

生态环境友好的水电工程建设体系的关键科技问题

高季章 陈凯麒 朱耀泉
中国水利水电科学研究院

1 前言

可持续发展能力不断增强,生态环境得到改善,资源利用效率显著提高,促进人与自然的和谐,推动整个社会走上生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路是党的十六大提出的全面建设小康社会的四大目标之一。

我国面临人口增长的巨大压力,国民经济处于高速增长的时期,基础设施建设是支撑未来社会经济可持续发展的重要方面,三峡工程、南水北调、西电东输、青藏铁路等大型工程建设是国家实现小康社会的重大基础工程。随着经济建设的增长,这些基础工程的建设、与生态环境保护的矛盾日益突出。

在未来较长一段时间内,水利水电建设仍是国民经济的重要基础产业,具有防洪、供水、灌溉、发电等功能的水利水电工程对社会经济发展起到重大支撑作用,但工程对生态环境的影响也日益受到社会各界的关注,成为工程的制约因素。

中国的能源结构长期以煤为主。特别在电力中,煤电占70%以上,由此带来二氧化碳和二氧化硫的大量排放,不仅使大气污染严重,而且受到国际公约的制约。水能资源是清洁可再生资源。我国的水能资源总量居世界首位,经过几十年的发展,水电装机已列世界首位,水力发电量居世界第四。但是,与发达国家相比,我国水电的开发程度还很低,也与我国水能资源在能源资源中的重要地位不相称,水电发展的任务仍然十分艰巨。

中国水能资源非常丰富,最新的勘察资料表明,理论蕴藏量6.89亿kW(1980年普查成果为6.8亿kW,下同),技术可开发装机容量4.93亿kW(3.78亿kW),经济可开发装机容量为3.95亿kW。为了满足新时期国民经济和社会发展的要求,应当坚持走可持续发展的道路,实现最大范围的资源优化配置,促进“西电东送”,并突出结构调整,保护环境,节约资源,促进电力工业的健康发展,这都需要进一步加快水电的发展,优先开发可再生的水能资源。

但用常规的观点和技术开发水能资源遇到了新的约束,这就是生态环境问题。遇到的生态环境问题主要有:移民的可持续发展问题;移民安置区建设的生态环境影响;与自然保护区的关系;水库泥沙淤积对河流的影响;库区淤积对土壤盐碱化的影响;滑坡与水库诱发地震;边坡开挖对植被和景观的影响;泄洪冲刷及雾化对岸坡的影响;开挖弃渣和混凝土废料对环境的影响等;大坝的淹没、阻隔、径流调节对生物资源、生物多样性、景观多样性等方面的影响,特别是对珍稀鱼类的影响。协调水利水电建设与河流(或)流域生态环境保护将成为未来水利水电建设所必须研究的课题。

现行的建设方针是在考虑安全、技术可行、经济合理的前提下考虑生态环境问题。为了实现“十六大”提出的战略目标,需要把生态环境问题放在更重要的位置,建立生态环境友好的

水电工程建设体系,从规划、勘测、设计、施工、运行管理等各个环节,优先考虑生态环境问题,实现资源开发利用与生态环境保护的双赢。

2 国际动态与趋势

发达国家的基础设施建设基本完成,欧美发达国家开发水电早,在上世纪 50—60 年代,水能资源的开发已达 70%左右。现在发达国家基本上不再对未开发的 20—30%的水能资源进行大规模的开发。但中国情况不同,目前已开发和正开发的水能资源只占经济可开发量的 30%,即使考虑开发到欧美发达国家上世纪 50—60 年代的水平,还有 1.5—2.0 亿 kW 的水能资源需要开发。

随着人们环境意识的增强,由于修建水电工程而带来的一些环境问题也逐渐显现出来,如何兼顾经济发展和环境保护已成为水电工程建设者们遇到的新课题。一般认为,水电工程建设可能带来的环境问题包括,在水库蓄水后,随着排入水库的工业废水的增多,库区水流缓慢,水体稀释扩散能力降低,水体中污染物浓度将逐渐增加,造成水库水质下降;修水坝还会对水生生物特别是洄游性鱼类产生直接的影响,并还将导致一些鱼类产卵场的消失;一些水库蓄水后,水温结构发生变化,可能对下游农作物产生冷侵害。此外,水库蓄水后因河流情势变化会对坝下与河口水体生态环境产生潜在影响,同时会引起水库周边地下水位抬高,导致土地盐碱化等。

从 20 世纪 70 年代以来,人类对大坝所导致的生态和环境问题给予了更多的关注。一些学者认为的清洁、高效、可靠和可再生的水电能源,其开发价值正因其潜在的对生态平衡长期和广泛的不利影响而被削弱。

大坝建设的淹没、阻隔、径流过程的变化导致河流生态系统破碎化,对水生生态系统形成了重要影响,主要表现为:(1)原有物种所适应的原有天然径流和水文条件的栖息地丧失;(2)河流作为生物和营养元素交流廊道的功能不复存在;(3)沿岸带连接高地和水域生态系统的“过滤”作用降低。工程规模的大小、位置不同,影响的空间也不同,一些大型的水利水电工程可能对全流域生态系统形成影响,导致下游河岸的侵蚀和海侵、河口地区营养物质的来源减少等问题。

近年来的研究强调将生态环境影响纳入工程规划、设计、施工全过程,以减缓水利工程对生态环境的影响。美国能源部开发了为保护鱼类的生态型水轮机,设置生物通道等等措施。

3 中国的研究水平与技术现状

我国对大型工程建设对生态环境影响,在推行环境影响评价制度以来,围绕三峡工程、南水北调工程等开展了大量的研究,但研究多限于宏观定性方面的论述,而在微观定量方面开展的工作相对较少;对水利水电工程对当前生态环境的影响分析较多,而对生态环境效应分析的预测工作相对较少。例如:目前我国对大型水利工程的生态环境效应评价局限于单因子评价(生态毒理、污染物因素等),较少考虑开发工程实施后流域生态系统功能的变化,流域生态系统结构、功能的退化,以及相应的恢复措施等。而战略和规划环评、生态系统服务功能的研究均处于起步阶段,对于受损生态系统修复的研究也处于定性研究阶段。面临我国脆弱的生态环境,经济的高速增长,协调经济发展与生态环境保护的矛盾是社会可持续发展的重要方面。从政策阶段、规划阶段、工程阶段的全过程重视生态环境保护是目前的共识;此外,大坝建设对鱼类

生存繁殖的影响方面还缺少系统的研究与考虑, 作为工程措施考虑就更加不足, 多数河流建坝未考虑设置鱼类过坝设施。目前尤为欠缺的是, 对生态环境的保护、修复重视不够, 更多的重视发电效益、防洪灌溉效益等。如何从可持续发展的角度重新审视我们的水利水电开发目标, 如何真正的考虑给予环境生态保护以实际意义上的高度重视和采取积极有效的工程措施, 对已建工程中确实影响到生态环境的问题如何开展拯救性工程研究, 都是应该给予足够的重视并开展实质性的研究工作。

4 技术发展建议

为了建立生态环境友好的大型水电工程建设体系, 需要重点发展以下科学技术研究:

4.1 已建大坝环境影响回顾评价研究

4.1.1 意义

开展大坝环境影响回顾评价研究, 总结已建工程建设及其运行对生态环境影响的程度范围, 及工程建设中采取的生态效应舒缓措施的有效性, 对于系统认识大坝建设淹没、阻隔、径流变化对生境、生物多样性、水质、社会等多方面的影响, 对于认识大坝建设对生态环境的“真实”影响, 提出针对性的环境影响减缓措施非常重要, 对于未来设计建设生态友好型的大坝, 提供系统的基础数据。

通过研究: (1) 客观、公正、科学地评价大坝经多年运行后, 在生态环境方面带来的利与弊; (2) 为改善生态环境及大坝的管理、运行等, 减少不利影响, 提出建议和措施; (3) 对诸如大坝之类的工程建设, 其经济、社会、生态方面的要求会越来越高, 从中总结以往的经验教训, 树立面向未来的思想认识和工作思路。

4.1.2 主要研究内容

从规划、项目建设等阶段分析大坝建设对生态环境的影响。从三个层次开展研究工作: (1) 开展中国大坝建设与生态环境影响系统调查; (2) 通过案例分析大坝建设对生态环境的敏感问题的分析; (3) 提出生态友好的大坝建设与运行的生态准则。具体研究内容如下:

建立中国大坝建设与生态环境影响案例库

在系统调查的情况下, 选择代表性的大坝, 综合考虑大坝规模、开发目的、运行方式、河流生态环境特征等因素, 分析不同参数组合对河流的生态功能与结构的影响。建立大坝环境影响案例库。

大坝建设对生态环境影响回顾评价研究

选择典型案例, 系统分析大坝建设对生态环境的影响, 针对目前关心的热点科学问题, 从规划、工程建设层次重点分析回顾流域水电站梯级开发规划、水库(电站)建设对生态环境的正负面影响, 系统研究典型流域大坝建设开发对流域生态环境的累积影响; 以及对已采取的生态减免措施的有效性进行评估。对流域开发规划的生态环境合理性进行回顾及分析研究。

大坝建设水文情势变化对生境的影响回顾评价研究

通过对大坝建设前后长系列水文资料的对比, 概括重要的生态水文学指标的变化, 结合指示性生物的种群变化, 分析生境变化对于生物生长史、种群与数量的变化的影响。或者通过系列遥感数据对比, 分析生境的变化。

生态友好的大坝建设的生态准则研究

在回顾研究基础上,结合国内外的研究成果,确立大坝建设与水库运行的基本生态准则,包括最小下泄生态流量确定的理论与方法、建立河流适应性生态恢复的生态水文调度,以及基于生态水文与工程调度相结合的新型水库调度准则等。

4.2 水利水电开发规划环境影响评价相关技术研究

4.2.1 意义

开展水利水电规划环境影响评价,既有政府管理部门的需求,也有流域开发利用的客观需求。而水利水电规划环境影响评价在我国基本上属于空白,只在一些流域或区域进行了概念性的工作,尚无完整的评价理论、技术、方法与标准体系。同时,近年来由于区域生态环境问题日益突出,区域环评、规划环评、战略环评一直是环境科学研究领域的热点。

遵守流域环境可持续发展原则,根据流域环境的自然条件和相互作用性、多目标性、动态性和不确定性特征,进行水资源开发的环境成本分析和评价。用动态的发展模式分析经济和环境因素,以环境系统规划与综合管理为主要指标,逐步建立起一套定性、定量因素相结合的流域规划评价理论方法,改进和创造适应环境可持续发展的动态发展模式 and 规划环境影响评价指标体系。

积极开展这方面的前期工作,将为水行政主管部门执行环境影响评价法提供可操作性的管理依据,同时将对新时期水利水电规划的制定,流域生态环境的保护有着非常重要的意义。

4.2.2 主要研究内容

(1) 水利水电规划环境影响评价的范畴与生态环境重点问题分析研究

为水利水电规划环评确定评价范围与评价重点,对水利水电规划分类及其对生态环境的直接与间接影响分析,调查分析不同规划可能引起的环境问题,对在全流域水质水量统一管理条件下,水利水电专项规划重点生态环境问题分析研究。

(2) 流域(或区域)生态环境承载力评价理论与方法研究

对生态环境承载力进行评价研究是科学制定水利水电规划的前提,对其评价指标体系的建立开展研究,进而对生态环境承载力评价的理论与方法体系研究。

(3) 流域梯级开发的累积效应与累积影响评价技术与方法

系统研究流域大坝建设开发对流域生态环境、自然环境及社会经济总体的累积影响;探索流域开发对环境影响的关键因素。从单一规划的角度看,可能对生态环境产生较小的影响,但不同的开发活动的迭加,往往会产生加和效应或协同作用。累积影响评价是流域开发规划阶段必须考虑的问题,对流域开发利用累积效应评价技术方法体系开展研究,提出累积影响评价技术方法。

(4) 水利水电规划环境影响评价标准体系的建立

建立能够体现水利水电规划特点的规划环境影响评价技术标准体系,包括水利水电规划环境影响评价技术标准信息的采集,水利水电规划环境影响评价技术标准的国内外对比研究,水利水电规划环境影响评价技术标准体系的建立与完善。

(5) 水利水电规划环境影响评价技术集成研究

开展水利水电规划环境影响评价关键技术综合集成研究,设计具有水利水电特色的规划环境影响评价技术方法与技术标准体系相结合的模式,对流域空间信息数据管理技术与规划环境影响评价方法库进行集成,对其关键技术开展研究。

4.3 水利水电工程的生态环境效应及对策

4.3.1 意义

在未来较长一段时间内水利水电建设仍是国民经济的重要基础产业，防洪、供水、灌溉、发电等水利水电工程对社会经济发展起到重大的支撑作用，但工程对生态环境的影响也日益受到社会各界的关注。成为工程的限制性因素，如大坝的淹没、阻隔、径流调节对生物资源、生物多样性、景观多样性等方面的影响，跨流域调水的生物安全、对下游生态的影响等成为水利水电工程所必须考虑的因素。协调水利水电建设与河流（或）流域生态环境保护将成为未来水利水电建设所必须研究的课题。工程技术问题基本成型（包括引进国外技术），生态环境问题是未来工程建设开发主要的限制性因素。

4.3.2 研究内容

（1）水文要素变化对生物资源的影响机制研究

在宏观上对比长时间和大空间跨度的水文要素变化和生物资源的消长规律，研究水利水电工程建设所造成的水文情势变化的程度和方式及其对生物资源的影响；微观上则根据不同生物对水力学条件的趋避特点，研究水利水电工程建设所形成的水力学环境（流速、流态、坝下径流调节等）对重要生物资源的影响，探讨水利水电工程作用与重要生物资源的生态水文学机制。

（2）对重要生物资源不利影响的主要补偿途径研究

针对主要受影响的种类和对其产生不利影响的关键因素，重点开展：

- 重点生物资源生境再造技术(人工栖息地)
- 基于生态水力学的径流调节补偿技术（如人造洪峰、下泄水温调节的工程与径流调节技术）
- 岸坡生态工法（或生态水工学）技术开发

（3）生态友好的水利水电工程运行的生态准则研究（包括生态水文学、生态水力学等）

深入研究并确立大坝建设与水库（电站）运行的基本生态准则，包括最小下泄生态流量确定的理论与方法、建立河流适应性生态恢复的生态水文调度，以及基于生态水文与工程调度相结合的新型水库调度准则等。

（4）生态型投资移民方式的探索与研究

利用水利水电工程建设时机，深入探索可持续发展的新型移民政策，以改善生态环境，减少单位装机或库容的移民人数和淹没耕地面积为指标和原则，对生态型投资移民方式开展研究。

4.4 基于3S技术和物探技术的工程勘测新技术研究

4.4.1 意义

在水利水电工程勘测工作中，目前普遍大量采用洞探、坑、槽探等地质勘探手段，由于爆破开挖、乱置弃渣、不回填封堵，对工程区的生态环境会造成一定的影响。鉴于此，应大力发展对生态环境影响较小的工程勘测技术，如“3S”技术（RS、GPS、GIS），以及以综合测井技术、微地震技术、浅层反射、浅层折射技术、层析成像技术（CT法）、反射成像技术、电磁波地质雷达技术、甚低频电磁波测试技术等为代表的物探勘测新技术。

4.4.2 重点研究内容

- （1）“3S”系统在水利水电工程勘测应用中的一体化技术研究；
- （2）工程勘测区地质信息GIS可视化三维空间数据模型的建立途径与方法研究；
- （3）二维地质信息与三维地质信息的相互转化技术研究；

- (4) 工程勘测区特定地质体三维地质信息模型的工程解析技术研究;
- (5) “3S” 勘测成果的综合利用技术研究 (如岩体质量评价、边坡稳定性分析、开发工程勘测自动成图系统等);
- (6) 各类物探技术的适用范围及可靠性、准确性研究。

4.5 精细设计、开挖及加固新技术研究

4.5.1 意义

20 世纪 70 年代以来,随着一大批大中型水电站的兴建,大量的洞挖、坑挖、槽挖、边坡开挖极大地改变了原有的自然地形、地貌,使生态环境受到破坏和影响,与建设生态环境友好大型电站工程的要求不相适应。为尽量减少工程建设对自然环境造成的影响,开展工程精细设计、施工及加固新技术研究是尤为必要的。

4.5.2 重点研究内容

(1) 大型地下厂房关键技术研究:施工期洞室开挖地质超前预报技术研究;复杂地质条件下大型地下洞室施工开挖新技术研究;复杂地质条件下大型地下洞室衬砌支护成洞技术研究;大型地下洞室衬砌支护施工质量无损检测新技术研究;大型地下洞室围岩稳定监测反馈信息决策新技术研究;复杂地质条件下大型地下洞室围岩稳定性分析方法和综合评价方法研究。

(2) 精细边坡开挖技术:高边坡综合治理技术研究;工程高边坡生态修复技术研究;高边坡开挖料的全利用技术研究;边坡勘测、监测新技术研究;工程边坡稳定综合分析方法研究。

(3) 复杂环境条件下爆破开挖技术:复杂环境条件下的轮廓开挖控制爆破技术研究;地下工程开挖爆破设计的仿真系统的开发;精细开挖爆破成洞和锁口技术研究;结合开挖爆破研究开挖料符合坝体填料要求的全利用控制爆破技术;爆破安全影响的评价和控制标准研究;爆破对高边坡稳定影响的控制爆破技术及动态稳定分析。

4.6 水库诱发地质灾害防治的关键技术研究

4.6.1 意义

水库蓄水对岸坡稳态构成一定破坏性,主要表现在水库水位的涨落和波浪冲刷对岸坡的影响。同时使库岸地下水水位抬高,使岸坡岩体及坡积层内的应力及物理力学性质发生变化,岩土软化,强度降低,从而诱发一系列岸坡地质灾害,如岸坡坡积层塌滑、古滑坡复活、岸坡崩塌等。此类地质灾害在已建成的水利水电工程中都有不同程度的发生,对水库库区的生态环境造成一定的影响。我国针对崩塌滑坡的预报研究始于上世纪 60 年代,至今已提出了包括确定性预报模型、非确定性预报模型和类比分析方法等三类方法在内的多种滑坡预报方法,但时至今日对于运用什么样的理论,建立何种理论模型进行预报并没有完全解决,甚至对是否存在能有效解决崩塌、滑坡预报理论模型的问题仍处在探索研究中。

4.6.2 重点研究内容

(1) 库区崩塌、滑坡灾害预测预报基础理论研究。

(2) 基于 GPS 的滑坡安全预警立体监测自动化系统 (包括常规监测、激光定位三维监测,摄影图像分析监测,地震层析成像三维监测等方法)。重点开发:①实用的 GPS 定位遥感测量技术;②研制开发监测数据实时接收、处理及分析预报软件和监测资料数据库。

(3) 崩塌、滑坡稳定分析方法研究。

(4) 库区崩塌、滑坡灾害的综合治理措施优化研究。

4.7 遗弃开挖料的利用及填筑标准、施工场地复垦技术

4.7.1 意义

在传统的水电开发建设中,大量的土石方工程不可避免地要开山炸石,取土填筑,由此对周边的生态环境造成了一定程度的破坏,而目前,这样的粗放式做法势必受到环境保护方面的约束。如何改变传统的设计施工思路,建设生态友好的水电工程是摆在新一代水电工程师面前亟待解决的问题。

就以往的研究成果而言,我国的水电建设中对于施工土石料的合理利用研究问题也进行过一系列的研究工作,但其出发点主要是基于经济方面的考量或因为料源的缺乏,并未有意识地考虑环境方面的因素,因此其研究成果尚不全面。不过,相关的研究成果却也为进一步的深入研究奠定了良好的基础。

水电施工场地面积巨大,如何在完工时进行复垦利用值得重视。

4.7.2 重点研究内容

- (1) 不良土石料的工程力学特性和利用不良土石料填筑坝体的可行性及筑坝技术研究;
- (2) 不同坝料分区对坝体应力变形特性的影响、利用建筑物开挖料或其它不良土石料填筑坝体时坝体结构的合理体型研究;
- (3) 利用不良土料代替粘土材料填筑土石坝心墙的设计方案和施工控制技术标准;
- (4) 料场的生态修复和施工场地复垦利用技术研究。

4.8 减轻泄洪雨雾冲刷的消能新技术研究

4.8.1 意义

高坝工程的泄洪普遍采用表孔、中(深)孔、溢洪道和泄洪洞泄洪,为提高消能效率,还采用表孔、中(深)孔水舌碰撞消能,但泄洪雨雾的冲刷问题比较严重,为保护岸坡和达到某种特定的环境要求,需要研究消能效率高且雾化影响小、经济适用的新型消能技术。

4.8.2 主要研究内容

- (1) 泄洪雨雾的机理研究;
- (2) 泄洪洞内消能技术;
- (3) 施工导流洞与永久泄洪洞结合的新型消能技术。

4.9 高坝鱼道或鱼梯技术研究

4.9.1 意义

修建大坝对环境生态影响的方面之一是对鱼类的生长与繁殖,这类问题我们在过去的大坝建设中考虑的不多。葛洲坝水利枢纽修建时在考虑对中华鲟的保护方式上做过大量的研究,目前采取的方式是人工繁殖,取得了一定效果。从整体上讲,我国在坝工建设中对鱼类的保护是不够重视的,开展相应研究的工作更是初浅,应该加强对这方面的研究。

4.9.2 主要研究内容

(1) 针对典型河流(梯级开发建坝及基本未开发的河流),开展鱼类生存现状调查,包括未开发前鱼类分布情况的调查分析,重点调查修建水库对上下游水体环境的改变,影响鱼类生存与繁殖的因素及影响程度,调查不同地域、不同鱼种的生存与繁殖所需的水力条件。

(2) 对国内外鱼类过坝建筑物(特别是针对高坝建设)设计、运用、管理、技术规范等进

行调查研究，重点为国外河流梯级开发工程。针对国外研究应用的经验与教训，提出我国在大坝建设中鱼类过坝保护方面存在的问题及今后的研究发展方向。

(3) 开展适应鱼类过坝（过水轮机）的建筑物水力条件的研究，包括物理模型试验与数值仿真研究，从简化结构体型、方便施工与管理的角度研究。

(4) 开展解决库区鱼类生存条件及泄水建筑物下游河道水流溶解氧对鱼类的影响及有效的工程措施。

(5) 选择典型的已建工程（目前宜以中小型工程为主），开展试点工程的应用研究，并进行跟踪观测，包括鱼苗的投放、鱼类的生长、迁徙、繁殖，考虑的因素包括水温、流速、含沙量、物理化学参数等。