

怒江水电开发的生态影响

董哲仁

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 论述了发展水电对于减少燃煤、控制温室气体排放的作用, 特别强调对于我国这样的燃煤大国所具有的重要环保意义。开发蕴藏丰富的怒江水电资源在全国能源格局中占据重要地位。指出怒江丰富的生物资源的原始性、自然性和独特性使其成为我国生物多样性和天然基因宝库, 具有重要的经济价值、环境价值和美学价值。阐述了河流的“连续性概念”(continuum concept), 指出河流的连续性, 不仅包括水力学、水文学意义上的连续性, 还包括营养物质输移、生物群落分布以及信息流的连续性。解决怒江水电开发问题的关键, 应该是在可持续发展的原则下, 寻找经济发展与生态保护之间的相对平衡点。需要正确面对大坝的生态胁迫问题, 积极研究如何对生态系统实行补偿的技术和机制, 建设与生态友好的大坝工程。在规划方面, 需要合理掌握流域水电开发的程度。在工程技术方面, 应研究开发降低大坝的胁迫效应以及对河流生态修复的技术措施。在管理政策方面, 需要开展生态价值和自然资本的评估研究, 建立生态补偿的合理机制。

关键词: 怒江; 水电; 生态; 影响; 胁迫; 补偿

文章编号: 1000-0933(2006)05-1591-06 **中图分类号:** Q14, X171.1 **文献标识码:** A

Ecological impacts of hydropower development on the Nujiang River, China

DONG Zhe-Ren (China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1591 ~ 1596.

Abstract: The ecological impacts of the Nujiang River hydropower development have been intensively debated in China in recent years. It is a complicated problem that involves both socioeconomic development and environmental protection, and hence needs to be investigated and evaluated in the context of the nexus of society, economy, and nature. This paper discusses the effects of reducing coal-burning and greenhouse gas emission through hydropower development, emphasizing its significance for environmental protection in a large coal-consuming country such as China. The Nujiang hydropower development plays an important role in the energy supply of China.

This paper first introduces the ecological status of the Nujiang River Basin and then describes the unique nature of the rich bio-resources in the basin that make it an invaluable national reserve of biodiversity and pristine genes. Its importance is derived from its high economic, environmental and aesthetic values. Many minorities with unique traditional cultures and habits live in the mountains and valleys along the Nujiang River. The economies of those regions are rather underdeveloped for various reasons. Most regions along the middle and upper reaches of the Nujiang River are poor. Farming activities on steeply sloping land and deforestation have caused severe soil erosion and forest damage.

This paper utilizes the “continuum concept” of rivers, illustrating that the continuum of a river implies not only hydraulic and hydrologic continuity but also that of nutrient transport, biological communities, and information flow. Dam construction creates discontinuities on a river, changing its previous characteristics. Reservoir operation alters the natural hydrological regime characterized by wet and dry cycles. These changes introduce a variety of new stresses to the river, resulting in damaged biological

基金项目: 国家水利部科学技术创新资助项目

收稿日期: 2005-07-17; **修订日期:** 2006-03-14

作者简介: 董哲仁(1943~), 男, 满族, 北京市人, 博士, 教授, 主要从事水利工程结构分析和生态水利工程研究. E-Mail: dongzr@iwhr.com

Foundation item: The project was supported by Innovation Project of Science and Technology of the Ministry of Water Resources, China

Received date: 2005-07-17; **Accepted date:** 2006-03-14

Biography: DONG Zhe-Ren, Ph.D., Professor, mainly in engaged in structural analysis of hydraulic engineering and ecologically friendly hydraulic engineering. E-Mail: dongzr@iwhr.com

habitats, reduced biodiversity and degraded ecological systems.

At present, environmental assessments of the Nujiang River hydropower development are inadequate, lacking systematically monitored data and in-depth research, and involving little forecasting analysis. The following activities are urgently needed: comprehensive analysis, prediction and assessment of hydropower cascade impacts on river ecological systems (not just a limited analysis for a few endangered species); quantification of the ecological value of the Nujiang River, in particular, its ecological service functions; evaluation of long term ecological responses to dam construction; scenario analyses for building and not building dams, various configurations of cascade, and different dam layout plans. Decisions about hydropower development in the upper and middle reaches of the Nujiang River must be made on the basis of in-depth study and assessment.

The key to the Nujiang River hydropower development problem is to find the best tradeoff between economic development and ecological protection based on the principles of sustainable development. It will be necessary to cope with the ecological stress associated with dam construction, to study the techniques for and processes of ecological compensation, and to construct ecologically friendly dams. Hydropower development needs to be managed at an appropriate level in the planning hierarchy. Techniques for alleviating the ecological stresses of dams and restoring river ecological systems should be studied and developed. At the management and policy level, valuation of ecological systems and natural capital needs to be further investigated so as to establish an appropriate mechanism for ecological compensation.

Key words: Nujiang River; hydropower; ecosystem; impact; stress; compensation

2003 年起围绕怒江水电开发的生态影响问题,引起了社会各界的广泛关注和讨论。讨论内容涉及怒江流域的生态价值;大坝建设对于怒江生态系统的负面影响;怒江流域生态保护的策略等问题。本文重点探讨怒江水电开发的生态影响问题。试图把研究问题的尺度放在社会-经济-自然复合生态系统中^[1],立足于我国国情,在经济发展与生态保护中寻求相对合理的、务实的解决方案。

1 开发水电资源的环保意义

我国能源结构不尽合理,各类能源中以煤炭为主,我国是当今世界上最大的燃煤大国。2002 年煤炭产量 13.8 亿 t,居世界第一位。燃煤造成了严重的大气污染。全球环境的已经成为国际社会关注的焦点,亟待提高我国参与全球环境变化合作的能力。

按照我国制定的全面建设小康社会的规划,2020 年要实现国内生产总值翻两番的目标。据测算,届时国家需电力总装机容量要从目前约 4 亿 kW 发展到 9.3 亿 kW,才能满足 GDP 增长的需求。这个任务是十分艰巨的。一方面能源建设要服从国家的总体发展目标,一方面我国将成为世界第一号温室气体排放大国,污染着全球的大气。如何解决?在多种比选方案中,调整我国的能源结构,特别是优先发展水电,是一种最现实和经济的优化选择。从我国的能源资源结构看,水电资源居世界第 1 位,煤居第 3 位,石油第 12 位,天然气第 22 位。我国大陆部分水电的理论蕴藏容量为 6.944 亿 kW,其中技术可开发容量为 5.416 亿 kW。我国水电开发的程度相对发达国家较低,目前仅为 23 %。发达国家的水电开发程度已经很高,平均在 60 % 以上。其中美国为 82 %,加拿大为 65 %,德国为 73 %。我国具有如此丰富的水电资源,开发水电资源自然成为能源战略的必然选择。如果我国水电总装机从现在的约 1 亿 kW,发展到 2020 年的 2.5 亿 kW,即在电力结构中的比例从 24 % 左右增长到 26.8 %,届时水力发电相当减少年燃煤 7.5 亿 t,等于 2002 年我国实际燃煤的 54.3 %。这对于大幅度减少温室气体排放意义十分重大,不仅仅是对中国,也将是对全球环境保护的重大贡献^[2]。而且水电不仅是清洁能源,也是可再生能源,我国今年颁布的《可再生能源法》以立法的形式再次肯定了水能作为可再生能源的优先发展的地位^[3]。

按照上述计划,15a 内需增加水电装机 1.5 亿 kW,每年新增 1000 万 kW,其规模相当于不到两年就要建设一座三峡水电站,任务十分艰巨。再来看看怒江的水能资源。怒江发源于青藏高原唐古拉山南麓,流经西藏自治区和云南省流出国境,进入缅甸境内称萨尔温江。我国境内干流长 2020km,流域面积 13.6 万 km²,年径流量 710 亿 m³。怒江上中游地处横断山脉的高山峡谷,干流落差达 4840m,水能资源丰富,全流域水能资源理

论蕴藏量达 4474 万 kW,技术可开发量 3200 万 kW,其中干流约 3000 万 kW。由于怒江的落差大,又集中在上中游河段,开发的单位千瓦造价低,可以说是我国的一座水电富矿。开发后除了向我国东部输送电力外,其环保功能也将是巨大的。如果怒江开发 1500 万 kW 的水电,相当可减少年燃煤约 3800 万 t。其环境效益不仅是对于中国,而且也是对全球大气保护的宝贵贡献。

2 怒江流域生态现状

怒江地处横断山脉峡谷,由于印度板块和欧亚板块的撞击,在缝合线上形成南北并列的山脉和峡谷,在纵向形成了生物南来北往的通道。横断山是热带边缘和亚热带的基地上出现的高山,在垂向形成了比较完整的垂直气候带,这对于动植物的生长非常有利。正因为如此,横断山成为我国三大生物物种聚集中心之一。横断山地区位居我国 17 个生物多样性保护关键区之首,在我国生物多样性保护中具有重要的价值。怒江流域的高等植物占全国 20% 以上,包括 200 余科、1200 余属、6000 余种。峡谷区内的珍稀植物资源丰富,属国家级保护的有彬櫟、秃杉、贡山厚朴、长蕊木兰、红花木莲、水青树、董棕等 20 余种,省级保护的有 30 多种。怒江流域珍稀的野生稻是我国重要而珍贵的基因库。流域陆生动物较多,有兽类 154 种,鸟类 419 种,两栖类 21 种,爬行类 56 种,昆虫 1690 种,其中有亚洲象、羚羊、雪豹、白眉长猿猴等多种濒危珍稀动物。怒江现有 7 类 48 种鱼,其中 17 种为怒江所特有,角鱼、缺须盆辰鱼、裸腹叶须鱼及长须黑鱼等 4 种鱼类被列入《中国濒危动物红皮书》。怒江流域内有著名的世界自然遗产——“三江并流”,高黎贡山和南滚河两个国家级自然保护区,以及怒江、小黑山和永德大雪山 3 个省级自然保护区。著名的怒江大峡谷、怒江第一湾、石月亮等独特的自然景观,更是显现了自然造化之神奇,具有极高的美学价值。总之,怒江丰富生物资源的原始性、自然性和唯一性使其成为我国生物多样性和天然基因宝库,具有重要的科学价值、经济价值、环境价值和美学价值,保护该区域的生物多样性和遗传基因具有极其重要的意义。

怒江流域地处我国云南和西藏少数民族地区,在流域内涉及的 11 个自治州(区)内,居住着藏族、独龙族、怒族、佤族、傈僳族、彝族、傣族等众多少数民族。其中怒江傈僳族自治州,就居住着 22 个民族,少数民族人口占总人口比重达 92.2%。在高山峡谷生活的各个民族,在特殊的自然、地理、文化背景下,形成了独特的传统文化和习俗。由于流域地处偏远,交通闭塞,科技、教育、文化发展相对落后,制约了经济发展,许多地方至今还保留着原始的生产生活方式。地区经济发展明显滞后,增长速度一直低于全国平均水平。例如地处中游峡谷区的怒江州 50 万人口,所辖 4 县均为国家扶贫开发重点扶持县,农民人均年纯收入仅 970 元。

从怒江流域生态现状看,生态系统面临着严重退化的威胁。20 世纪 50 年代怒江州的森林覆盖率达 53%,经过“大跃进”和“文革”时代的砍伐破坏以及近年来毁林开荒,目前怒江两岸高程 1500m 以下的原始森林已荡然无存,1500~2000m 之间的植被也破坏严重。根据 1999 年详查,仅怒江傈僳族自治州的水土流失面积就达 3933km²,占该州国土面积的 26.75%。

怒江流域生态受到破坏的根本原因是当地的土地资源极度匮乏。中游地区 76% 的面积都是 25° 以上的坡地,水土流失严重,土地贫瘠,耕种困难。人口不断增加,国家生态保护补偿政策不到位,使低水平的生产活动仍然对生态系统造成破坏。另外,流域内大量的泥石流和山体滑坡,也严重威胁着群众的生命安全^[4]。

3 大坝对于河流生态系统的胁迫

大坝对于生态系统的作用是双重的,一方面水库为生物生长提供了丰富的水源,也可缓解大洪水对于生态系统的冲击等,这些因素对河流生态系统是有利的。另一方面,大坝对于河流生态系统产生胁迫。大坝拦截水流形成水库,造成了河流的非连续化问题。这里提出河流的“连续性概念(continuum concept)”,借以说明河流生态系统是一种开放的、流动的生态系统,其连续性不仅指一条河流的水力学和水文学意义上的连续性,同时也是对于生物群落至关重要的营养物质输移的连续性^[5]。营养物质以河流为载体,随着自然水文周期的丰枯变化以及洪水漫溢,进行交换、扩散、转化、积累和释放。沿河的水生与陆生生物随之生存繁衍,相应形成了上中下游多样而有序的生物群落,包括连续的水陆交错带的植被,自河口至上游洄游的鱼类以及沿河连续分布的水禽和两栖动物等,这些生物群落与其生境构成了具有较完善结构与功能的河流生态系统。研究成果

表明,洪水周期变化对聚集在河流周围的生物是一种特殊的信号,这些生物依据这种信号进行繁殖、产卵和迁徙,这表明河流还肩负着传递生命信息的任务。概括地讲,河流是生态系统物质流、能量流和信息流的载体。河流的连续性,不仅包括水流的水力学、水文学意义上的连续性,还包括营养物质输移的连续性、生物群落的连续性和信息流的连续性。大坝将河流拦腰斩断,形成了河流的非连续性特征,改变了连续性河流的规律。

从现象上看,由于大坝蓄水后,河谷变成了水库,原有陆地及丘陵生境被破碎化、片断化,陆生动物被迫迁徙。流动的河流变成了相对静止的人工湖,流速、水深、水温及水流边界条件都发生了变化,水库中出现明显温度分层现象。由于水库泥沙淤积,也截留了河流的营养物质,促使藻类在水体表层大量繁殖,在库区的沟汊部位可能产生水华现象。在热带和亚热带地区的森林被水库淹没后,还会产生大量的二氧化碳、甲烷等温室气体。另外,对于大型水库,由于水库水面蒸发量加大,水热条件改变,河流下垫面条件变化等造成水文循环模式改变,对于局部气候可能会产生影响,对于流域内陆地生态系统也可能产生不利影响。由于水库的水深高于河流,在深水处阳光微弱,光合作用减弱,与河流相比其生物生产量低。对于不设鱼道的大坝对于洄游鱼类是致命的屏障。在大坝下游,因为水流携沙能力增强,加剧了水流对于河岸的冲刷,可能引起河势变化。由于水库泥沙淤积及营养物质被截流,大坝下游河流廊道的营养物质输移扩散规律也发生改变。这些因素都会使生物栖息地特征发生改变。另一方面,自然河流的水文周期年内有明显的丰枯变化,河流生物同样随之呈现脉冲式的周期变化。而大坝运行期间,水库的调度服从于发电等需求,使年内径流调节趋于均一化,这些都会对河流廊道(river corridor)产生压力^[6]。最后,兴建水库造成移民搬迁,淹没文物古迹或改变自然景观,这又涉及社会和文化问题,从宏观上看是造成一种社会-经济-自然的综合问题。

从机理分析看,河流、湖泊和水库都是生物地球化学循环过程中物质迁移转化和能量传递的“交换库”。而在湖泊与水库中往往滞留时间长,一些物质的输入量大于输出量,其滞留量超出生态系统自我调节能力,由此导致污染、富营养化等,这种现象称为“生态阻滞”。由于每一条河流的自然、社会、经济条件不同,建坝以后的环境影响程度也各不相同,需要进行具体分析。

4 怒江水电开发的生态影响

在怒江流域进行水电梯级开发,对生态系统肯定会造成胁迫效应,否认或者讳言这种影响不是一种科学的态度。由于国内目前对于大坝的生态影响问题的讨论,多为抽象的建议和理论上的议论,少有具体的现场观测和分析工作,更缺乏定量的数值模拟和科学试验。加之受到当前科学发展水平和人们认知能力的限制,目前对于怒江水电开发的生态影响缺乏全面、深入的预测和评估。这主要表现在以下 4 个方面:

一是缺乏怒江梯级开发后对于河流生态系统整体影响分析预测和评价,而不仅限于某些珍稀、濒危物种的分析。特别要注重对河流生态系统结构与功能的影响,预测评估河流生态系统的整体变化。研究范围以河流廊道为主,兼顾全流域。

二是缺乏对于怒江的生态价值的定量分析,特别是生态服务功能的定量分析。现在讨论怒江生态保护问题,比较重视经济价值和旅游价值的自然资源。实际上,怒江的生态价值,绝不仅仅局限于在商品经济中可直接利用的价值,它对于气候稳定、水体自净、水土保持等方面的价值更为重要,这些都需要进行研究论证。至于怒江生态系统的非利用价值,还没有触及到,包括自然物种和基因库、生物多样性和雄伟奇险的自然景观。

三是缺乏对于筑坝产生的生态响应的长时间尺度分析。筑坝后,泥沙淤积以及河势变化引起的栖息地质量变化、水库运行造成水文周期的人工化对于水生生物的效应等,都是一个缓慢的演进过程,也许需要数十年、上百年或更长的时间逐渐显现。因此需要在长期、系统的生态监测的基础上进行预测和评估。目前,怒江的生物监测工作十分薄弱,尚未建立流域生物监测系统,现有的生物调查资料时间尺度较短。在这样的条件下,进行筑坝后的生态长期影响评估和预测自然是十分困难的。

四是缺乏不同方案的情景分析。对于开发与不开发的生态影响的情景分析比较;如果实施开发,不同的梯级开发布置方案的生态影响的情景分析比较。这些都需要建立水文、水力学因子与生物因子的关系模型,针对水电不同的开发程度,分析不同梯级数目,不同水电站位置和布置方式对于标志性生物的胁迫程度,从而

探求优化的开发程度和合理方式。

5 生态补偿技术与机制

在国际资源与环境研究领域有两种对立的理论,一种称之为资源主义(Resourcism),主张最大限度持续地开发可再生资源。另一种称之为自然保护主义(Preservationism),其主要观点是对于自然界中的尚未开发区域,反对人类居住和进行经济开发。资源主义强调了满足人类经济发展的重要性,却忽视了生态保护对于人类长远利益的作用。而自然保护主义虽然高度重视维护自然生态系统,但是反对一切对自然资源的合理开发利用,其结果往往会脱离社会经济发展的实际而成为空想和空谈^[7]。解决难题合理的路线应该是在可持续发展的原则下,寻找发展与保护之间的相对平衡点。在我国近年关于大坝建设利弊争论中,更需要在权衡工程项目的利弊时,“两利相权取其重,两害相权取其轻”,提倡“趋利避害”,不必“因噎废食”,正确面对大坝对于生态的负面影响,积极研究如何对生态系统实行补偿的技术和机制,建设与生态友好的大坝工程。

从规划的层面讨论,先要确定怒江水电开发的合理比例。目前的怒江中下游水电规划报告中推荐松塔等13级水电站梯级开发方案,总装机容量2132万千瓦,已占怒江干流水能技术可开发量的71%,其值明显偏高。可以预想,各个梯级电站建成后,奔腾的怒江将变成13个首尾相接的人工湖,生境条件完全改变,严重的生态阻滞将不可避免。因此,需要重新论证合理的开发比例,留出若干段足够长度的自然河段,以保留河流作为流动生态系统的基本特征。比如开发利用40%左右的水能,通过情景分析研究生态响应状况。即便如此,规划也应该分期实施,不宜全面开花。在建成第一座水电站后,加强生物监测和跟踪评估,为规划的动态调整留有余地。与此同时,建议以立法的形式划定哪些河段内永远不得筑坝,也不得成为水库的回水区^[8,9]。这些河段包括世界自然遗产区、著名景观河段、重要生物栖息地河段、河流生境多样性集中河段。具体应包括怒江大峡谷、怒江第一湾、石月亮等独特自然景观区以及与国家自然保护区、国家风景名胜区相关的河段。根据我国的《水法》要求,怒江的水电开发规划必须服从怒江水资源综合规划。怒江水资源综合规划应全面统筹水电、防洪、供水和灌溉等多方面资源利用,权衡资源开发与生态保护的关系,协调干流与支流水电开发的关系,避免单一专业规划的片面性。

在工程技术层面,应加紧研究最大限度降低大坝的胁迫效应以及对河流实施生态补偿的技术措施^[10]。在水电站结构方面,应吸取岷江等流域引水式电站造成河道生态萎缩退化的教训,尽量避免采用引水式结构。目前规划中的丙中洛电站采用隧洞引水结构方案,将会导致约10km河段断流或基流过小,影响河流生态,不宜采用。另外,在大坝设计中,要在充分研究洄游鱼类的习性的基础上设计合理的鱼道,为洄游鱼类的繁衍创造条件。大坝泄水孔口布置要充分考虑水库的温度分层现象,在水库调度中可以在泄水时为鱼类生存提供适宜的水温条件。生物栖息地建设包括水库库区的水土保持以及地质灾害的防治等,为生态重建创造条件。大坝下游的栖息地建设重点是保护河流的蜿蜒性,断面形态的多样性,特别注意在施工期间的弃土废渣的处理以防止淤塞河道,改变河势^[11,12]。

在规划设计阶段就应该做出水库生态调度预案,目的是在水电站运行期间的调度方式需兼顾河流生态健康需求。传统的调度方式是按照发电需求进行水库调度,其结果使水文条件均一化,改变了自然河流年内丰枯变化和脉冲式规律,产生对水生生物生长的不利影响。水库调度还应保证下游河道有一定的生态用水量,防止河道萎缩和生态退化,并且合理调度防止水库淤积^[13]。

如何建立生态补偿机制问题?需要建立新的理念,制定新的政策。建议国家以怒江为试点开展生态系统服务价值评估工作。我国当前的情况是,经济发展包括水电开发的效益是有形的,可以用货币定量,而河流生态系统的服务功能是无形的。人们的传统概念认为这是大自然的无偿赐予,是免费获得的,从而对生态的损坏也是抽象的。1992年联合国环发大会通过的《21世纪议程》明确提出,要开展生态价值和自然资本的评估研究。1994年我国颁布的《中国21世纪议程》提出:“需要建立一个综合的资源环境与经济核算体系来监控整个国民经济的运行。”建议以这种评估为基础,全面权衡工程的直接社会经济效益与生态系统服务功能损失之间的利弊得失,以避免单纯获得直接经济效益的短期行为^[14,15]。

应以法律形式明确谁是负责河流生态补偿的主体,怒江开发可以作为试点工程。在环境保护管理领域,“谁污染,谁付费”(污染者付费)的原则,已经得到了国际社会的普遍认同。参照这个原则,在大坝建设方面,建议明确“谁受益,谁补偿”(受益者补偿)的原则,明确大坝工程业主是负责生态补偿的主体。不能再走“业主经济受益,政府环境善后”的老路。补偿的范围不仅仅局限在保护濒危、珍稀动植物或者库区植被恢复等方面,费用的核算应以河流生态系统服务功能损失总价值作为补偿标准的依据。补偿的范围不应仅仅局限于水库和大坝下游局部,应该是针对全流域的。补偿的时间应与大坝寿命一致,也就是说,大坝边运行边补偿。补偿的方式除采取生态工程措施外,还应制定规章或法规,明确规定水电站应采取生态调度运行方式,有利于河流生物生长繁衍,由此造成的发电量减少的经济损失,也确定为一种补偿方式。

水库移民问题,同样需要在社会-经济-自然综合生态系统中考察,制定合理的政策、标准。要贯彻“以人为本”的方针,建立长效补偿机制,当地居民以其居住权和土地使用权,在实施水库移民后,应在水电企业中占有一定股份,参与年度利润分红。除了足量的经济补偿外,还要按照建设和谐社会要求,充分尊重少数民族的传统、习俗、宗教、文化、心理,尊重他们的居住和迁徙的意愿,给予必要的社会帮助和人文关怀。

最近,国家明确提出了“在保护生态基础上有序开发水电”的方针,应在这个原则的指导下论证怒江水电开发与生态保护问题。如上述,怒江开发的生态影响是一个非常复杂的问题,目前的调查研究和环评工作还远远不能为工程决策提供支撑。当前,亟待开展全面的生态调查,建立生物监测网络系统,进行长期观测。特别是开展大坝生态影响的调查和科学研究,对于水电资源不同的开发程度和开发方式进行模拟分析,借以评估水电开发的利弊得失。同时,积极组织开展生态补偿技术和补偿机制的研究,探索与生态友好的水电建设技术,努力寻求开发与保护的相对平衡点。特别需要组织多学科的专家进行讨论与合作,避免认识的片面性,只有在充分调查、研究、评估和论证的基础上才能做出决策。

References:

- [1] Dixon Ma Shijun, Wang Rusong, Society-economy-nature composite ecosystem, *Journal of Ecology*, 1984, 4(1):6~11.
- [2] Dong Zheren, Ecological Compensations for Damed Rivers, *Engineering Science*, 2006, 8(1):5~10.
- [3] Pan Jiazheng, The Desert of Dams for thousand years. Tsinghua University Press, 2000. 10~48.
- [4] Yangtze River Water Resources Commission, Correctly disposing the relation of protection and development, reasonably developing the water power resources of the Nujang basin. *China Water Resources*, 2005(4) 5~7.
- [5] Vannote R L, *et al*, The river continuum concept, *Can. J. Fish. Aqua. Sci.*, 37:130~137, 1980.
- [6] Dong Z R, Diversity of river morphology and diversity of bio-communities. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(11):1~7.
- [7] Hart D D and Poff N L, Eds. Dam removal and river restoration: special section. *BioScience*, 2002, 52:653~747.
- [8] Brookes A, Shields JR F D, *River Channel Restoration*, John Wiley & Sons, UK, 2001.
- [9] Geres D, *River Restoration 2004*, Proceedings 3rd ECRR International conference on River Restoration in Europe, Hrvatske Vode -Croatian Waters, Netherlands, 2004. 297~315.
- [10] ASCE River Restoration Subcommittee on Urban Stream Restoration, Urban stream Restoration, *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, July 2003. 491~493.
- [11] Dong Z R. Theoretical framework for eco-hydraulic engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(1), 1~6.
- [12] Dong Z R. On the design principles eco-hydraulic engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(10), 1~5.
- [13] Dong Z R. Rhine: Development, Protection and International Cooperation, *Yellow River Press*, 2005. 127~138.
- [14] Costanza R, d'Arge R, Rudolf de Groot, *et al*. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387:253~260.
- [15] Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D. *Ecological Economics*. Ji'nan: Yellow River Press, 2003. 110~117.

参考文献:

- [1] 马世骏,王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1):6~11.
- [2] 董哲仁. 筑坝河流的生态补偿. *中国工程科学*, 2006, 8(1):5~10.
- [3] 潘家铮. 千秋功罪话水坝. 北京:清华大学出版社, 2000. 10~48.
- [4] 长江水利委员会. 正确处理保护与开发的关系, 合理开发怒江流域水能资源. *中国水利*, 2005 (4):1~6.
- [6] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性. *水利学报*, 2003(11)总 326 期, 1~7.
- [11] 董哲仁. 生态水工学的理论框架. *水利学报*, 2003(1), 1~6.
- [13] 董哲仁主编. 莱茵河-治理保护与国际合作. 黄河水利出版社, 2005. 127~138.
- [15] 徐中民, 张志强, 程国栋. *生态经济学——理论方法与应用*. 济南:黄河出版社, 2003. 110~117.