布极不均匀,导致丰枯期出力悬殊,丰水期可以满足省内用电及保证川电外送,枯水期出力不足,电网运行困难。

(3) 中国水电开发的经验

① 规划先行,确保水电可持续开发。能源安全是国家安全的基础之一,能源资源的储量和评估,涉及国民经济和社会发展的规划和总目标,而我国可开发的水力发电资源总量是多少,能替代一次化石能源多少份额,一直备受国家规划部门所关注。中国对水力资源的普查工作共进行过四次,分别在 20 世纪 40 年代、50 年代和 1979—1980 年,最近一次在 2000—2003 年。根据最近一次的普查结果,中国大陆水力发电资源理论蕴藏量 6.944 亿 kW,技术可开发量为 5.416 亿 kW,经济可开发量为 4.0180 亿 kW,均居世界第一。台湾省水力发电资源理论蕴藏量为

1 165.2 万 kW，技术可开发量为 504.8 万 kW，经济可开发量为 383.5 万 kW。改革开放以来，中国水电开发按照“科学规划、突出重点”的指导思想，在普查基础上，规划确定了金沙江中游、雅砻江干流、大渡河干流、乌江干流、长江上游干流、南盘江红水河干流、澜沧江干流、黄河下游干流、黄河中游干流、湘西、怒江干流、东北、闽浙赣等十三大水电基地，作为中国水电开发的重点区域。

② 始终高度重视移民和环保工作。改革开放以来，中国始终坚持在保护生态、妥善安置移民的前提下大力发展水电。在移民方面，确定了移民“移得出、稳得住、逐步能致富”的目标。在具体实施过程，将移民安置与社会主义新农村建设结合起来，实现移民可持续发展。在环境保护方面，坚持人与自然的和谐。以二滩水电站为例，其建设始终坚持绿色环保理念，按照世界银行的环保要求进行工程建设和管理，建成后被国家环保总局评为“环境友好工程”。

③ 水电发展符合能源可持续发展的价值取向。全球因温室气体排放导致的极端气候频发的大背景下，如何解决因燃烧石油、煤炭为主的化石燃料产生的二氧化碳等温室气体排放导致全球气候变暖的问题，是全球面临且需要高度重视的问题。水电是清洁的绿色的可再生能源，在电力能源中的地位更加突出。在化石能源探明储量有限的情况下，可持续开发水电是能源发展的正确方向。改革开放以来，尤其是进入 21 世纪以来，中国始终坚持把建设资源节约型、环境友好型社会放在经济社会发展的显要位置。中国的“十一五”规划报告提出：“在保护生态基础上有序开发水电。”2007 年 12 月，《中国的能源状况与政策》明确：“要在保护生态、妥善解决移民问题的条件下，大力发展水电。”

④ 持续推进水电体制改革，水电发展欣欣向荣。沐浴着改革开放的春风，中国水电管理体制的改革经历了 4 个阶段：

1979—1983 年为第一阶段。主要是水电设计、施工管理体制由“文革”期间下放至地方政府管理向重新上划至中央管理。

1984—1993 年为第二阶段。在鲁布革水电站建设期间，引入的世界银行贷款，并按照世界银行的要求开展国际招投标。通过鲁布革的“试验”，中国水电建筑市场逐步推行竞争机制，并逐步形成水电开发的“四

制”管理体制：即项目业主负责制、招投标制、合同管理制和建设监理制。中国水电发展逐步走向繁荣，建成了水电“老五朵金花”（漫湾水电站、水口水电站、广蓄电站、岩滩水电站、隔河岩水电站）和“新五朵金花”（二滩水电站、天荒坪水电站、五强溪水电站、李家峡水电站、棉花滩水电站）为代表的一大批水电站。

1993—2002 年为第三阶段，是水电体制改革深化期和水电发展调整期。期间，三峡水利枢纽工程、二滩水电站、小浪底水电站等工程项目正值建设高峰，极大地推动了中国水电站设计、施工、设备制造、建设管理、融资的发展。由于期间中国的固定资产投资过热，国家采取了固定资产投资调控措施，水电发展步入调整期。

2003 年到现在为第四阶段。伴随着电力体制改革的深入，以及全球对可持续发展的关注，加之中国科学发展观的提出，水电发展步入了机遇与挑战并存的新阶段。

总体看，改革开放 30 年来，中国水电发展从单一国家财政拨款到集资办电和多渠道办电，走出了一条多元化筹集开发的道路，极大地促进了中国水电发展。以二滩水电站为例，引进世界银行贷款和世界银行担保的国际银团商业融资，拓宽了水电开发筹资渠道。

⑤ 引进国外流域化开发理念，促进水电可持续发展。

20 世纪 80 年代，根据水电自身特性，结合中国水电主要集中在十三大水电基地的实际，在充分研究国外水电开发经验教训的基础上，中国提出了水电开发“流域、梯级、滚动、综合”的总体思路。据此，中国根据流域和区域情况，先后组建了三峡开发总公司、二滩水电开发有限责任公司、大渡河开发公司、澜沧江开发公司等流域性开发公司，统筹推进一条河流的开发，确保资源的合理利用。以雅砻江为例，2003 年 10 月，发改委明确由二滩公司“负责实施雅砻江水能资源的开发”，“全面负责雅砻江流域水电站的建设与管理”。目前已经建成了二滩水电站，锦屏一级、二级水电站正在建设，计划 2014 年竣工。两河口水电站、官地水电站、桐子林水电站、卡拉水电站、洋房沟水电站正在进行前期准备工程。

⑥ 引进吸收与科技攻关相结合，中国水电建设、运行、管理步入世

界前列。中国水电建设管理水平伴随改革开放 30 年步伐稳步前行，在建设管理、施工设备制造、新材料等方面硕果累累。以二滩水电站为例，设计和施工有外国咨询公司参与，由世界银行建议的特咨团参与技术决策，工程进行了国际竞争性招标，由国际著名的承包商作为责任公司组成中外联营体负责主体工程的施工管理和主要永久机电设备的制造，引进了大量先进的水电技术，包括：240 m 高的混凝土双曲拱坝设计和形体优化，使拱坝厚高比达到 0.232。大坝泄洪功率达到 39 000 MW，高拱坝泄洪量时居世界第一；引进混凝土双曲拱坝和大跨度地下洞室群施工技术和管理经验，包括管理机制、施工布置、进度控制、质量监督、造价控制、施工方法等。通过二滩水电站，中国水电建设管理、施工水平大踏步迈上了一个新台阶，一跃步入了世界水电建设管理前列。之后的三峡电站、小湾电站、龙滩电站等巨型电站就是在消化吸收二滩建设管理经验基础上建设起来的。

⑦ 引进消化吸收与自主创新相结合，极大地促进了中国水电装备设计制造水平不断迈上新台阶。中国的水电装备的发展历程，走了引进消化吸收与自主创新相结合的道路。尤其是国家重点工程对水电科技创新和重大技术装备创新起到了无可替代的推动作用。以二滩水电站为例，在机组招标时，创新性地采用“斜线切割法”，即由开始第一台机全部进口，逐步国产化，到最后一台机全部国产化，这样就实现了引进、消化、吸收、再创新，使中国机电设备的设计和制造能力从 32 万 kW 一步跃上了 55 万 kW 的新台阶，也就是有了这样关键的一步，才使得之后三峡电站 70 万 kW 单机制造成为可能。

(4) 水电事业发展取得了辉煌成就

我国水电发展起步于上个世纪初，在外国技术人员的帮助下，1912 年在云南建成了第一座水电站——石龙坝水电站，装机容量仅为 480 kW。1949 年，全国的水电装机容量仅为 16.3 万 kW。1957 年 4 月，我国在黄河上的第一座水电站建设开工。20 世纪 50 年代末 60 年代初就自行设计、自行施工、自行建设成功了我国第一座大型水电站——新安江水电站。1978 年底，全国水电装机容量达到了 1 728 万 kW。特别是实行改革开放的 30 多年来，在国家的正确领导下，在无数水电工作者的共

同努力下,我国水电事业日新月异,成就斐然。特别是三峡工程的开工建设,举世瞩目,成为改革开放 30 年来最具影响力的 30 件大事之一。通过 15 年的建设,三峡工程突破了五大工程领域的关键技术,攻克了十大工程难题,创造了百余项工程技术的世界之最,谱写了中国乃至世界水电史上的新篇章。

① 水电站建设技术步入世界前列。改革开放 30 年来,我国水电从无到有,发展迅速。尤其是进入 21 世纪,我国的水电建设技术取得了长足进展,主要体现在以下方面。

水电大坝建设步入高拱坝时代。1999 年,高 240 m 的四川二滩水电站双曲拱坝建成,使中国高拱坝建设技术水平一跃步入世界前列。2009 年,高 292 m 的云南小湾水电站建成发电;2005 年 12 月,高 305 m 的四川雅砻江上的锦屏一级水电站开工建设建设,标志着我国拱坝筑坝技术已经步入世界最前列。

水电混凝土面板堆石坝迈入 200 m 级。当前,我国已建成 200 m 及以上的混凝土面板堆石坝约 40 座,如湖北清江流域的水布垭水电站大坝高 233 m,为目前世界最高的混凝土面板堆石坝。

碾压混凝土重力坝步入 200 m 级。1986 年,福建建成了世界第一座高 75 m 的碾压混凝土重力坝,目前,我国已建成高 216.5 m 的世界最高的重力坝龙滩水电站前。

水电站基础处理技术取得长足进展。我们的工程技术人员很好地完成了大坝建设对基础处理提出的一系列挑战。当前,我们经过不断实践和科技创新,防渗墙基础处理深度已经达到 150 m,基础灌浆处理钻孔的最大深度已达到 206 m,高边坡锚索加固已达到 700 m。

高速水流消能技术取得突破。随着高坝的不断建设,电站建设日益面临高水头、大流量泄洪消能涉及的抗冲刷、防空化和空蚀等重大技术难题,经过水电建设者发扬敢于创新和勇于破难的水电精神,加之国家对重大技术研究的重视,我国在水电站枢纽建筑物布置、消能形式和结构等方面取得了长足进步。以锦屏水电站为例,枢纽泄洪采用“分散泄洪、分区消能”的布置方式,能够宣泄 $15\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水。泄洪建筑物包括坝身 4 个表孔、5 个深孔和 2 个放空底孔,坝后水垫塘以及右岸 1