

探索生态水利工程学

董哲仁

(中国水利水电科学研究院, 100038 北京)

[摘要] 人类社会与生态系统对于河流都具有高度的依赖性, 人类应该与生态系统共享水资源。水利工程是对河流生态系统的胁迫因子之一。需要建立新的准则和开发新的技术方法, 使水利工程在满足人类社会需求的同时, 兼顾河流生态系统健康和可持续性的需求, 构建与生态友好的水利工程技术体系。

[关键词] 生态; 水利工程学; 胁迫; 非连续化; 异质性; 反馈式设计

[中图分类号] TV1; Q14; X171 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)01-0001-07

水利水电工程在防洪、灌溉、发电、供水、航运、养殖和旅游等诸多方面对于保障社会安全、促进经济发展发挥了巨大的作用。这些工程设施的建设 and 运行, 对于河流生态系统具有双重影响。一方面, 筑坝形成水库, 为干旱、半干旱地区的植被和生物提供了较为稳定的水源。另一方面, 则对河流生态系统形成了负面影响。当前, 有必要对传统的水利水电工程规划设计和运行的理念与技术方法进行反思, 进一步吸收生态学的理论知识, 探索与生态友好的水利水电工程技术体系, 这是实现与自然和谐相处目标的时代需求。

1 人类社会与生态系统共享水资源

众所周知, 所谓生态系统是指一定空间的生物群落(动物、植物、微生物)与环境组成的系统, 其中各成员借助能量交换和物质循环形成一个有组织的功能复合体。水是生物群落生命的载体, 又是能量流动和物质循环的介质。在陆地生态系统中, 水的功能如同血液, 河流如同动脉。河流系统作为纽带, 把人类社会与自然生态系统交织在一起。

水利工程学以工程设施为手段, 控制和改造河流, 达到为人类社会谋取经济利益的目的。水利工程学对于河流价值的基本认识是: 水资源是重要的

自然资源, 河流是开发利用的对象。随着现代科学对生态系统性质的探索不断深入, 对于河流的价值需要有更加全面的把握。

1.1 人类对水的依赖性

水, 是人类社会发展最重要的不可替代的自然资源。在社会系统中, 对于支持人类生命、食物生产、能源生产有着基本的功能作用。无论是供水、灌溉、发电、还是航运、养殖和旅游, 都离不开淡水和河流。

根据《2004年水资源公报》^[1], 2004年我国水资源总量为 $24\ 130 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。全国平均降水量601 mm, 折合降水总量为 $56\ 876 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。全国产水总量占降水总量的42.4%。2004年全国总用水量 $5\ 548 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占当年水资源总量的23%。以水源划分, 地表水源供水量占81.2%, 地下水源供水量占18.5%, 其他水源供水量占0.3%。以用途划分, 生活用水占11.7%, 工业用水占22.2%, 农业用水占64.6%, 生态用水(仅包括人为措施供给的城镇环境用水和部分河湖、湿地补水)占1.5%。全国人均综合用水量 433 m^3 。2003年我国水电发电量 $2\ 830 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 2004年水电总容量突破 $1 \times 10^8 \text{ kW}$ 。可见水资源是保障人民健康, 保障粮食安全, 保障能源安全, 保障生态安全的重要

战略资源。

1.2 生态系统对水的依赖性

水是生态系统须臾不可或缺的环境要素。生态系统包括生命系统和生命支持系统。生命支持系统的第一要素是太阳能。太阳能通过绿色植物光合作用转换为生物能，并借食物链（食物网）流向动物和微生物；第二要素是把各个系统联系起来循环的水。水和营养物质（碳、氧、氢、磷等）通过食物链（食物网）不断地合成和分解，在环境与生物之间反复地进行着生物—地球—化学的循环作用。河流与数以百万计的物种共生共存，通过食物链、养分循环、能量交换、水文循环以及气候系统，相互交织在一起。

河流作为营养物质的载体，既是陆地生态系统生命的动脉，也是水生生态系统的基本生境。首先，水是陆地生态系统植被光合作用的原料。有学者估计，陆生生态系统大约消耗了 2/3 的陆地降雨，总量估计达到 71.8 Gm^3 ，主要以蒸发蒸腾的方式加入水文循环。陆地生态系统直接影响河流径流条件。其次，在水生生态系统中，河流是各类生物群落的栖息地，是鱼类、无脊椎动物等动物生存繁殖的基本条件和水生植物生长的基础。河流的流量、流速、水深、水温和水文周期以及河流的地貌学特征，直接影响生物栖息地质量。

1.3 河流的生态价值

按照生态系统价值的一般分类方法，河流的价值可以分为两大类，一类是利用价值，一类是非利用价值。利用价值又分为直接利用价值和间接利用价值。直接利用价值是可直接消费的产出和服务，包括河流直接提供的食品、药品和工农业所需材料，也包括对水资源的开发利用价值。间接利用价值是指对生态系统中生物的支撑功能，也是对于人类的服务功能，包括河流水体的自我净化功能；水分的涵养与旱涝的缓解功能；对洪水控制的作用；局部气候的稳定；各类废弃物的解毒和分解功能；植物种子的传播和养分的循环。此外，无论是高山大川、急流瀑布，还是潺潺溪流以及荷塘秋月，其本身具有的巨大美学价值，可以满足人们对于自然的心理依赖和审美需求。

非利用价值不同于河流生态系统对于人们的服务功能，是独立于人以外的价值。非利用价值是对于未来的直接或间接可能利用的价值，比如留给子孙后代的自然物种、生物多样性以及生境等。还包

括人类现阶段尚未感知的但是对于自然生态系统可持续发展影响巨大的自然价值。

水资源带给人们经济利益或者实物型的生态产品（食品、药品和材料等）价值，在市场流通中可以得到体现，为人们所重视。而非实物型的生态服务，包括生物群落多样性、环境、气候、水质、人文等功能，往往是间接的、却又对人类社会经济产生深远、重要影响的，往往为人们所忽视。一旦这些生态功能受到破坏而不可逆转，人们才可能悔悟到曾经享受的大自然的赐予是多么的宝贵。

1.4 对河流生态系统的胁迫^[2]

在自然河流经历的数万以至数百万年的演变过程中，受到自然界和人类活动的双重干扰，这种干扰或者压力在生态学中称为胁迫（stress）。

对于自然界的重大干扰，比如地壳变化、气候变化、地震、火山爆发、山体滑坡等，河流系统的反应或是恢复到原有的状态，或者滑移到另外一种状态，寻找新的动态平衡，逐步走入良性轨道。在此过程中，河流系统一般表现出一种自我恢复功能。而人类活动特别是近一、二百年大规模经济活动对于河流生态系统的干扰所造成的影响往往是系统自身难以恢复的，严重的干扰往往是不可逆转的。

人类活动对于河流生态系统的胁迫主要来自以下几个方面：**a.** 工农业及生活污染物质对河流造成污染；**b.** 从河流、水库中超量引水，使得河流本身流量无法满足生态用水的最低需要；**c.** 土地利用方式的改变，农业开发和城市化进程改变了水文循环的条件；**d.** 对湖泊、河流滩地的围垦以及上游毁林造成水土流失，导致湖泊、河流的退化；**e.** 由于引进、贸易、移民、旅游、战争等诸多因素，在河流、湖泊和水库中不适当地引入外来物种造成生物入侵；**f.** 水利工程对于河流生态系统的胁迫。最后一种胁迫是一种物理类的胁迫，表现为河流地貌特征的变化以及水文、水力学条件的变化，引起栖息地质量的改变。

据联合国《世界水资源开发报告》（2002）估计，在地球生态系统中，因河流开发和改造与陆地淡水密切相关的生物有 24% 的哺乳动物和 12% 的鸟类受到生存的威胁。目前考察过的占总数 1/10 的鱼类中，有 1/3 面临绝种。由于栖息地环境被干扰，陆地的水域生态多样性普遍下降。

1.5 人类社会与生态系统共享水资源^[3]

综上所述，无论是人类社会系统还是自然生态

系统，对于河流和淡水都存在着极大的依赖性。这两种依赖性可能是矛盾抑或是冲突的。问题在于我们需要理解并不是只有人类的生存依赖于河流和淡水资源。除了人类，自然生态系统也对河流存在高度的依赖性。河流不但哺育了自古就择水而居的人类，还是数以百万计的生物物种的栖息地。由河流、湖泊、湿地、洪泛平原、河口与生物群落和人类社会交织在一起形成了河流生态系统。还需要认识到，健康的生态系统为当代人类提供了生态服务功能，为子孙后代提供了可持续发展的条件。工业社会以来人类的大规模开发活动对于河流生态系统形成了胁迫，反过来，生态系统的退化会直接或间接损害人类的利益。因此，珍爱河流生态是包括工程界在内的全社会的共同责任。

如何保护和修复河流生态系统？需要指出的是，现代生态学理论已经摒弃了曾经流行的“维持生态平衡”观念，单纯的“保护生态”理念也已经被淡化。这些传统理念所以被改变，有两层含意。第一，认为生态系统始终处于一种动态的演替过程中，变化是绝对的，而平衡和稳定是一种例外，所以人们要适应变化。第二，要承认在生态系统承受能力的范围内人类合理开发自然资源的合理性，同时要认识到在许多情况下当代人类活动是对生态系统的主要胁迫因子，需要主动对生态系统进行修复和补偿，以维护生态系统的完整性和可持续性。现在，更多提倡对生态系统的综合管理，在自然—社会—经济复合生态系统中探讨社会系统和自然系统的可持续发展，以实现人与自然的和谐。

2 对水利工程学的反思

2.1 对河流的大规模改造

几千年人类为了自身的防洪安全与经济发展，对河流进行了大量的人工改造。特别是近一百多年来利用现代工程技术手段，对河流进行了大规模开发利用，兴建了大量工程设施，改变了河流的地貌学特征。河流一百年的人工变化超过了数万年的自然进化。有学者估计，至今，全世界有大约60%的河流经过了人工改造，包括筑坝、筑堤、自然河道渠道化、裁弯取直等 (Brookes, 2001)。据统计，全世界坝高超过15 m或库容超过 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大坝有45 000座。其中约40 000座是1950年以后建设的。坝高超过150 m或库容超过 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大坝有305座。(ICOLD, 2000)。建坝最多的国家依次为

中国、美国、前苏联、日本和印度。

2.2 水利工程对河流生态系统的胁迫^[4]

水利工程对河流生态系统的胁迫主要表现在两方面：一是自然河流的渠道化，二是自然河流的非连续化。

2.2.1 自然河流的渠道化 **a.** 平面布置上的河流形态直线化。将蜿蜒曲折的天然河流改造成直线或折线型的人工河流或人工河网。**b.** 河道横断面几何规则化。把自然河流的复杂形状变成梯形、矩形及弧形等规则几何断面。**c.** 河床材料的硬质化。防洪工程的河流堤防和边坡护岸的迎水面采用混凝土、浆砌块石等硬质材料。其结果是河流的渠道化改变了河流蜿蜒性的基本形态，改变了急流、缓流、弯道及浅滩相间的格局。横断面上的几何规则化，改变了深潭、浅滩交错的格局，生境的空间异质性降低，水域生态系统的结构与功能随之发生变化，特别是生物群落多样性将随之降低，引起淡水生态系统退化。

2.2.2 自然河流的非连续化

1) 构筑水坝引起顺水流方向的河流非连续化。论及构筑水坝引起顺水流方向的非连续化问题，需要援引河流的“连续性概念”(continuum concept)，用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。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，相应地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，这些生物群落与生境共同组成了具有较为完善结构与功能的河流生态系统。研究成果还表明，洪水周期变化对于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，即河流还肩负着传递生命信息的任务。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。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。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。另外,不设鱼道的大坝对于洄游鱼类是致命的屏障。

2) 构筑堤防引起的河流侧向的非连续化。堤防也有两面性。一方面保护了人类居住区免受洪水的侵害,另一方面也产生负面影响。在进行堤防建设时,往往为利用滩地缩窄主河道。堤防妨碍了汛期主流与岔流之间的沟通,阻止了水流的横向扩展,形成另一种侧向的水流非连续性。堤防把干流与滩地和洪泛区隔离,使岸边地带和洪泛区的栖息地发生改变。原来可能扩散到滩地、河汊和死水区的洪水、泥沙和营养物质,被限制在堤防以内的河道内。其结果是植被面积明显减少。鱼类无法进入滩地产卵和觅食,也失去了躲避风险的避难所,使鱼类、无脊椎动物等大幅度减少,导致滩区和洪泛区的生态功能退化。

2.2.3 水库运行期引起的生态胁迫 自然河流的水文周期有明显的丰枯变化,河流生物随之呈现脉冲式的周期变化。大坝运行期间,水库的调度服从于发电、供水和防洪等需求,使年内径流调节趋于均一化,这些都会对河流走廊产生压力。另外,如果从水库中超量引水用于供水、灌溉等目的,使大坝下游水量锐减,引起河流干涸与断流,也会导致生态系统的退化。在大坝下游,因为水流携沙能力增强,加剧了水流对河岸的冲刷,可能引起河势变化。由于水库泥沙淤积及营养物质被截流,大坝下游河流走廊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。

2.3 水利工程学的目标分析

传统意义上的水利工程学作为一门重要的工程学科,以建设水工建筑物为手段,目的是改造和控制河流,满足人们防洪和水资源利用等多种需求。当人们认识到河流不仅是可供开发的资源,更是河流系统生命的载体,不仅要关注河流的资源功能,还要关注河流的生态功能,这时才发现水利工程学存在着明显的缺陷,就是在满足人类社会需求时,忽视了河流生态系统的健康与可持续性的需求。

3 构建与生态友好的水利工程技术体系

3.1 两种对立的理论

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(resourceism),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),主要观点是对自然界中的尚未开发区域,反对人类居住和进行经济开发。资源主义强调满足人类经济发展的重要性,却忽视了维护健康生态系统对于人类利益的长远影响。而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实际而成为空洞的观点。反对建设大坝,主张一律拆除大坝的观点,就属于这一类^[5]。实际上,人类社会生活离不开水库大坝,离不开水利工程。比较现实的思维方法是:如何在满足人类社会经济需求与保护生态系统健康二者之间寻找适当的平衡点,实现可持续发展的目标。

如果简单地反对一切大坝建设,主张大范围地拆坝,肯定脱离了社会经济发展实际,是一种因噎废食的观点。相反,回避大坝给生态系统带来的胁迫问题,忽视对于生态系统的补偿,无疑会给人类长远利益带来损害。世界上不存在百利而无一害的工程技术,权衡利弊,趋利避害是辩证的思维方法。实践表明,大坝对于河流生态系统的负面影响,可以通过工程措施、生物措施和管理措施在一定程度上避免、减轻或补偿。寻找相对优化的技术路线是解决问题的合理思维方式。

3.2 生态工程学的发展沿革

面对河流治理中出现的水利工程对生态系统的某些负面影响,西方工程界对水利工程的规划设计理念进行了深刻的反思,认识到河流治理不但要符合工程设计原理,也应符合自然原理。在工程实践方面,20世纪80年代阿尔卑斯山区相关国家德国、瑞士、奥地利等,在山区溪流生态治理方面积累了丰富的经验。莱茵河“鲑鱼—2000”计划实施成功,提供了以单一物种目标的大型河流生态的经验。90年代美国的凯斯密河及密苏里河的生态修复规划实施,标志着大型河流的全流域综合生态修复工程进入实践阶段。

近20年来,随着生态学的发展,人们对于河流治理有了新的认识,认识到水利工程除了要满足人类社会的需求外,还要满足维护生物多样性的需求,相应发展了生态工程技术和理论。河川的生态工程在德国称为“近自然河道治理工程”,提出河道的整治要符合植物化和生命化的原理,在日本称为“多自然型建设工法”或“生态工法”,美国称为“自然河道设计技术”。一些国家已经颁布了相

关的技术规范和标准。

1993年美国国家科学院所主办的生态工程研讨会中根据 Mitsch 的建议,将“生态工程学”定义为“将人类社会与其自然环境相结合,以达到双方受益的可持续生态系统的设计方法”。生态工程学的范围很广,包括河流、湖泊、湿地、矿山、森林、土地及海岸等的生态建设问题^[6,7]。

3.3 如何借鉴国外经验

尽管发达国家在河流治理生态工程学方面已经积累了不少经验,但是其理论和技术方法目前还处于发展阶段。我国可以借鉴发达国家的经验,但是不可能照搬,原因是自然条件不同,经济发展阶段不同,需要结合我国国情进行河流生态治理。另外,发达国家水资源水能开发已经基本完成,而我国正处在水利水电的建设高潮。新建工程要吸取发达国家的经验教训,改进工程规划设计理念和技術,探索、发展我国自己的与生态友好的水利工程技术体系。

4 生态水利工程学的内涵

4.1 什么是生态水利工程学^[3]

生态水利工程学 (eco-hydraulic engineering) 作为水利工程学的一个新的分支,是研究水利工程在满足人类社会需求的同时,兼顾水域生态系统健康与可持续性需求的原理和技术方法的工程学。

现代科学发展使我们认识到,传统意义上的水利工程学在满足社会经济需求时,不同程度地忽视了河流生态系统本身的需求。而河流生态系统的功能退化,也会给人们的长远利益带来损害。未来的水利工程在权衡水资源开发利用与生态与环境保护二者关系方面,理性地寻找资源开发与生态保护之间的合理的平衡点。

从河流生态建设的全局看,生态水利工程将与河流环境立法、水资源综合管理、循环经济模式以及传统治污技术一起,成为河流生态建设的主要手段之一。

4.2 生态水利工程学的学科基础和研究对象

现在的水利工程学的学科基础主要是水文学和水力学、结构力学、岩石力学等工程力学体系。学科的进一步发展需要吸收生态学的理论和方法,促进水利工程学与生态学的交叉融合,改进和完善水利工程的规划方法及设计理论。生态水利工程学将是一门交叉学科,也是一门应用的工程学科。

传统意义上的水利工程学研究的对象是河流、湖泊等组成的水文系统。生态水利工程学关注的对象不仅是具有水文特性和水力学特性的河流,而是还是具备生命特性的河流生态系统。研究的河流范围从河道及其两岸的物理边界扩大到河流走廊 (river corridor) 生态系统的生态尺度边界。

生态水利工程学的技术方法包括以下内容:对于新建工程,提供减轻对河流生态系统胁迫的技术方法。对于已经人工改造的河流,提供河流生态修复规划和设计的原则和方法,提供河流健康评估技术,提供水库等工程设施生态调度的技术方法,提供污染水体生态修复技术等。

4.3 生态水利工程学的基本原则^[8,9]

4.3.1 工程安全性和经济性原则 生态水利工程既要符合水利工程学原理,也要符合生态学原理。生态水利工程的工程设施必须符合水文学和工程力学的规律,以确保工程设施的安全、稳定和耐久性。必须充分考虑河流泥沙输移、淤积及河流侵蚀、冲刷等河流特征,动态地研究河势变化规律,保证河流修复工程的稳定性。对于生态水利工程的经济合理性分析,应遵循投入最小而经济效益和生态效益最大的原则。

4.3.2 保持和恢复河流形态的空间异质性原则 有关生物群落研究的大量资料表明,生物群落多样性与非生物环境空间异质性 (spacial heterogeneity) 存在正相关关系。非生物环境的空间异质性与生物群落多样性的关系反映了非生命系统与生命系统之间的依存和耦合关系。一个地区的生境空间异质性越高,意味着创造了多样的小生境,能够允许更多的物种共存。反之,如果非生物环境变得单调,生物群落多样性必然会下降,生物群落的性质、密度和比例等都会发生变化,造成生态系统的某种程度的退化。

河流生态系统生境异质性主要表现为:水—陆两相和水—气两相的联系紧密性;上中下游的生境异质性;河流纵向的蜿蜒性;河流横断面形状的多样性;河床材料的透水性和多孔性等。由于河流形态异质性形成了流速、流量、水深、水温、水质、水文脉冲变化、河床材料构成等多种生态因子的异质性,造就了丰富的生境多样性,形成了丰富的河流生物群落多样性。因此,保持和恢复河流形态异质性是提高生物群落多样性的重要前提之一。

在确定河流生态修复目标以后,就应该对于河

地貌历史和现状进行勘查和评估。在此基础上确定生境因子与生物因子的相关关系,必要时建立某种数学模型。对于新建工程,通过模型分析可以对大坝的坝址选择、河流梯级开发布置方案、水工枢纽布置方案进行生态影响的多方案的情景分析,进而获得生态胁迫最低的优化设计。河流修复工程,在模型分析的基础上,可以进行河流地貌学设计和生物栖息地设计。

4.3.3 生态系统自设计、自我恢复原则 生态系统的自组织功能表现为生态系统的可持续性。自组织的机理是物种的自然选择,某些与生态系统友好的物种,能够经受自然选择的考验,寻找到相应的能源与合适的环境条件。在这种情况下,生境就可以支持一个具有足够数量并能进行繁衍的种群。

生态工程的本质是对自组织功能实施管理^[10,11]。将自组织原理应用于生态水利工程时,生态工程设计与传统水工设计有本质的区别。像大坝设计是一种确定性的设计,建筑物的几何特征、材料强度都是在人的控制之中,建筑物最终可以具备人们所期望的功能。河流修复工程设计与此不同,生态工程设计是一种“指导性”的设计,或者说是辅助性设计。依靠生态系统自设计、自组织功能,可以由自然界选择合适的物种,形成合理的结构,从而实现设计。成功的生态工程经验表明,人工与自然力的贡献各占一半。在利用自设计理论时,需要注意充分利用乡土种。引进外来物种时要持慎重态度,防止生物入侵。

4.3.4 流域尺度及整体性原则 河流生态修复规划应该在流域尺度和长期的时间尺度上进行,而不是在河段或局部区域的空间尺度和短期的时间尺度上进行。

所谓“整体性”是指从生态系统结构和功能出发,掌握生态系统各个要素间的交互作用,提出修复河流生态系统的整体、综合的系统方法,而不是仅仅考虑河道水文系统的修复问题,也不仅仅是修复单一动物或修复河岸植被。

水域生态系统是一个大系统,其子系统包括生物系统、广义水文系统和工程设施系统。一条河流的广义水文系统包括从发源地直到河口的上中下游地带的地下水与地表水系统;流域中由河流串联起来的湖泊、湿地、水塘、沼泽和洪泛区。广义水文系统又与生物系统交织,形成河流生态系统。^[12]

河流生态修复的时间尺度十分重要。河流系统

的演进是一个动态过程。需要对历史资料进行收集、整理,以掌握长时间尺度的河流变化过程与生态现状的关系。河流生态修复是需要时间的。因此对于河流生态修复项目要有长期准备,需要进行长期的监测和管理。

4.3.5 反馈调整式设计原则 生态水利工程设计主要是模仿成熟的河流生态系统结构,力求最终形成一个健康、可持续的河流生态系统。在河流工程项目按照设计执行以后,就开始了一个自然生态演替的动态过程。这个过程并不一定按照设计预期的目标发展,可能出现多种可能性。

生态系统和社会系统都不是静止的,在时间与空间上常具有不确定性。除了自然系统的演替外,人类系统的变化及干扰也导致了生态系统的调整。这种不确定性使生态水利工程设计呈一种反馈调整式的设计方法。是按照“设计—执行(包括管理)—监测—评估—调整”流程以反复循环的方式进行的。在这个流程中,监测工作是基础。监测工作包括生物监测和水文观测。需要在项目初期建立完善的监测系统,进行长期观测。同时还需要建立一套河流健康的评估体系,用以评估河流生态系统的结构与功能的状况及发展趋势。

4.4 生态水利工程学的发展模式

探索和发展生态水利工程学,需要鼓励多学科的合作与融合;需要积极借鉴发达国家的经验,立足自主创新;需要在工程示范和实践的基础上提升理论,总结技术标准和规范。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 2004年水资源公报[R]. 2005,北京
- [2] 董哲仁. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报, 2003,(1):1~6
- [3] Malin Falken, Water Management and ecosystems; living with change. [A] Global Water Partnership Technical Committee Background Papers[C]. No9, 2003.6~20
- [4] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报, 2003,(11):1~7
- [5] Hart D D, Poff N L, et al. Dam removal and river restoration; special section[J]. BioScience, 2002, 52: 653~747
- [6] ASCE River Restoration Subcommittee on Urban Stream Restoration. Urban stream restoration [J]. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, July 2003, 491~493

[7] Brookes A, Shields JR F D. River Channel Restoration [M]. John Wiley & Sons, UK, 2001

[8] 董哲仁. 试论生态水利工程的设计原则[J]. 水利学报, 2004, (10): 8~14

[9] 董哲仁. 筑坝河流的生态补偿[J]. 中国工程科学, 2006, 8(1): 7~12

[10] Odum H T. Ecological engineering and self-organization [A]. Mitsch W J, Jorgensen S E, et al. Ecological Engineering: An Introduction to Ecotechnology [M]. Wiley, New York, 1989, 79~101

[11] Mitsch W J, Jorgensen S E. Ecological Engineering and Ecosystem Restoration [M]. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004, 134~137

[12] 董哲仁. 怒江水电开发的生态影响[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1591~1596

Exploring Eco-Hydraulic Engineering

Dong Zheren

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

[Abstract] The dependence on rivers of both humans and ecosystems is high, and humans should share water resources with ecosystems. Hydraulic engineering is one of the stress factors to river ecosystem. It is required to establish new rules and develop new techniques, so as to enable the consideration of the requirement of the health and sustainability of river ecosystem while carrying on hydraulic engineering to meet human demands, thus establishing an ecological friendly hydraulic engineering technical system.

[Key words] ecology; hydraulic engineering; stress; discontinuum; heterogeneity; feedback design

《中国工程科学》2007 年第 9 卷第 2 期要目预告

北京创新型城市建设中的环境保护	卞有生	水文模型模糊多目标 SCE-UA 参数优选方法研究	李向阳等
把握生物经济时代精神, 实践进步的幸福观	甘自恒	基于模糊集理论的二维线性鉴别分析新方法	郑宇杰等
现代节水农业技术发展趋势与未来研发重点	吴普特等	一种新的用于 3G 互连的盲均衡改进算法 TDE-CMA	汪 姬等
论加快我国花生产业发展策略	白选杰	光的本性	范良藻等
大型地下洞室群开挖的施工预测解析与信息化管理	汪易森等	外加电场气相法制备纳米无机氧化物	庄清平等
区带毛细管电泳法分析黑色签字墨水字迹相对形成时间	赵鹏程等	基于 GA-BP 网络的人工湿地污水净化效果研究	黄 娟等
黏聚裂纹阻抗的弯曲梁承载力	王利民等	助燃剂对木垛火燃烧特性影响研究	张小芹等
计算系统多级抗震技术研究	游 静等	小型制冷系统的稳态模拟	王 婷等
三参数区间数研究及其在决策分析中的应用	胡启洲等		