

HYDROPOWER SUSTAINABILITY
ASSESSMENT BASED
ON ECOLOGICAL COST

水能资源开发 适宜性评价

陈贺 冯程 杨林 邢宝秀 等编著



化学工业出版社

**HYDROPOWER SUSTAINABILITY
ASSESSMENT BASED
ON ECOLOGICAL COST**

水能资源开发 适宜性评价

陈贺 冯程 杨林 邢宝秀 等编著



化学工业出版社

·北京·

《水能资源开发适宜性评价》基于水能资源开发过程中生态环境保护和管理的需求,通过基础水文、环境、生态调查,辨识水能资源开发对水生态系统的影响,量化生态成本,建立基于生态成本的水能资源开发适宜性评价方法。

《水能资源开发适宜性评价》适合水利研究领域的科研和管理人员阅读,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水能资源开发适宜性评价/陈贺等编著. —北京:

化学工业出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-122-26130-4

I. ①水… II. ①陈… III. ①水电资源-资源开发-适宜性评价 IV. ①TV7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 013148 号

责任编辑: 宋湘玲

文字编辑: 荣世芳

责任校对: 王素芹

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 207 千字 2015 年 12 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.80 元

版权所有 违者必究

《水能资源开发适宜性评价》编写人员

陈 贺 冯 程 杨 林
邢宝秀 魏国良 李安定

前言

水能资源作为可再生新能源，对协调我国能源结构有着重要的作用。世界上的许多国家非常重视水能资源的开发，我国水能资源丰富，蕴藏着巨大的潜力。我国对水能资源的开发日益重视，各省特别是西南地区对水电开发的规划日益增多，人们希望通过水电开发带来巨大的经济效益。但是作为自然的一分子，人类在追求自身利益的同时，也需要平衡自然的利益，因此研究水电开发对自然环境的适宜性变得尤为重要。《水能资源开发适宜性评价》以澜沧江水电站为例，研究建坝前后水电站对自然环境的影响，从而确定水电站建设的适宜性。

《水能资源开发适宜性评价》主要包括以下内容：绪论；水能资源开发基础数据调查方法；水生态系统对水能资源开发的响应；水能资源开发生态成本表征与量化；水能资源开发适宜性评价方法；单级和梯级水能资源开发适宜性评价；流域尺度水能资源开发适宜性评价；面向水电开发适宜性调度的浮游植物碳流评估与调控。本书由陈贺负责大纲编写和统稿工作。其中，第一章、第六章和第七章由陈贺、冯程负责编写，第二章由杨林、冯程负责编写，第三章由冯程、杨林负责编写，第四章由李安定、魏国良负责编写，第五章由冯程、邢宝秀负责编写，第八章由冯程、陈贺负责编写。

《水能资源开发适宜性评价》适合水利领域相关科研人员阅读，也可为相关管理部门提供管理参考。

编著者

2015年11月

目 录

第一章 绪论

第一节 水能资源开发	1
第二节 研究进展	2
参考文献	13

第二章 水能资源开发基础数据调查方法

第一节 水体理化性质测定	19
第二节 浮游动植物采集与鉴别	22
第三节 沉积物细菌鉴别	23
参考文献	30

第三章 水生态系统对水能资源开发的响应

第一节 浮游植物对水能资源开发的响应	32
第二节 浮游动物对水能资源开发的响应	37
第三节 底栖生物对水能资源开发的响应	43
参考文献	50

第四章 水能资源开发生态成本表征与量化

第一节 生态成本表征	51
第二节 生态成本量化	55
参考文献	101

第五章 水能资源开发适宜性评价方法

第一节 水能资源开发适宜性评价指标体系建立原则	104
第二节 水能资源开发适宜性评价指标体系构建	105
参考文献	120

第六章 单级和梯级水能资源开发适宜性评价

第一节 澜沧江概况	122
第二节 澜沧江水能资源开发适宜性评价指标体系	125
第三节 澜沧江水能资源开发适宜性评价标准	126
第四节 漫湾水能资源开发适宜性评价	127
第五节 大朝山水能资源开发适宜性评价	136
第六节 梯级水能资源开发适宜性评价	140
参考文献	142

第七章 流域尺度水能资源开发适宜性评价

第一节 怒江概况	144
第二节 基于法律法规约束的水能资源开发适宜性一次评价	145
第三节 基于生态约束的水能资源开发适宜性二次评价	149
第四节 基于系统权衡的水能资源开发适宜性三次评价	151

第八章 面向水电开发适宜性调度的浮游植物碳流评估与调控

第一节 浮游植物碳流量分析方法	163
第二节 漫湾浮游植物含碳量	168
第三节 漫湾浮游植物碳流分析	174
第四节 浮游植物碳流调控措施	177
参考文献	178

第一章 绪 论

第一节 水能资源开发

能源作为国民经济发展的物质基础，提供着巨大的发展动力，对社会现代化进程和人民群众生活水平的提高起着积极的促进作用。我国的常规能源有煤炭、石油、天然气、水能等，其中，水能资源作为可再生的清洁资源在我国的能源供应结构中占据着重要位置。水能资源的开发不仅能对经济发展提供电力保障，还能在防洪、灌溉、蓄水等方面获得社会效益，并且能够减少对煤炭、石油等非可再生资源的消耗，对国家的可持续发展做出了重大的贡献。

我国的水能资源十分丰富，总量居于世界首位，远高于俄罗斯和美国。根据 2005 年《中华人民共和国水力资源复查成果》，全国水力资源理论蕴藏量为 $6.94 \times 10^8 \text{ kW}$ ，年理论发电量为 $6.08 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，平均功率为 $6.94 \times 10^8 \text{ kW}$ ；技术可开发装机容量 $5.42 \times 10^8 \text{ kW}$ ，年发电量 $2.47 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ；经济可开发装机容量 $4.02 \times 10^8 \text{ kW}$ ，年发电量 $1.75 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。发达国家的水力资源开发程度比较高，平均为 60% 以上，其中美国为 82%，加拿大为 65%，德国为 73%。世界上发达国家的水力资源开发程度基本上都在 80% 左右，我国的水力资源开发程度到目前为止，经济开发程度已经超过了 50%。我国水力资源开发程度相较之下并不高。据统计，全世界有 24 个国家通过水力资源发电为其提供 90% 以上的能源，比如巴西、挪威等国家，有 55 个国家通过水力资源发电为其供应 50% 以上的能源，如加拿大、瑞士等国，截至 2013 年，我国水电供应 22.9% 的能源。我国政府于 2009 年公布了节能减排目标，到 2020 年单位 GDP 的 CO_2 排放量与 2005 年的相比将下降 40%~45%。水力资源的开发通过河流本身的落差将水的势能转化成电能，在这个过程中并不产生温室气体或污染物。以

水力资源开发作为优先发展的战略，将会为实现能源结构平衡和节能减排目标做出巨大贡献。

从空间分布来看，我国的水力资源分布非常不均衡，总体呈现出西部多、东部少的态势。我国的水能资源相对集中于西南地区，而当地的水能资源开发程度仅为 17%，相较之下经济相对发达、能源需求数量更大的东部地区在水力资源量极少的情况下开发程度竟然达到了 70% 以上。西南地区水能资源的开发对于推进西部大开发，实现“西电东输”的战略政策，均衡区域经济社会发展有着积极的推动作用。云南省的水力资源仅次于西藏、四川两个水力资源大省，位于全国第三位。云南省的水力资源主要分布在西部地区和北部地区，接着是东部地区和南部地区，中部地区最少。云南省 82.5% 的水力资源分布在金沙江、澜沧江、怒江三大流域。

水能资源的开发像一把双刃剑，一方面对国家经济发展提供持续的能源保障，另一方面又对生态环境造成不同程度的影响。国内外各界人士对此进行着激烈的争论，但是从我国目前的国情以及未来的发展目标来看，水能资源的开发仍然是非常有必要的，我国经济持续、快速的生长离不开水能资源的开发。因此我们关注的焦点在于如何正确地、综合地看待水能资源开发过程中产生的各种利弊效应并对其适宜性进行全面评估，开发适用于管理者实际工作的方法，对水电站工作进行研究，从而实现趋利避弊的开发目标。

第二节 研究进展

一、水能资源开发的生态环境影响

1. 对河流水文情势的影响

大坝的建设首要改变的是河流水文情况，表现为改变了最高和最低流速的持续时间、频率和大小，从本质上来讲，水坝的功能在于平衡最低流量和最高流量之间的差别，这种功能对于雨旱季明显区域的水库来讲表现得最明显。这种变化，使得库区水体滞留时间被大大延长，库区表层水温升高、水体搅动减少、温度跃层出现，透明度增加，尤其是颗粒的减少和搅动的减少，使得光照条件进一步改善。从纵向上来讲，大坝对河流水文条件的改变程度也有差异，以澜沧江为例，从入河口到坝前中间途经过渡区，大坝对水文条件的改变程度依次为 25.2%、25.3% 和 29.1%，整体来看，大坝对河流水文条件的改变很大，同时越靠近大坝，水流流速越缓，相较于建坝前，河流水文条件的改变率最大。

2. 对营养盐循环的影响

关于梯级大坝库区水文条件对营养盐结构的影响研究进行得不多,但梯级大坝库区是单一库区的叠加,因此单一库区水文条件对营养盐结构的影响在梯级大坝群中也是存在的。单一库区水文条件对营养盐结构的影响研究进展可以作为参考。

大坝的建成使得河道天然水文情势被改变的同时,也打破了库区水体营养盐的原本结构。相对于天然河道,库区流速的减小,悬浮物对营养盐吸附作用的增加,变温层的改变,平流运动的改变,出流口的位置以及水力停留时间等因素改变着水体中生命有机体和营养盐在不同空间尺度的分布,水体环境发生改变并影响到水体和沉积物中水生生物及沉积物细菌的种类、组成及分布。

大坝水文情势对营养盐的影响主要表现为对营养盐尤其是磷和硅的“截留”作用以及对碳和氮循环的影响,以及由此引发对下游河流、河口和近海水质的影响。氮和磷是组成浮游生物与生命体的重要元素,在不同的水质状态下,氮和磷对浮游生物的影响有显著区别。氮元素是造成湖泊和水库富营养化的限制因子,但在平时,磷元素却是影响浮游生物种类和数量的限制性因子。河流有机颗粒是有机物尤其是磷和氮元素存的重要形式,水坝的建设,使得河流水流变化,沉积速率变大,更多有机颗粒以沉积物形式沉积在库底,使得水库成为重要的氮汇和磷汇。研究显示,法国塞纳河上游的三个大型水坝(Marne、Seine、Aube)的建成导致60%的磷、50%的硅以及40%的氮被截留在库区。浮游生物既是有机碳的生产者也是其消耗者,大坝建成后,水体流动性减低,透明度增加,更适应浮游生物的生长,有机碳量的多少与浮游生物的多少呈现相互牵制的作用。大坝对下游以致河口和近海区域的影响,更多地表现在大坝建成后改变了下游的水文情势,使得入海口处流量变少,造成海水入侵,河口平原盐碱地增加,而大坝对营养盐尤其是氮和磷具有截留作用,淡水流量和颗粒物的减少,使下游河口平原的生态受到了严重影响,近百年来,科罗拉多河三角洲生态系统正呈现逐渐衰退的状态。

沉积物对库区营养盐的影响,一方面表现在沉积物对水质中有机质、重金属、大分子物质等成分的吸附作用,这些物质也是构成库区沉积物的主要成分;另一方面,作为水库生态系统中的一个重要活跃单元,沉积物中氮、磷的内源性释放直接影响水体富营养化。沉积物中有机物的分解是库区中氮的主要来源,相较于氮,磷更多以无机物形式存在,影响磷释放的因子主要是库区环境的理化性质,如温度、氧化环境、矿化作用,当然也包括一定程度的生物分解。无论是氮还是磷的释放,微生物在沉积物中有机物的分解过程中都扮演着至关重要的作

用。因此,研究沉积物中微生物的群落活性与多样性对进一步讨论沉积物中营养盐释放对水质的影响有重要的意义。

3. 对浮游动植物、底栖微生物的影响

河流节流蓄水后,生物群落随生境变化经过自然选择、演替而形成新的平衡。水库形成后,因流速降低、透明度增加等因素,水生态系统体系由以底栖附着生物和喜激流为主的“河流型”异样体系向以浮游生物为主的“湖沼型”自养体系演化。河流生态系统中的碳、氮、磷等生源要素是生物生存的要素,而生物作用过程又是控制或影响河流/水库系统内生源物质循环更新的重要环节。浮游动物是河流生态系统的初级生产力,浮游动物则是初级消费者,而底栖微生物多为分解者,三种生物构成了河流生态系统食物网结构中的底层群体,也是河流生态系统中物质流和能量流的重要基础。

流速是河道型水库生态系统的一个重要生态因子,其对浮游植物的影响已经得到很多研究者的证实。国外关于水流对浮游生物的影响的研究始于 20 世纪 60 年代,当时的研究更多运用实验手段,验证了浮游生物尤其是浮游植物其种类和种群更替过程中会受到流速的影响。福迪依据藻类对流水的适应程度将藻类分为急流藻类、中流水藻类以及喜流藻类。近些年来,由于人类活动的干扰,尤其大坝的建设使得水流滞缓,水体中的湍流等运动降低,水体富营养化严重,影响浮游植物藻类生长的水动力学因子又细分为水库排放量、水体流速、入库流量以及湍流等。在对阿迪杰河连续一年的水质水量和浮游植物的监测过程中发现,流速低而又在升温期的春季是藻类生物量最高的季节,而随着流量的增加,藻类生物量有明显减少趋势。另外,库区中存在的另外一种广泛的水体运动形式——湍流对浮游植物的影响因种类而有明显差异,Li 等的研究显示水体的流动对浮游植物生物量的影响高于其对种类的影响,而且不同种类的浮游植物对流速的要求不同,不过剪切流速增加对藻类细胞的破坏度。

水动力学因子对沉积物细菌的影响已经有很多研究,水流会影响沉积物细菌种类和细菌活性。适当的湍流能够促进微生物的生长,Hondzo 的研究显示大肠杆菌的生长在克尔莫格罗夫速度影响下是静止水流下的 5 倍。在对溪流底层沉积物的微生物膜空间异质性研究的过程中发现,水动力学的异质性对沉积物细菌的组成起到了近 47% 的作用,沿水流方向,细菌生产力和原生动物种类有明显的渐变。

水体中存在着大量水生生物群落,各类水生生物之间以及水生生物与其赖以生存的水环境之间都存在着相互依赖、相互依存又相互制约的密切关系。水体环境改变时,各种不同水生生物由于环境的要求和适应要求不同,对环境因子改变

有不同反应。浮游植物作为水体环境中重要的初级生产力, 其对水环境系统的反映已经被很多人研究, 浮游植物对水质和其他生物因子之间有指示性作用。Mineyeva 比较贝加尔湖、兴凯湖以及贝加尔湖干流水库和叶尼塞河水库中浮游植物群落结构发现, 浮游植物对营养盐的浓度和成分很敏感, 其光合作用活性主要取决于营养盐浓度和光照, 然而浮游植物初级生产率和分解率则受水体水文条件和地形地貌的影响较多。一般情况下, 肘状针杆藻 (*Synedra ulna*) 和金藻 (*Chrysophyceae*) 等常分布于贫营养型水体; 中营养型水体则以硅藻 (*Diatom*)、脆弱刚毛藻 (*Cladophara fracta*)、美洲眼子菜 (*Potamogeton americanus*) 等为主; 绿色裸藻 (*Euglena viridis*)、静裸藻 (*Euglena caudate*) 及小颤藻 (*Oscillatoria tenuis*) 等主要生活在中营养型水体中。

浮游动物包括原生动物、桡足类、轮虫和枝角类, 由于浮游动物较易受到水温、pH、盐度以及有毒污染物的影响, 因此利用浮游动物可以对各环境因子做出相应指示作用。利用浮游动物评价水质的研究起源已久, 时至今日, 关于浮游植物对各环境因子和水生态状态的研究已经相对比较成熟, 总结前人研究成果, 可以发现, 钟虫 (*Vorticella*)、无饼钟形虫、沙壳虫 (*Dfflugia* sp.) 等主要生活在清水型或寡污性水体中, 而喇叭虫、草履虫、底栖泥蚤等生活在污水型或富营养性水体中。

沉积物是化学物质的聚集, 也是微生物生存的场所, 沉积物上活跃着物理的、化学的、生物的各种反应, 这些反应的强度与规模因周围环境、沉积方式和物质汇入方式而有差异。沉积物中的微生物活动对整个水生系统状况有重要影响。一方面, 周围环境中的化学物质通过自然沉降等途径传递到沉积物中, 并作为营养物质为微生物提供生命活动所需原料。而另一方面, 微生物通过代谢活动, 影响沉积物中氮、磷等营养物质的循环, 这些物质通过微生物自身或其他方式进入水体, 影响水体营养化水平。无论是海洋还是淡水流域的沉积物, 细菌生产力都对基质的成分和温度有重要影响。水环境中, 微生物降解和可溶性无机物的消化是决定无机物和有机物之间相互转化速率的关键步骤, 沉积物中微生物群落对营养盐和水文动力学因子也表现出不同的反馈机制。

微生物具有新陈代谢快、种类多、数量巨大等特点, 利用微生物指示水环境状况更具时效性, 其中大肠杆菌是最为常用的水体有机污染指标。通常的, 异养菌指标可以直观地指示水域有机物的污染程度。沉积物是水环境中微生物生长的温床, 病原性细菌埃希杆菌属生存于沉积物表层, 受水体环境和沉积环境的双重影响, 也是人们常用来监测水质健康状况的重要菌种。除了一些具体种类, 细菌

群落的多样性和结构也是水质环境一定程度上的表现。Wobus 比较了四个不同营养状态水库 (Neunzehnhain, Muldenberg, Saidenbach, Quitzdorf) 沉积物中细菌的多样性, 细菌多样性在不同营养状态的水库中都有明显差异, Meyer 的研究显示沉积物通过改变细菌活性对外源性有机物做出迅速反应, 以更快地适应新环境。

水生生物之间彼此依赖、相互依存, 浮游植物、浮游动物以及沉积物细菌群落之间有着千丝万缕相互牵连、相互制约的关系。浮游植物是河流生态系统的初级生产者, 处于食物网的底层, 数量和种类都最为庞大, 是水体中溶解氧的主要供应者, 同时也是浮游动物和部分鱼类的主要食物来源。浮游动物多半以浮游植物为食, 所以关于浮游植物与浮游动物构成的短食物链的研究很多。孙军等考察了东海春季水华浮游生物生长与微型浮游动物摄食, 并发现微型浮游动物的摄食在水华爆发前对浮游植物群落的生长有控制作用。

底泥沉积物是构成河流生态系统的重要部分, 也是河流中氮元素、磷元素释放和汇聚的源泉。沉积物和水体之间的交互一直通过物理生物化学的方式进行。同时, 沉积物是底栖微生物的重要栖息地, 水体会影响沉积物环境进而影响表层底泥的生物化学作用, 并进一步影响到底栖微生物的结构和组成。关于底栖微生物与浮游生物之间的研究, 主要集中在可往返于底泥和水体表面之间的浮游植物群体的研究, 部分浮游植物如蓝藻类早期生活在沉积物表层, 后随水流运动浮上表层。水生生物之间的相互关系, 一方面体现在水生生物生长周期内数量的相互影响, Head 和 Rengefsson 等的研究显示底层项圈藻的细胞数量会直接影响浮游项圈藻的生长。另一方面表现在不同水生生物间的相互影响, 如巨冬季头轮虫会随着底层营养物的增加而增加, 伴随此底层叶绿素 a 的数量是夏天数量的 3.4 倍。

4. 梯级水电开发研究进展

人类水电开发历史已经有 100 多年, 19 世纪 70 年代末, 一些国家如法、德、英、美等开始建设小型水电站。由于水电梯级开发效益较大, 世界各国普遍重视流域的梯级开发, 国外关于流域开发比较成功的案例有位于美国和加拿大境内的哥伦比亚流域、美国东南部的田纳西河流域、科罗拉多河流域、卡罗尼河流域、伏尔加河流域等。因流经区域或国度的差异, 气候和目标的不同等因素影响, 各流域梯级开发方案各异, 但水能资源利用率却得到了很大提升。以哥伦比亚流域为例, 半个世纪以来, 在美国和加拿大的共同努力下, 干流全长 1940km 的水道上分了 15 个梯级开发, 水力资源获得充分利用。

国内水电实行“流域、梯级、滚动、综合”的开发方针，涌现出了以清江模式为代表的集中开发模式。20世纪80年代后期，我国继以礼河、猫跳河几条江河后，对流域滚动进行开发探索，东北各流域、黄河流域、长江流域等几条代表河流先后进入实施阶段，这也标志着我国水电流域梯级综合开发开始进入大规模的实施阶段。以黄河流域为例，在全长1023km的河段上，规划建设了龙羊峡、拉西瓦、公伯峡、积石峡、寺沟峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、大峡、乌金峡、黑山峡、大柳村、青铜峡等梯级电站。

梯级电站定义中认为梯级电站间的相互影响因素主要有营养盐、出口深度、河水滞留时间、库区的形态等。梯级大坝对河流生态系统的影响有共性也有个性。共性表现在，大坝的建设改变了河流原有的演进和变化过程，严重影响了河流生态系统的结构和功能。个性则表现为以下几个方面。

① 累积性。梯级开发对环境影响的突出特点就是累积性，即多个单一工程的累积效应。具体表现为对营养盐的多层阻隔效应，使得河流富营养化和重金属污染趋势加剧，而且河流上布置工程越多，资源开发利用程度越高，河流累积效应越明显。

② 波及性。梯级开发的波及性体现在上游工程的运行状况，会牵连下游工程的正常运行，即如果一个库区水质受到污染，必然会影响到下游工程水质，使得下游工程的正常运行受到影响。

③ 潜在性。梯级开发对环境的影响是复杂的，多级水电开发可能会诱发地震、塌岸、滑坡等，这些次生灾害可能会同时发生也可能单独发生。另外，大坝对泥沙的富集作用，使得有毒有害物质沉积于库区，这些物质可能是潜在的二次污染源，这些潜在危害存在着一定的不可预知性，并只有在开发利用后，这种潜在在效益才会显示出来。

综上，梯级开发对河流生态系统的影响复杂而严峻，而关于梯级水电站对河流生态系统各因子影响的研究并不多，本研究中将对照单一大坝对河流生态系统的研究进展，讨论梯级水电开发对河流生态系统影响。

二、水电开发相关评价方法

1. 水电环境影响评价

由于社会经济的快速发展和科学技术水平的迅速提高，人类对自然的认识越来越深入，越来越重视人类活动对自然造成的干扰，于是将环境影响评价在人为工程规划之初就纳入考核范围。环境影响评价（Environment Impact Assessment, EIA）是对人类的生产或生活行为（包括立法、规划和开发建设活动等）可能对

环境造成的影响,在环境质量现状监测和调查的基础上,运用模式计算、类比分析等技术手段进行分析、预测和评价,提出预防和减缓不良环境影响措施的技术方法。20 世纪 50 年代初期,由于核设施环境影响的特殊性,开始系统地进行了辐射环境影响评价。1969 年,美国成为世界上第一个建立环境影响评价制度的国家,随后相继在瑞典(1970 年)、新西兰(1973 年)、加拿大(1973 年)、澳大利亚(1974 年)、马来西亚(1974 年)、德国(1974 年)等建立了环境影响评价制度。我国在 1979 年正式确立环境影响评价制度。随着人们对环境理论的深入研究以及实践的不断验证和反馈,环境影响评价的内容在不断地扩展和增加。在研究对象上,之前只考虑对水资源、大气、声环境这些非生物因素的影响,扩展到对生态系统生物因素的影响,并且还开展了风险评价以及环境的累积性影响。在研究时间上,不仅在工程建设前进行影响评价,在工程竣工后运营期进行后评价。20 世纪 80 年代末期,环境影响评价成为水力资源开发项目在项目规划以及决策阶段的一部分,其研究成果为水力资源开发项目整个生命周期的生态环境保护工作提供参考依据。20 世纪 90 年代起,美国、加拿大等国家对水力资源开发项目的生态环境影响评价更为重视,环境影响评价的研究对象涵盖了水生及陆地生态系统。在研究方法上,经过多年的发展,越来越多其他领域的方法运用到环境影响评价中来,如景观生态学、遥感、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)。Şahin 使用 GIS 技术和地质条件对 Seyhan-Köprü 水坝对当地景观价值的影响进行了环境影响评价,结果显示从景观保护的角度来看,水土流失风险越高的地区景观价值越高。Aspinall 等运用遥感、景观生态分析以及 GIS 对黄石河上游的流域进行了评价。Lathrop 等应用基于 GIS 的评价方法和景观生态学原理,从土地保护优先的角度出发对 Sterling 森林进行了环境敏感性评价。

环境影响评价从自然环境影响评价发展到社会影响评价,与自然环境影响评价不同,社会影响评价将人类社会、经济、历史和文化等作为评价主体。20 世纪 70 年代早期,美国开始在水资源开发、城市土地开发项目中开展社会影响评价,并于 1994 年 5 月颁布了社会影响评价指南和原则,形成了比较规范的环境和社会影响评价体系。1998 年起,世界银行将社会影响评价作为项目准备、建设和运行阶段必做的内容之一,对项目实施的整个周期进行影响评价。并且,对于一些重要的建设项目还要进行社会影响的后评价。世界银行将社会影响评价与技术分析、财务评价、环境评价放在了同等重要的地位。社会影响评价的评价对象因为研究区域、项目的不同不可能完全罗列,各个项目会因为所处地区、政府政策的不同而有所区别,以下是一些重要的社会影响评价对象:①人口统计,指

人口数量和组成的变化,包括迁入人口、迁出人口、旅游人数等;②经济,指与人类生存生活息息相关的社会经济活动,包括经济活动的多样化、通货膨胀、经济活动的集中等;③地理,指由于项目的实施、运行所产生的土地利用类型的变化,如城市扩张、城镇化、土地类型分化等;④制度和法律,指政府和公益组织制度结构的效率和有效性;⑤赋权,指当地居民参与与自己生活息息相关的项目的决策能力,包括提高当地居民的知识水平、技术水平和能力技巧等;⑥社会文化,指当地居民的生活习惯、城乡聚落、历史文化等。现在社会影响评价成为环境影响评价的重要组成部分,为工程建设、运行对环境的影响进行更为全面的衡量。Slootwel 根据生态环境与社会活动的相互影响,对环境影响评价和社会影响评价进行了整合,建立了社会和环境影响的综合理论框架。社会影响评价运用在水电开发的环境影响评价中。付鹏在水电开发环境影响评价中重点考虑了社会影响评价,对社会环境影响和水电项目对社会经济的贡献指标进行了详细的列举,对怒江的水电梯级开发项目进行了评价,结果表明工程产生的正效应大于负效应,工程建设可行。

综上所述,环境影响评价从开始单一的开发项目环境影响评价,逐步扩展到区域环境影响评价以及后来的战略环境影响评价,环境影响评价的评价方法随之不断地发展、更新。随着环境问题变得越来越复杂,人们对环境影响的认识和研究不断深入,后来发展了累积环境影响评价、区域环境影响评价以及战略环境影响评价。

2. 绿色水电认证

为了评估水电与环境的相适性,欧美的一些发达国家制定了水电开发评估相应的评估规范、技术标准以及技术指南。其中比较有代表性的有瑞士的绿色水电认证、国际水电协会的水电可持续性评估规范以及美国的水电评估工具。借鉴发达国家的相关经验,对我国评估水电开发适宜性有着积极的参考作用。

瑞士联邦水科学技术研究所 (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, EAWAG) 于 2001 年建立了绿色水电认证,涵盖了生态相关的水文特性、河流连通性、地质形态、景观生境以及生物群落五个方面,以及管理相关的生态基流、峰值管理、水库管理、泥沙管理以及电站结构设计五个方面。水电项目生命周期和风险评估往往将重点放在水电站的管理以及水电站对周边环境的影响。而生态评估恰恰相反,它的评价重点是生态系统的功能,并没有对引起生态负影响的原因进行研究。绿色水电认证将这两种方法的评价观点进行了整合。绿色水电认证的评估基于以下两个生态评估原则:第一个原则是关注非生物

因子，如河流形态、水文（水力）特征、假设健康的生物群落源于完整的生物栖息地，按由下至上的角度进行评估。第二个原则是关注种类或者群落生物因子，假定生物分析可以作为综合评估的工具，按由上至下的角度进行评估。水电认证的环境管理矩阵见表 1-1。

表 1-1 绿色水电认证环境管理矩阵

环境领域	生态基流	峰值管理	水库管理	泥沙管理	电站结构设计
水文特性	遵循自然流量的季节性变化	有效调节流量便于生物迁徙	在流量最大的时候保证水库泄水	保证最小流量以保持河流正常的泥沙输移和河岸侵蚀	保证最小流量
河流连通性	保证河流与地下水、支流的连通，以及生物的迁徙	防止水生物在岸边搁浅	鱼类在自然状态下能通过水源	保证与支流地理形态上的连通性	保证鱼类通道
地质形态	保证河床的自然形态		避免河床出现过度淤泥或冲刷	允许泥沙的正常沉积	优化水坝设计以平衡尾水的泥沙水平
景观生境	维持水力特性，保护洪泛平原	保持河流的特殊景观，并且可以进行安全的娱乐活动	保护生物栖息地	允许泥沙的正常沉积以保护特有的河岸景观	保护区内不能修建新的工程，改良生物通道
生物群落	保护生物多样性	减少对生物多样性的长期损害，保护栖息地的多样性	保证水库泄水不影响稀有物种和濒危物种	保证典型河岸栖息地的形成	避免野生动物受到机器设备的伤害

瑞士作为世界上水电产量最高的国家之一，绿色水电认证自 2001 年以来已经成功应用于瑞士的 60 多个水电工程，并且被欧洲绿色电力网确定为欧洲技术标准，向欧盟其他国家推广。禹雪中等对绿色水电研究较多，结合中国水电的特点，对建立我国绿色水电认证制度、评价体系以及评级方法进行了研究。

3. 国际水电协会的水电可持续性评估规范

国际水电协会于 2009 年发布了《水电可持续性评估规范》，此规范是评价水电可持续性的评估框架，分阶段进行评价，包括规划阶段、实施阶段、运营阶段。规划阶段又分为项目的前期准备阶段以及项目准备阶段，前期准备阶段主要从战略的角度评估项目，项目准备阶段主要通过针对项目本身的一个全方位考察进行环境影响评价。每个阶段均从以下四个方面来进行评估，包括环境、社会、技术、经济。具体各部分评价指标见表 1-2。