

我国生态水利研究进展

姜翠玲, 王 俊

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:阐述了生态水利的内涵和研究方向认为生态水文学、生态水力学、水利工程的生态环境效应评价等是生态水利发展的理论基础。生态水利的理念首先应反映在水利工程的规划与设计中, 强调水利工程在满足人类社会需求的同时, 需要兼顾水域生态系统的健康和可持续性; 对已建工程带来的负面影响可通过栖息地的恢复和重建、水体生态修复、生态调度和水体的连通性的改善等来解决。分析了河道和流域栖息地生态修复的措施, 总结了生态需水量的估算方法, 辨识了水系连通性的含义以及需要研究的关键问题, 最后展望了生态水利的发展趋势, 指出未来需要加强的研究方向有: 水文情势-生物响应关系的基础研究、水利工程生态效应评估的科学性与统一性等。

关键词:生态水利; 生态水文学; 生态水力学; 水利工程生态效应; 水生态修复; 生态调度; 水系连通
中图分类号:TV213; X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)05-0168-08

Recent advances of ecological water conservancy in China//JIANG Cuiling, WANG Jun(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The implications and research focuses of ecological water conservancy are stated. It is considered that eco-hydrology, ecological hydraulics, and assessment of the eco-environmental effect of water conservancy projects are the theoretical basis for the development of ecological water conservancy, that the idea of ecological water conservancy should be first reflected in the planning and design of water conservancy projects, with the health and sustainability of aquatic ecosystems taken into account, and that the negative effects of existing projects can be alleviated through the recovery and re-construction of habitats, aquatic ecology restoration, ecology regulation, water connectivity improvement, and other measures. This paper also analyzes ecological restoration measures for rivers and watershed habitats, summarizes methods of estimating ecological water demand, defines water connectivity, and identifies key research problems relating to ecological water conservancy in China, involving the fundamental research on the relationship between hydrological regime and biological responses and analysis of the scientificity and uniformity of ecological impact assessment of water conservancy projects.

Key words: ecological water conservancy; eco-hydrology; eco-hydraulics; ecological effect of water conservancy projects; aquatic ecological restoration; ecology regulation; water connectivity

随着我国社会经济的快速发展,对水资源和电力的需求日益增加。建设水利工程、确保水资源和水电能源是社会经济发展的基本条件,因此在未来较长一段时间内,发展水电仍是解决能源短缺的重要措施^[1-2]。水利水电工程建设实现了发电、灌溉、供水、航运等巨大的社会效益,但同时也永久改变了河道的水生态环境条件,影响了河流生态系统和水体的自净能力。水利水电工程的生态影响问题逐渐引起社会各界的关注和重视,成为当前水利水电事业发展面临的一个重大挑战。21 世纪的现代水利事业将从传统的工程水利发展成为兼顾环境保护和生态平衡的生态水利^[3-4]。随着人们对水利

工程建设与水体污染、生态环境恶化、生物多样性减少之间关系认识的深入^[5],21 世纪以来,衍生出了生态水利学科、生态水利专业、生态水利研究所等相关机构,对生态水利的概念、内涵、研究内容、研究的理论基础、技术方法等进行了探索。河海大学依托水文学及水资源、环境科学与工程、水利工程等优势学科,于 2002 年设置了生态水利专业,同年该专业被教育部批准为硕士学位和博士学位授权点。经过近几年的发展,该专业在水利工程的生态效应、水生态环境保护与修复、生态径流、生态水文、国际河流水资源保护等研究方向上取得了可喜的研究成果。笔者结合多年的生态水利专业建设和课题研究的经

验,在总结国内外生态水利研究现状和存在问题的基础上,论述生态水利研究的内涵、方向和发展趋势。

1 生态水利的内涵和研究内容

1.1 生态水利的内涵

生态水利是一个多学科交叉的边缘科学,是水文学、水力学、地貌学、生态学等传统学科的交叉和融合。总结国内外相关研究的基础和成果^[6],生态水利可定义为:研究水利工程建设和运行对流域生态环境的影响以及在这种影响下生态系统的演变趋势,探索在水资源开发利用过程中,采取的既能满足人类社会需求,又能兼顾水生态系统健康和良性发展的各种措施和方法。

1.2 生态水利的研究方向

生态水利研究可分为基础理论研究和实践应用两个方面,其中基础理论研究主要包括生态水文学、生态水力学、水利工程的生态效应等几个方面;而实践应用主要包括生态水利工程规划与设计、水利工程影响下的水生态系统修复措施、生态需水量和生态调度、水体连通性等4个方面。

2 生态水利的基础理论研究

2.1 生态水文学和生态水力学

近几年,对生态水文学的定义很多,从广义范围来看,生态水文学是研究水文过程与生物过程的耦合关系,研究范围包括陆地上的气候-土壤-植被之间的动态关系,河流水文情势及其变化对水生生物和河流生态系统的影响,以及流域尺度上水文过程和生态系统的相互关系^[7]。自1992年都柏林“水与环境”国际会议至今,生态水文学的内涵在不断改进和完善,其中最重要的一点在于水文要素和生物要素之间的影响和调节作用^[8]。从生态水利的角度来看,生态水文学研究的重点是河流水文情势及其变化对水生生物和生境条件的影响,即河流的水文过程及与生物之间的响应关系。

虽然人类很早就关注到了河势的演变与水动力过程对生物的影响,但有关生态水力学的概念是在1994年首届国际生态水力学学术会议后才逐渐形成。

生态水力学是研究水动力学和水生态系统之间相互作用的一门新兴交叉学科,它一方面研究水力条件的改变对水生态系统平衡及生物多样性的影响,另一方面研究水生态系统的演变对水力情势的反作用,从微观上探索水与生态系统之间的基础动力学过程^[8]。

目前生态水文和生态水力学主要研究地形、水温、流速、流量、流速场、含沙量和水位等水文和水力学要素变化对水生生物生活习性、繁殖能力、栖息地等所产生的影响。研究方法可归结为两大类,一类是以大量现场测试数据或室内水槽试验数据为基础的统计分析方法;另一类是将水文学与水力学、形态动力学、动植物栖息地特征以及物种生长进化联系起来的混合模拟方法。在我国,研究较多的是濒危物种和主要经济鱼类的繁殖和栖息环境的水文、水力学因素以及水利工程建设和运行造成的这些因素改变对生物的影响,如4大家鱼产卵时的水文水动力特性、产卵场的生态水文特征;中华鲟繁殖栖息地特征、产卵场的水动力特征、水文状况与繁殖活动关系的数学模型、葛洲坝和三峡水库建设造成的地形、水温、流速、流场等因子变化对中华鲟产卵的影响等^[9-12]。水位是湖泊和湿地生态水文过程的关键因素之一,其动态变化影响湖泊、湿地植被群落的组成、结构和生产力。水位变化与湿地植被关系的研究主要集中在水位梯度和水位波动对湿地植被的影响以及人工控湖、控河工程的生态效应研究^[13]。

总结现有研究成果,目前还缺乏水文、水力学特征与河流水生生物的生命过程响应关系的理论基础,在调水、引水等水利工程建设造成的流速、流量、水位、水盐梯度变动对上下游河岸和河口地区生物群落的影响等方面研究较少。

2.2 水利工程的生态效应

水利工程的生态效应主要指工程建设及运行对河流生态系统组成、结构和功能的影响^[14]。自20世纪70年代末,我国开始对水利工程的生态环境效应进行评估和研究,主要注重以下两个方面。

2.2.1 建设项目环境影响评价

建设项目环境影响评价是对拟建项目可能造成的环境影响(包括环境污染和生态破坏,也包括对环境的有利影响)进行分析、论证的过程,要求在调查、监测的基础上,通过建立数学模型等技术手段,预测和评价工程建设对周围环境和生态系统产生的影响,并在此基础上提出相应的防治措施和对策。水利工程建设对生态环境的影响具有滞后性和累积性等特征,部分影响要几年或几十年才表现出来。目前我国陆续开展了一些重要水利工程建设影响的后评价,对比分析水利工程建设前及运行后水生态系统的实际变化,校核环境影响评价的预测结果,评判工程项目环境影响评价方法的正确性、合理性,以及环保措施的落实程度^[15]。

2.2.2 水利工程生态环境影响的评价体系研究

水利工程生态环境影响评价体系包括评价指标

的选取、评价标准和评价方法的确定。目前水利工程生态环境效应评价指标体系的构建主要有两种模式:①基于传统的生态环境质量评价方法建立指标体系,包括层次分析法、主成分分析法、模糊评价法、灰色关联度分析法和 TOPSIS 分析法等。②基于压力-状态-响应模式建立指标体系,其理论基础是研究人与自然的相互关系,被广泛应用于环境管理、生态安全评价及决策制定等领域^[8]。

在水利工程生态环境效应评价中,指标体系的建立是关键。但由于影响水生态环境变化的因子很多,以及人们对于水利工程生态环境效应内涵的理解不同,不同学者提出了不同的评价指标、评价方法和标准,目前还没有一套合理的、科学的、具有代表性的指标体系和评价方法,评价结果多样且不具可比性,没有普遍的指导作用。因此,建立生态影响的量化评价标准具有十分重要的意义。

3 生态水利的实践应用

随着我国经济的快速发展,对水资源和水电能源需求日渐增长,建设水利工程,开发水电资源,仍然是我国较长一段时间内保障经济发展的重要举措。如何在水利工程生态环境效应研究的基础上,在发挥水电工程的经济效益的前提下,兼顾水域生态系统健康与可持续性需求,采取生态修复、生态调度等措施,减轻和缓和水利工程对水生态系统产生的负面影响,是水生态文明建设的一部分,也是生态水利面临的巨大挑战。近几年,生态水利的实践和应用主要体现在以下几个方面。

3.1 生态水利工程规划与设计

传统水利工程以建设水工建筑物为手段,目的是改造和控制河流,以满足人们防洪、发电和水资源利用等多种需求。生态水利强调水利工程在满足人类社会需求的同时,兼顾水域生态系统的健康和可持续性。对于拟建工程,在进行传统水利建设(如治河、防洪工程)的同时,兼顾河流生态修复的目标。对于已建工程,则是对被严重干扰的河流采取生态修复措施^[16]。生态水利工程规划和设计的原则就是尽量保持河道的自然蜿蜒性、水流纵向上的连续性、横向上的连通性以及岸边和底质材料的透水性等。我国闸坝的建设规划和设计主要关注工程对濒危物种和洄游性鱼类的影响,通过建设洄游通道、增殖放流、异地建立保护区或保护河段、模拟创造人工生境等措施保护关键水生生物^[2]。如葛洲坝水利枢纽中采取建设增殖放流站的措施来解决中华鲟等珍稀鱼类的保护问题。近几年,随着我国水利水电资源开发程度加大,天然渔业资源严重退化,

甚至危及国家级自然保护区内的珍稀特有鱼类,过鱼设施的研究和建设受到重视,一批过鱼设施已建成运行或在规划建设中^[17],如北京上庄水库鱼道^[18]、西藏狮泉河鱼道^[19]、珠江长滩枢纽鱼道、曹娥江大闸鱼道等。虽然《中华人民共和国水法》和《中华人民共和国渔业法》为过鱼设施的修建提供了法律依据,但目前我国过鱼设施的设计主要借鉴国外的经验,尚无规范、标准、指南可循,过鱼设施建成后的运行也缺少必要的评估、监管措施。

3.2 水利工程影响下的水生态系统修复措施

从生态水利的观点出发,水利工程建设不仅应满足人们对水的需求,同时要满足维持河流生态系统健康的需求,实现人-水-生态系统的和谐,这也是水生态文明建设所提倡的。

水库蓄水运行后,对于河流的负面影响可以划分为两类。第一是栖息地和生境特征的变化,主要指库区淹没、泥沙淤积、水库下游冲刷引起的河势变化、漫滩湿地和岸边植物带损失、河湖联通关系的变化等。水库蓄水造成上游从动水变为静水,水体自净能力下降,促进浮游植物的生长,易发生水库富营养化。下游流量减少,稀释混合能力下降,也容易造成水质的变化。第二类是水文、水力学因子影响,即流量、流速、水温和水文情势等变化,引起生态过程的变化。解决水利工程的生态影响,第一类问题主要靠栖息地的恢复和重建解决;第二类问题主要是改善现行的水库调度方式和改善水体的连通性^[20-21]。

栖息地是指某种生物或某个生态群体生存繁衍的场所或环境类型,包括其完成全部生命历程所必需的水域范围,如产卵场、索饵场、越冬场以及连接不同生活史阶段水域的洄游通道等^[22]。水生物栖息地修复技术是根据生物体的生态水力特性,营造出特定的水流环境等水生生物所需要的环境。根据水生生物活动的空间尺度,水生物栖息地可分为河道内栖息地和流域内栖息地^[23]。

3.2.1 河道内栖息地的修复

首先要明确修复目标的生活习性,技术手段有河岸带改造、浅滩-深潭结构的营造、透水基底恢复、河岸覆盖物和设置乱石堆或丁坝等模拟水生生物所偏好的活动场所等^[24]。

河岸和滩地是水陆交错地带,优越的光照、水分、温度、营养条件,有利于水生和湿生植物的生长,能拦截、过滤、净化来自流域陆地的污染物,也是水生生物觅食、产卵、育幼、嬉戏的重要栖息场所,具有丰富的生物多样性。闸坝建设造成的水位波动以及筑堤和岸坡硬质化均会影响水陆过渡带的生境条件和生态系统。目前采用的河道生态修复方法有岸坡

改造、培育水生生物等。河道岸坡采用有利于植物生长的透水材料,即选用生态护坡材料,特别注意的是首选当地天然材料,如选用天然的石材、木材等,按一定方式堆置在两岸,在缝隙中种植植被,既可增强护岸抗冲刷能力,又能为水生生物提供附着、栖息和觅食的场所^[25]。

水利工程建设可造成河道流速减小、流动性变差,水体自净能力下降,易使库区和入库口发生富营养化。植物和其上附着的微生物通过根区效应对水体中的污染物有很好的降解和净化功能,通过在滩地、浅水区、滨岸地带培育高等植物,截留、吸收水体和底泥中的营养物质,可降低氮、磷及污染物的含量。

筑坝建闸以后新形成的水库,由于淹没区土壤营养物质释放,生物有机残体分解,以及静水条件的形成,水中营养物质含量高,水生态系统脆弱,容易在库湾、坝前和河流入库口处发生水华暴发的现象^[26],在缓流区(如岸边、浅水区、入库河口)培育高等水生植物可吸收库区和淹没区土壤中的营养与污染物质,并为水生动物提供觅食、产卵场所;在库区自然放养滤食性动物(鱼类、底栖生物)可抑制浮游生物的生长,防治蓝藻暴发。

目前的河道生态修复,是流域水资源综合规划和管理的一部分,往往和河道生态景观建设结合起来,在保护河道水生态系统的基础上,满足人类亲水、用水的需求。

3.2.2 流域内栖息地恢复

流域内栖息地恢复措施有:湿地的恢复、前置库的建设、流域内生态廊道的构建、巢形建筑物和库心岛的建设等。湿地具有保护河流生物多样性、净化水质、调节水文过程等多种功能,湿地修复包括对原有湿地的复原和建造人工湿地等。前置库有截留和净化污染物、沉降泥沙、保护主体库区水环境等功能,设置前置库能有效减轻水库蓄水带来的泥沙淤积、水质变差等不利影响。湖心岛和巢形建筑物是鸟类和水禽的栖息地和避难场所,植物在湖心岛及其周边生长,吸引水生动物和鸟类至水边栖息、构建食物链、丰富生物多样性,增加景观效应。流域内生态廊道是指由河流、湖库、水塘、湿地、绿地、山区等构建的生物迁徙通道,为流域内的水生生物、鸟类等打造自由活动的空间和链接廊道。

3.3 生态需水量(或生态径流量)和生态调度

水利工程建设改变了河流的水文情势,造成河流的非连续性,甚至出现断流现象,水生生物关键生育期所需的水文脉冲、水力场等难以保障,影响生物种群的生存和繁衍。计算和保证河道生态需水量(或生态流量)是我国 20 世纪末和 21 世纪初水利

学和生态学领域学术讨论的热点问题^[20]。

生态需水量是指维系某一水域生态系统的基本生态功能所需的水资源量。确定生态需水量是生态调度的基础,也是保护河流生态系统功能的有效措施^[27]。国内外关于生态需水量计算方法很多,不同的生态需水量估算方法有其适用条件和适用范围^[28-30]。

a. 水文指数法(也称历史流量法)。水文指数法是生态需水评价中最简单的方法,依据历史水文数据确定需水量。常用的方法有 Tennant 法^[31](也称蒙大拿(Montana)法)、基本流量法、7Q10 法、德克萨斯(Texas)法、流量持续时间曲线分析法、年最小流量法和水力变化指标法(IHA)等。

b. 水力学法。水力学法是根据河道水力参数(如宽度、深度、流速和湿周等)确定生态需水量的方法,常用的有湿周法、R2Cross 法。

c. 栖息地法。栖息地法是根据指示物种所需的水力条件确定河流流量,目的是为水生生物提供一个适宜的物理生境。最常用的栖息地法是河道内流量增量法(IFIM)

d. 整体分析法。通过综合研究河道内流量、泥沙运输、河床形状与河岸带群落之间的关系确定流量的推荐值,并要求这个推荐值能够同时满足生物保护、栖息地维持、泥沙冲淤、污染控制和景观维持等整体生态功能。主要有南非的 BBM 法和澳大利亚整体评价法。

通过实施生态调度来满足下游河道的生态需水量和需水过程,达到改善生态环境的目的,因此,生态调度是减少水利工程生态负效应的重要途径之一。

传统的水库调度目标是满足防洪、发电、灌溉、航运、供水等需求,综合国内外研究现状,生态调度方法包括:河流生态需水量调度、模拟生态洪水调度、防治水污染调度、控制泥沙调度、生态因子调度、水系连通性调度等^[32-36]。

国外实施生态调度的主要目的是减轻水利工程建设对生态系统产生的影响,满足关键生物物种的生态需求,采取的措施有:在幼鱼洄游季节,增加溢洪道和大坝的下泄水量,提高幼鱼的过坝率;在产漂流性卵鱼类的繁殖季节下泄洪水,形成人造洪峰,刺激鱼类产卵;在产黏性卵鱼类的繁殖季节,通过降低水库下泄水流的日波动,保持水位稳定,增加鱼的产卵量和孵化量;调整水库的调度方式,保证最小下泄流量和下泄水流的溶解氧浓度,保护河流的鱼类和大型无脊椎动物;在河漫滩树苗的生长季节,减少水库泄水中非自然脉冲的频率和淹没时间,保护河

滨低地的阔叶林和沼泽;模拟自然河流水文情势,增加春季洪峰的流量和持续时间,保护濒危鱼类、土著鱼类;通过下泄低波动水流、栖息地营造水流等,修复大坝下游的沙洲和边滩、洪泛区和河口栖息地^[21,37-38]。

近几年,我国也开展了生态调度的理论和实践研究。由于面临巨大的防洪压力以及持续不断的电力需求,目前我国水利工程的水库调度基本上是以防洪、发电和改善航运为主,适当兼顾水产、旅游以及改善中下游水质等其他要求,一般不考虑专门的调度需求。

我国生态调度的实施主要在3个方面:一是保证河道的生态基流,这是在计算河道生态需水量的基础上提出来的,主要是在保证发电效益的基础上,使河道不断流,维持河道下游最小生态流量;二是为改善水质实施的调度措施(即调水冲污)^[39],主要为促进水体的流动、增加流量以改善水质,如引江济太、调长江水改善沿江城市河道水质等;三是为缓解水资源短缺而实施的应急供水,如塔里木河生态应急输水,三江平原、扎龙湿地应急补水等^[38]。

传统的水库调度都以经济利益最大化为目标,兼顾生态保护的水库调度势必会降低水库运行的经济效益。针对生态调度引起的利益关系调整,国外普遍通过立法、公众参与等方式加以解决。美国是由国会和政府部门出面,通过修改、制定法律和政策,明确水库运行的目标除了经济目的以外,还必须把保护生态环境列为重要目标。

生态调度在我国目前仍停留在理论探讨以及初步的尝试阶段,从实践和研究现状来看,我国水利工程生态调度主要是应对自然灾害、水体污染、泥沙淤积、湿地萎缩、生态灾难等的应急性调度,还缺乏以明确的生物物种或河道内生物栖息地质量改善为目标的生态调度实践案例,生态调度的实施主要通过行政手段,尚未建立调度的长效机制,严重地制约着生态调度的可持续性^[20-21,40]。

3.4 水体的连通性

水体的联通性目前我国是一个研究热点。当前的研究主要集中在对河湖连通性概念、内涵、连通特征及驱动因素的分析上。有关河湖连通性的概念有很多,主要有两种。一种是指河湖水系连通工程。为提高水资源配置能力,解决水资源通道被阻断,河湖萎缩,水系循环性差,水资源和水环境承载力下降等问题,国家“十二五”规划以及水利部重大水利问题均提出将河湖连通作为提高水资源配置能力的重要途径,“在保护生态前提下,加快建设一批骨干水源工程和河湖水系连通工程,提高水资源调控水

平和供水保障能力”^[41-43]。另一种是根据河流连续统的概念,将水系连通性作为评价河湖健康程度的重要属性,将水体连通性看作是河道干支流、湖泊、海洋、湿地等水系的连通情况。这一概念与水利部为解决日益严重的水问题而提出的河湖水系连通战略尚有很大的差异^[44-45]。

因此,从生态保护的角度来看,水系连通并非指河湖水系连通工程和调水工程,而是指保持河流与河流、河流与湖泊、河流与海洋之间的自然连通,不仅是水流上的连续,也包括能量流、生物流、信息流、物质流的连续。水利水电工程拦河筑坝将河流拦腰斩断,改变了河流的连续性。工程建成后,根据防洪、发电和供水等需求进行工程调度,坝下形成减水段或断流,从而破坏了河流水文-水力学的连通性。大坝的拦蓄不但阻断了河流中洄游鱼类的通道,同时也影响了上游营养物质的向下输移,增加了河流生境的破碎化程度,造成河流生态系统组成、结构和功能的改变^[46]。

自20世纪50年代以来,在长江已兴建水库4.8万座,总库容达1200亿m³;在淮河流域1000余公里的河长上先后建起了各类水库5300多座,大小水闸4300多座。闸坝建设造成的物理阻隔和水文要素的急剧变化,损害了河流自然净化能力和水生态系统的稳定性,造成水生态环境的变化。

流域闸坝建设的密度、对水系分割的程度、闸坝建设的位置、设计建设的方式等都会影响水系的连通性。为保障流域关键生物种群的繁衍,维持怎样的连通度,即流域水资源开发利用的强度的大小是当前需要深入研究和论证的。

研究自然演变与人类活动共同作用下河湖水系连通的驱动机制、变化过程和影响机理是河湖水系连通理论研究的重点和基础。如何恢复和提高河流的连通性,已经成为缓解水利水电工程对生态环境的影响,维护河流健康,保护生态环境的重要措施。

4 生态水利的发展趋势

综上所述,我国生态水利研究起步较晚,理论基础还很薄弱,生态调度、水系连通性、水生态修复等方面的研究还处于探索之中,未来需要加强的研究方向有:

a. 水文情势-生物响应关系的基础研究。研究影响水生态系统中关键生物种的生境要素,分析生境要素变化与生物生态过程的响应关系,确定关键物种对主要环境因子变化的耐受范围和阈值。如关键生物种群栖息地的地形、流场、温度、水位、流速等特征,研究水利工程建设造成的水文情势和水力学

特征的变化(流量丰枯变化、季节性洪水脉冲变化、洪水来水时间和长短、下泄水流速和流态的急剧变化及空气过饱和现象、水库低温水排放等)对鱼类和其他生物的产卵、育肥、生长、洄游等生命过程的影响。

b. 水利工程生态效应评估的科学性、统一性。大多数的水利工程生态环境影响评价仍以定性评价为主,缺乏定量的、科学的、统一的评估方式。定性分析常常在现状调查的基础上,评价水生生态系统的种类组成、结构和功能,预测水利工程建设后生物群落在组成、数量等方面的变化趋向。定量评估是权衡水利工程生态影响程度和经济效益大小的手段,制定统一的、科学的、具有代表性的指标体系、评价标准和评价方法,才能使不同水利工程生态影响的评价结果具有科学性和可比性。

c. 依据主要生物生活习性确定生态流量。虽然在我国有多种多样生态需水量和生态径流的估算方法,但这些方法基本上是引进国外的研究成果和经验。生态径流的确定涉及生物需水方面的基础理论研究,需要大量实测数据的支持,今后,需加强有关水生生物生命过程与水文情势变化响应关系的基础研究,开展现场监测和生态物理过程的模拟实验,研发基于生物需求的水文过程模拟模型,探索满足各河流独特生态系统健康发展的河道生态流量计算方法。

d. 生态调度的常规化、法制化。在我国目前还缺乏对河流生物种群生存、繁衍所需的生态条件的深入研究,也缺乏对工程影响下河流生态系统结构、功能退化的机理和过程的研究,有关生态调度还主要集中在理论、方法、模式的探索上,生态调度的实践还很少。由于水库业主明显缺乏生态保护的内在动力,必须由政府或相关责任单位出面,将保护生态环境作为水库调度的重要目标,建立权衡社会经济效益与生态效益之间关系的评估方法和指标体系,确定多目标的水库优化调度模式,并通过立法保证生态调度方案的实施,使生态调度常规化、法制化。同时,对生态调度的效果进行跟踪监测和评估,修订和完善生态调度的规则。

e. 水系连通性的理论和实践研究。水系连通性的概念和理论近年来才被引入我国,在水利水电环保领域其研究才刚刚起步,科研基础薄弱,更缺少工程实践的验证。水系连通性研究需要从全流域出发,根据流域的生物分布特点,生境特征,结合流域的实际情况,全面统筹干流上、中、下游及重要支流的关系,开展水系连通性的生态影响评价,制定水系连通性的评价指标体系和评价方法,同时在流域综

合规划和水电开发规划阶段就应考虑水系连通性的问题^[46],将水系连通性作为流域开发的前置条件。

参考文献:

- [1] 汪恕诚. 论大坝与生态[J]. 水力发电, 2004, 30(4): 1-4. (WANG Shucheng. On dams and ecology [J]. Water Power, 2004, 30(4): 1-4. (in Chinese))
- [2] 周世春. 美国哥伦比亚河流域下游鱼类保护工程、拆坝之争及思考[J]. 水电站设计, 2007, 23(3): 21-26. (ZHOU Shichun. Disputes on the dam removal and the thinking of fish protection on the downstream Columbia River Basin in the US [J]. Electromechanical Technology of Hydropower Station, 2007, 23(3): 21-26. (in Chinese))
- [3] 刘昌明. 二十一世纪中国水资源若干问题的讨论[J]. 水利水电技术, 2002, 33(1): 15-19. (LIU Changming. Discussion on a number of issues on water resources in the twenty-first century of China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(1): 15-19. (in Chinese))
- [4] 陈雷. 关于几个重大水利问题的思考: 在全国水利规划计划工作会议上的讲话[J]. 中国水利, 2010(4): 1-9. (CHEN Lei. Reflections on some major issues regarding water conservancy: a speech at the national conference on the program for water resources planning [J]. China Water Resources, 2010(4): 1-9. (in Chinese))
- [5] 董哲仁. 水利工程对生态系统的胁迫[J]. 水利水电技术, 2003(7): 1-5. (DONG Zheren. Stress of water conservancy project on the ecosystem [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003(7): 1-5. (in Chinese))
- [6] 穆宏强, 蔡长治. 工程水利、资源水利、环境水利、社会水利和生态水利的内涵及其关系[J]. 长江职工大学学报, 2002, 19(1): 1-3. (MU Hongqiang, CAI Changzhi. Connotation of engineering, resources, environmental, social a ecological water conservancy and their relationship [J]. Journal of Changjiang Vocational University, 2002, 19(1): 1-3. (in Chinese))
- [7] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展[J]. 生态学报, 2003, 3(3): 580-587. (HUANG Yilong, FU Bojie, CHEN Lixiang. Advances in eco-hydrological process research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 3(3): 580-587. (in Chinese))
- [8] 尚淑丽, 顾正华, 曹晓萌. 水利工程生态环境效应研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 16-19, 48. (SHANG Shuli, GU Zhenghua, CAO Xiaomeng. Review of research on ecological and environmental effects of water conservancy projects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 16-19, 48. (in Chinese))
- [9] 杨德国, 危起伟, 陈细华, 等. 葛洲坝下游中华鲟产卵场

- 的水文状况及其与繁殖活动的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 862-869. (YANG Deguo, WEI Qiwei, CHEN Xihua, et al. Hydrology status on the spawning ground of *Acipenser sinensis* below the Gezhouba Dam and its relation to the spawning run[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 862-869. (in Chinese))
- [10] 付小莉, 李大明, 陈永柏. 葛洲坝下游中华鲟产卵河段的流场计算与分析[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 700-704. (FU Xiaoli, LI Damei, CHEN Yongbo. Flow field calculation and analysis of *Acipenser Sinensis*'s spawning site in Gezhouba downstream[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(5): 700-704. (in Chinese))
- [11] 李建, 夏自强, 戴会超, 等. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 892-900. (LI Jian, XIA Ziqiang, DAI Huichao, et al. Effect of the Three Gorges Reservoir initial filling on downstream habitat suitability of the typical fishes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(8): 892-900. (in Chinese))
- [12] 李翀, 彭静, 廖文根. 长江中游四大家鱼发江生态水文因子分析及生态水文目标确定[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 170-176. (LI Chong, PENG Jing, LIAO Wengen. Study on the eco-hydrological factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2006, 4(3): 170-176. (in Chinese))
- [13] 姚鑫, 杨桂山, 万荣荣, 等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6): 813-821. (YAO Xin, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(6): 813-821. (in Chinese))
- [14] 中国大百科全书编写组. 百科知识[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2005.
- [15] 鲁春霞, 刘铭, 曹学章, 等. 中国水利工程的生态效应与生态调度研究[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1418-1421. (LU Chunxia, LIU Ming, CAO Xuezhang, et al. Ecological effects and ecological regulation of water conservancy projects in China[J]. *Resources Science*, 2011, 33(8): 1418-1421. (in Chinese))
- [16] 董哲仁. 试论生态水利工程的基本设计原则[J]. 水利学报, 2004(10): 1-6. (DONG Zheren. On the design principles of eco-hydraulic engineering[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(10): 1-6. (in Chinese))
- [17] 曹庆磊, 杨文俊, 周良景. 国内外过鱼设施研究综述[J]. 长江科学院院报, 2010(5): 39-43. (CAO Qinglei, YANG Wenjun, ZHOU Liangjing. Review on study of fishery facilities at home and abroad[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010(5): 39-43. (in Chinese))
- [18] 王兴勇, 郭军. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 222-228. (WANG Xingyong, GUO Jun. Brief review on research and construction of fish ways at home and abroad[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research*, 2005, 3(3): 222-228. (in Chinese))
- [19] 严莉, 陈大庆, 张信, 等. 西藏狮泉河鱼道设计初探[J]. 淡水渔业, 2005, 35(4): 31-33. (YAN Li, CHEN Daqing, ZHANG Xin, et al. Preliminary study of Tibet Shiquanhe design[J]. *Fresh Water Fisheries*, 2005, 35(4): 31-33. (in Chinese))
- [20] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 28-32. (DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong. Multi-objective ecological operation of reservoirs[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))
- [21] 王俊娜, 董哲仁, 廖文根. 美国的水库生态调度实践[J]. 水利水电技术, 2011(1): 15-20. (WANG Junna, DONG Zheren, LIAO Wengen. Practice on reservoirs operation improvement in the United States[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011(1): 15-20. (in Chinese))
- [22] 杨宇, 严忠民, 乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 125-130. (YANG Yu, YAN Zhongmin, QIAO Ye. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2007, 35(2): 125-130. (in Chinese))
- [23] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展[J]. 科技导报, 2008, 26(17): 82-86. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, SUN Dongya. State of the art in the field of river habitat assessment[J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26(17): 82-86. (in Chinese))
- [24] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 1-6. (DONG Zheren. Diversity of river morphology and diversity of bio-communities[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(11): 1-6. (in Chinese))
- [25] 董哲仁. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 1-6. (DONG Zheren. Theoretical framework for eco-hydraulics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(1): 1-6. (in Chinese))
- [26] 朱立琴, 姜翠玲. 新建水库蓄水初期富营养化发生机理研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013: 78-114.
- [27] 蔡其华. 充分考虑河流生态系统保护因素完善水库调度方式[J]. 中国水利, 2006(2): 14-17. (CAI Qihua. Taking eco-system protection into fully consideration and improving reservoir regulation process[J]. *China Water Resources*, 2006(2): 14-17. (in Chinese))
- [28] 崔瑛, 张强, 陈晓宏, 等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 465-480. (CUI Ying,

- ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4): 465-480. (in Chinese))
- [29] 康玲, 黄云燕, 杨正祥, 等. 水库生态调度模型及其应用[J]. 水利学报, 2010, 41(2): 134-141. (KANG Ling, HUANG Yunyan, YANG Zhengxiang, et al. Reservoir ecological operation model and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 134-141. (in Chinese))
- [30] 杨志峰, 张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(3): 294-301. (YANG Zhifeng, ZHANG Yuan. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(3): 294-301. (in Chinese))
- [31] ARTHINGTON A H, ZALUCKI J M. Comparative valuation of environmental flow assessment techniques: review of methods [R]. Sydney: Land and Water Resources Research and Development Corporation, 1998: 68-69.
- [32] 李嘉, 王玉蓉, 李克锋, 等. 计算河段最小生态需水的生态水力学法[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1169-1174. (LI Jia, WANG Yurong, LI Kefeng, et al. Eco-hydraulics method of calculating the lowest ecological water demand in river channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1169-1174. (in Chinese))
- [33] 郝增超, 尚松浩. 基于栖息地模拟的河道生态需水量多目标评价方法及其应用[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 557-561. (HAO Zengchao, SHANG Songhao. Multi-objective assessment method based on physical habitat simulation for calculating ecological river flow demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 557-561. (in Chinese))
- [34] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 325-332. (HU Heping, LIU Dengfeng, TIAN Fuqiang, et al. A method of ecological reservoir reoperation based-on ecological flow regime [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))
- [35] HARMAN C, STEWARDSON M. Optimizing dam release rules to meet environmental flow targets [J]. River Research and Applications, 2005(21): 113-129.
- [36] 禹雪中, 杨志峰, 廖文根. 水利工程生态与环境调度初步研究[J]. 水利水电技术, 2005, 33(11): 20-22. (YU Xuezhong, YANG Zhifeng, LIAO Wengen. A preliminary study of the ecological environment operation of water projects [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 33(11): 20-22. (in Chinese))
- [37] 陈启慧. 美国两条河流生态径流试验研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(1): 15-20. (CHEN Qihui. Test on the ecological runoff of two rivers in America [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(1): 15-20. (in Chinese))
- [38] 方子云. 中美水库水资源调度策略的研究和进展[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 1-5. (FANG Ziyun. Advances in research of strategies for reservoir water resources regulation in China and in the United States of America [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(1): 1-5. (in Chinese))
- [39] 刘威, 彭文启, 冯健, 等. 针对小江回水区水华现象的生态调度方案评估[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 79-82, 87. (LIU Wei, PENG Wenqi, FENG Jian, et al. Assessment on ecological operation scheme for algal bloom in backwater area of Xiaojiang River [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 79-82, 87. (in Chinese))
- [40] 鲁春霞, 刘铭, 曹学章. 中国水利工程的生态效应与生态调度研究[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1418-1421. (LU Chunxia, LIU Ming, CAO Xuezhong. Research on ecological effects and operation of China conservancy project [J]. Resources Science, 2011, 33(8): 1418-1421. (in Chinese))
- [41] 陈雷. 关于几个重大水利问题的思考[J]. 中国水利, 2010(4): 1-7. (CHEN Lei. Thoughts on several major programs in water conservancy [J]. China Water Resources, 2010(4): 1-7. (in Chinese))
- [42] 中共中央国务院. 中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定 [EB/OL]. (2011-01-29). <http://news.xinhuanet.com/2011-01/29/c-121039106.htm>.
- [43] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 26-31. (XIA Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment [J]. Progress in Geography, 2012, 31(1): 26-31. (in Chinese))
- [44] 李宗礼, 李原园, 王中根, 等. 河湖水系连通研究: 概念框架[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 513-522. (LI Zongli, LI Yuanyuan, WANG Zhonggen, et al. Research on interconnected river system network: conceptual framework [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 513-522. (in Chinese))
- [45] 窦明, 崔国韬, 左其亭, 等. 河湖水系连通的特征分析[J]. 中国水利, 2011(16): 17-19. (DOU Ming, CUI Guotao, ZUO Qiting, et al. Character analysis of river and lake system interconnection [J]. China Water Resources, 2011(16): 17-19. (in Chinese))
- [46] 史云鹏, 曹晓红. 水利水电工程维持河流连通性的思考[J]. 中国水能及电气化, 2011, 83(12): 20-25. (SHI Yunpeng, CAO Xiaohong. Thinking on maintaining of river connectivity in water conservancy and hydropower projects [J]. China Water Power & Electrification, 2011, 83(12): 20-25. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-05-30 编辑: 郑孝宇)