DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2019.05.008

国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述

温静雅[1],陈　昂[2],曹　娜[1],黄　茹[1],王海燕[1],王鹏远[3]

(1. 生态环境部环境工程评估中心水电环境研究院,北京　100012;
2. 中国水利水电科学研究院水电可持续发展研究中心,北京　100038;
3. 中国长江三峡集团有限公司,北京　100038)

摘要:梳理了国内外过鱼设施运行效果监测评估的发展历程,总结了运行效果评估的主要内容和监测技术,探讨了有关过鱼设施的设计、运行与管理等效果评估方法。通过对比国内外过鱼设施运行效果主要监测技术方法及应用情况,结合国内已开展的过鱼设施运行效果监测评估实践,分析了国外过鱼设施规定和相关实践对我国过鱼设施设计、运行与管理的借鉴作用,讨论了我国已建过鱼设施的运行效果和作用,进而指出过鱼设施运行效果评估研究的发展方向,提出加强过鱼设施监测技术方法研究、适时开展过鱼设施监测和运行效果评估、编制过鱼设施运行效果监测技术规范等建议。

关键词:水利水电工程;过鱼设施;鱼道;运行效果;监测评估;综述

中图分类号:S931.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1006-7647(2019)05-0049-07

A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities//WEN Jingya[1], CHEN Ang[2], CAO Na[1], HUANG Ru[1], WANG Haiyan[1], WANG Pengyuan[3] (1. *Ministry of Ecology and Environment*, *Appraisal Center for Environment and Engineering*, 100012 *Beijing*, *China*; 2. *Research Center for Sustainable Hydropower Development*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 100038 *Beijing*, *China*; 3. *China Three Gorges Corporation*, 100038 *Beijing*, *China*)

Abstract: The development history of effectiveness assessment and monitoring technologies for global fish passage facilities were reviewed. The main contents and monitoring technologies of effectiveness assessment were summarized and the design, operation and management of fish passage facilities were discussed. Monitoring technologies and applications of fish passage facilities both at home and abroad were compared, and combined with the practice on the monitoring and assessment in China, the guidance of oversea regulations and practice on the design, operation and management for China were analyzed. The operation effects of established fish passage facilities in China were discussed and the development directions for effectiveness assessment were pointed out. Finally, recommendations were proposed, including strengthening the monitoring technology research on fish passage facilities, implementing effectiveness assessment and monitoring in due time, and compiling technical specifications for the operation effect monitoring technologies.

Key words: water conservancy and hydropower projects; fish passage facility; fish ways; operation effect; monitoring and evaluation; review

河流筑坝开发对水文情势、水力学特性、水温、水质以及鱼类洄游等有一定影响,根据水利水电工程建设项目环境保护要求,需要建立减缓筑坝影响的环境保护措施,实施生态补偿,恢复河流生态系统健康[1-3]。水利水电工程建设项目环境保护措施主要包括过鱼设施设计、增殖放流、下泄生态流量、水温影响减缓措施、河流栖息地保护与修复等[4-6],但这些措施的运行效果尚需实践验证。环境保护运行效果评估也是研究与实践中面临的主要难题。

鱼类是河流生态系统相对敏感的指示性物种,鱼类种群的变化直接反映了河流生态系统状况,包括鱼道、鱼梯、升鱼机、集运鱼船等在内的过鱼设施是大坝上下游的连接通道,在鱼类洄游、促进上下游种群和基因交流等方面发挥了重要作用[7]。过鱼设施的有效运行是保护河流纵向连通性的重要手段之一,对减缓大坝阻隔影响、恢复鱼类洄游通道具有

基金项目:中国华电集团科技项目(CHDKJ15-01-30);政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0102400)
作者简介:温静雅(1988—),女,工程师,主要从事水利水电生态保护与修复研究工作。E-mail: wenjy@acee.org.cn
通信作者:陈昂(1989—),男,高级工程师,博士,主要从事生态流量、环境影响评价研究。E-mail:angteenchen@gmail.com

重要作用[8-9]。理论上,过鱼设施运行后,需要开展运行效果评估,通过实践验证有效性并改善初始设计的不足,完善过鱼功能并优化运行管理方式[10],同时,也可为其他同类过鱼设施的设计提供参考[11-12]。但在实践中,过鱼设施运行效果评估方法还存在一些不足,欧美发达国家通过出台相关规定明确了过鱼设施运行效果评估的必要性,如欧盟的水框架指令(water framework directive, WFD)和美国的水电站许可证制度(hydropower licensing)均规定了需要开展过鱼设施运行效果评估,经过多年实践,运行效果评估的指标体系仍在不断完善中[13]。我国河流水利水电开发正处于快速发展时期,随着环境保护投入加大,过鱼设施成为大多数水利水电工程建设的必要措施。目前研究重点大多关注过鱼设施设计[14],尽管开展了一些运行效果评估研究与实践,但在管理方面仍滞后于发达国家。一方面,过鱼设施的基础研究还相对薄弱;另一方面,过鱼设施建成后运行效果评估尚未形成规范性方法,过鱼设施监管主体不明确,监管机制不健全,未建立有效的运行管理模式与生态补偿机制[15]。

总体来讲,通过修建过鱼设施解决河流阻隔问题是国内外研究学者的统一认识。国内外过鱼设施运行效果监测评估基本是以管理规定为主要驱动力,进而开展一系列研究与实践。当前效果监测评估的主要难点集中在运行效果监测评估的指标与方法。因此,本文回顾梳理了国内外过鱼设施运行效果监测评估的相关研究和实践成果,总结分析过鱼设施运行效果监测评估的不足,通过对国内外运行效果监测评估方法的分析,拟提出我国进一步优化过鱼设施设计、完善运行效果监测评估的建议,可为进一步完善过鱼设施运行效果监测评估指标体系、改进我国水利水电工程过鱼设施运行效果监测评估方法、加强建设项目环境保护措施的全过程管理提供参考。

1 过鱼设施运行效果评估

1.1 国外发展概况

国外过鱼设施运行效果评估较早,可以追溯至17世纪的法国。截至20世纪60年代初期,美国和加拿大有过鱼设施200座以上,西欧各国有100座以上[16-17]。在过鱼设施运行效果评估的法律法规方面,国外规定的内容比较明确,如欧盟水框架指令规定过鱼设施运行效果评估需要明确过鱼目标。美国水电站运行许可证规定,过鱼设施运行期间应保证洄游性鱼类可以及时安全的通过水工建筑物。在过鱼设施运行效果评估的研究方面,国外也开展了较多工作,根据国外近50年的相关文献统计结果,与过鱼设施运行效果监测评估相关的论文有96篇,其中,68%的研究集中在成鱼洄游情况的讨论,以鲑、鳟鱼类的研究为主,由于运行效果不理想或监测成本过高等原因,大量过鱼设施在投入运行后并未开展运行效果监测评估[18]。在过鱼设施运行效果评估的实践方面,国外开展了较多探索,如美国为了保护大马哈鱼,在哥伦比亚河流域的大坝逐日监测了过鱼设施运行效果,建立了长达32年的数据库;2016年,哥伦比亚河13座水电站开展了过鱼设施监测,根据成鱼和幼鱼的通过情况评估了鱼类洄游期(4—10月)的运行效果,并根据结果进行过鱼设施的优化和改造。美国邦纳威尔大坝还设立了鱼道观察室,将鱼道的过鱼效果监测与公众教育、发展旅游等结合起来,取得了较好的社会和经济效益。加拿大建立了过鱼设施监测数据库,但结果显示只有9%的过鱼设施使用了合适的有效性评估方法。澳大利亚墨累-达令河流域管理委员会对“流域鱼类洄游通道恢复计划”的效果开展了大规模监测评估工作,并研发了监测评估技术和遥感监测设备。奥地利、捷克、丹麦等均对其境内的鱼类洄游通道恢复效果开展了大量的监测评估工作[19]。另外,在水电可持续性评估的实践中,也考虑将可靠地过鱼设施作为一项重要评估内容[20]。

总体来看,国外过鱼设施运行效果监测评估情况较好,在过鱼设施设计方面较为完善,也开展了大量过鱼设施监测工作,积累了长系列监测资料。但效果评估方面也存在一定不足,主要为:运行效果评价方法尚未统一[21],相关规定大多只有原则性要求,在管理层面未明确监测评估的指标体系,过鱼设施的运行、管理和效果监测评估等方面的具体要求较少。

1.2 国内发展概况

国内过鱼设施研究起步较晚,始于20世纪60年代,发展历程大致可分为3个时期:初步发展期(20世纪60—70年代)、停滞期(20世纪80—90年代)和二次发展期(2000年以后)[22]。2000年以来,随着国家对生态环境保护的重视,河流筑坝开发时修建过鱼设施再次被提上日程[23],并逐渐通过一系列的管理规定强化了过鱼设施的建设与运行管理。例如,政府主管部门通过政策文件规定了修建过鱼设施的必要性,2002年修订的《中华人民共和国水法》第27条明确规定了:河流上修建永久性拦河闸坝需要同时修建过鱼设施;2004年新修订的《中华人民共和国渔业法》提出了在鱼、虾、蟹洄游通道筑坝建闸需建造过鱼设施,作为减小对渔业资源影响的重要措施;原国家环境保护总局在印发的《水电水利建设项目河道生态用水、低温水和过鱼

设施环境影响评价技术指南(试行)》中,也进一步规范了建设项目环评时的过鱼设施设计方法[24]。

国内学者围绕过鱼设施设计、建设和运行效果监测评估也开展了大量研究与实践[25-27]。根据笔者统计,自2000年至今,国内规划、设计和运行的过鱼设施有110余座,其中以已建成投入运行的约有28座。结合早期观测资料,整理了15座已开展运行效果监测的过鱼设施情况(表1)。研究发现:少数过鱼设施通过开展短期监测,结合工程运行情况,对过鱼设施的设计、建设和运行管护进行了优化改进,而多数过鱼设施修建后运行效果不理想或者长期未运行,缺乏相关监测资料。已开展过鱼设施运行效果监测的工程存在监测指标不确定、监测技术单一、持续周期较短、各类技术方法应用和指标的意义不明确等问题。

表1 我国部分已开展运行效果监测的过鱼设施

项目名称	位置	所在流域	类型
崔家营航电枢纽工程[28]	湖北襄樊	汉江	鱼道
连江西牛航运枢纽[29]	广东英德	北江	鱼道
峡江水利枢纽[30]	江西峡江	赣江	鱼道
长洲水利枢纽[31]	广西梧州	西江	鱼道
兴隆水利枢纽工程[32]	湖北天门	汉江	鱼道
枕头坝一级水电站[33]	四川乐山	大渡河	鱼道
安谷水电站[32]	四川乐山	大渡河	鱼道+仿自然通道
藏木水电站[34]	西藏加查	雅鲁藏布江	鱼道
曹娥江大闸[35]	浙江绍兴	钱塘江	鱼道
青海湖沙柳河[36]	青海海西	沙柳河	鱼道
老龙口水利枢纽[37]	吉林珲春	珲春河	鱼道
洋塘水闸大坝[38]	湖南衡东	湘江	鱼道
裕溪闸[39]	安徽巢湖	裕溪河	鱼道
斗龙港[40]	江苏大丰	苏中里下河	鱼道
太平闸[41]	江苏扬州	淮河	鱼道

1.3 主要评估内容

过鱼设施建设的目的是恢复河流连通性,保障洄游性鱼类顺利通过水工建筑物,到达产卵繁殖地点以完成其繁殖过程。通过开展过鱼设施运行效果评估,分析管理实践中存在的问题,改进过鱼设施设计、运行管理方式,是现阶段过鱼设施运行效果评估与改进的有效途径。影响过鱼设施运行效果的因素众多,主要包括过鱼设施设计和运行管理两个方面,这也是过鱼设施运行效果监测评估需要重点考虑的内容。

a. 过鱼设施设计评估。由于过鱼设施运行效果评估需要在工程建设完成后才可以进行,因此评估重点并非设计本身,而是通过建设完成后监测过鱼效果,评估过鱼设施运行状况。主要评估内容是对过鱼设施设计的水力学参数效果进行评估,以鱼道为例,由于鱼道布置不合理可能导致诱鱼效果较差,如鱼道入口处的流量相对于河流的流量太小;未达到设计目标的池身不能适应洄游期间鱼道上下游水位的变动,造成鱼道内水流供应不足或过剩,或出现入口处落差过大的情况;水池容积不足可能引起湍流过强、气泡过多,不满足目标物种流态需求等。

b. 过鱼设施运行管理评估。过鱼设施运行管理评估的主要内容包括过鱼设施的管理维护评估和运行控制评估两个方面。建设项目环境影响评价阶段一般没有对过鱼设施管理维护的具体要求,运行阶段往往缺乏过鱼设施维护的专职人员。此外,过鱼设施设计的考虑不如主体工程详细,例如主体工程往往设置了拦污栅等专门的拦污系统。由于过鱼设施未设置拦污系统,或对拦污系统的管理不善,常导致过鱼设施堵塞,影响鱼类通过。目前,过鱼设施的运行控制基本建立了自动控制系统,需将自动控制系统运行状况纳入过鱼设施运行效果评估的指标中,避免系统或部件出现故障,包括调节流量或水池间落差的部件(自动闸门等)、保证闸门设施运行的部件(自动闸门、水槽卷扬机)等。

c. 过鱼设施运行效果评估指标。评估指标是过鱼设施运行效果评估的核心内容,主要评估内容包括过鱼效能(passage effectiveness)和过鱼效率(passage efficiency)两个方面[42-43],以判断过鱼设施运行对减缓筑坝影响的贡献,但由于流域、区域和目标种群的差异性,很多研究并没有明确过鱼效能和过鱼效率的概念。过鱼效能是一个定性的概念,目的是评估鱼类洄游期间,过鱼设施令所有目标物种通过的能力,可通过肉眼观察、截捕、视频检查等方式评估,过鱼效能评估必须首先确定具体的生物学目标。过鱼效率是一个较为定量的概念,是一定时段内过鱼设施成功通过的鱼类种群比例,用种群通过比例和洄游延迟时间评价。然而,由于过鱼设施运行效果在评估目的、对象及方法上存在认知和年代差异,上述两个指标在实际应用中常被混淆。

2 过鱼设施运行效果监测技术

过鱼设施运行效果监测时,主要记录一些生物指标和非生物指标,生物指标如物种数量、鱼类数量、鱼类长度、年龄段、质量等,非生物指标如水温、流量、水头差、水位变化等。国内外在监测指标的选择方面存在一定差异,主要取决于监测指标和监测技术的成本、应用价值或学术价值等因素。

2.1 国外主要监测技术

国外过鱼设施运行效果监测评估方法还处于研究阶段,已形成一些相对成熟的监测方法,如美国加利福尼亚州的过鱼设施监测方法指南[44]。目前,国外常用的监测技术主要包括物理挂牌标记法、声呐

法、无线电标记跟踪法等[45-46]，各种方法主要技术参数对比见表2。不同监测方法的原理及适用条件见表3。物理挂牌标记法在使用时，由于可视范围有限，主要适用于清水、限定的狭窄区域，主要依赖于水的透明度，对于潜行物种难于辨识，难以实现长期跟踪观测，可获得数据量很少；声呐法无法区分鱼类种类和鱼类个体，数据处理对人员技术背景要求高；无线电标记跟踪法与声学（超声波）跟踪系统相比，鱼类位置的方向判断性较差，深水与低洼水域条件下技术受限，标记可能会影响鱼类行为（后面3种方式也存在这一问题），无法实现鱼类资源量的监测（后两种也存在这一问题）；超声波标记跟踪法与同等无线电标记相比，使用寿命更短；通常需要船来布放水下接收系统，个别情况下，面临水声学噪音和发射问题，相比无线电标记，由于性能出色，可以使用更少的标记数量开展研究；应答器标记法的信号的探测范围小而窄，数据采集受限于天线附近（无法移动跟踪监测）；PIT射频标记跟踪法的信号的探测范围小，因此数据采集受限于天线的安装位置或需要重新捕获鱼类进行标记扫描；电阻法的信号探测范围更为狭窄，设备必须安装在现有的工事上，鱼类由于没有标记，因此无法实现个体层次的跟踪研究，而且系统对鱼类体长尺寸有要求，无法探测20 cm以下体长的鱼类。

2.2 国内主要监测技术及应用

国内鱼道监测的主要方法有人工观测、网具回捕、张网法、渔业声学监测、光学摄像机监测等（表4）。早期建设的鱼道如湖南洋塘鱼道和安徽裕溪闸鱼道的监测工作比较具体，监测指标包括种类、数量、规格、年度/不同季节/昼夜过鱼规律等。根据监测结果，洋塘鱼道每年进行5 000 h的过鱼效果监测，每年通过种类约有45种，通过数量超过580 000尾[38, 47]。近期的鱼道监测涌现了不少新的方法和监测指标，如崔家营鱼道采用了声学监测；长洲鱼道测定了鱼道水力流场、鱼道入口吸引效果、池室通过性、出口效率等指标，但这些监测中没有统一的监测方法与指标。同时，由于国内鱼道效果监测时间持续短、监测方法使用有限，所有过鱼效果监测均未评估鱼道

表2 过鱼设施运行效果监测方法技术参数对比

方法	探测范围/m	使用寿命/d	监测最小鱼类尺寸/cm	技术难度	鱼类样品数量	应用及学术价值
物理挂牌标记法	1～10	没有限制，但观测寿命受藻类等因素影响	约0.5	容易	10～100	低价值
声呐法	20～200	没有限制	1	高难度	无限制	高价值
无线电标记跟踪法	20～5 000	20～600	12	中等难度	100～1 000	低价值
超声波标记跟踪法	20～1 000	10～2 000	12	中等难度	10～100	高价值（在淡水内陆）
应答器标记法	2～30	30～300	30	高难度	10～100	低价值
PIT射频标记跟踪法	0.1～2.0	>30 000（受限于标记鱼寿命，理论上终身监测）	5	中等偏上难度	100～10 000	高价值
电阻法	<0.5	没有限制	20	中等难度	无限制	低价值

表3 过鱼设施运行效果评估监测方法技术原理及适用条件

方法	原理	适用条件	不足	适用水深/m	评估指标
物理挂牌标记法	光学视觉	清水、限定的狭窄区域，可应用于浅溪、河流和湖泊	对于潜行物种难于辨识，难以实现长期跟踪观测，可获得数据量少	<30（水下探测器）<2（浮潜）	过鱼效能
声呐法	水声学原理	声学噪音低的水体环境，或水体气泡含量少的水体、水生植物少的水体	无法区分鱼类种类和鱼类个体，数据处理技术要求高	>1.5	过鱼效能
无线电标记跟踪法	高频无线电微型标记	适用于低电导率（小于500 μS/cm）的浅水环境。通常适用于营养不良营养型溪流	对鱼类位置的方向判断性较差，深水与低洼水域条件下技术受限，标记可能会影响鱼类行为，无法实现鱼类资源量的监测	<5	过鱼效率
超声波标记跟踪法	声学（超声波）微型标记	声学噪音低的水体环境，浊度低，水体气泡含量少。通常是湖泊和低流速的江河	同无线电标记相比，使用寿命短，通常需要布设水下接收系统，存在水声学噪音和发射问题	0.5～100	过鱼效率
应答器标记法	内置电源的低频微型应答器	通常是深水，嘈杂和高度导电的水体，例港口，堰坝	信号的探测范围小而窄，数据采集受限于天线附近，无法移动跟踪监测	2～10	过鱼效能
PIT射频标记跟踪法	玻璃管微型PIT射频标记	只要鱼在射频天线探测范围内游过即可	信号探测范围小，数据采集受限于天线的安装位置，需要重新捕获鱼类进行标记扫描	<1	过鱼效率
电阻法	电阻鱼类计数	淡水，必须使鱼类游过有效检测范围	信号探测范围更为狭窄，设备必须安装在现有的工事上，无法实现个体跟踪，无法探测20cm以下体长的鱼类	0.5	过鱼效能

表 4　国内鱼道主要监测方法

项目	监测方法	监测时间	监测范围	监测频次	获得指标
洋塘[38]	人工观测+摄像机	1980 年 4 月 3 日至 6 月 18 日	两个观测窗口	持续监测	数量、种类、体长
裕溪闸[39]	人工观测	1974 年 3 月 26 日至 5 月 31 日(上游) 1974 年 4 月 7 日至 5 月 6 日(下游)	上下游两个观察室	6:00—23:00	数量、种类
长洲[48-49]	人工观测	2012 年 4 月 28—30 日	鱼道观察室	9:00—17:00	数量
	张网法	2011 年 5 月 17、21、29 日, 4 月 28、30 日,5 月 1 日	下游尾水区	整个时间段	数量、种类、 体长、体重
	声学监测	2011 年 5 月 23—26 日; 2012 年 4 月 28—30 日	鱼道入口和出口	整个时间段	数量
西牛[29]	张网法	2012 年 3—8 月 每月 22—23 日	鱼道出口	每 8 h 采样 1 次	数量、种类、 体长、体重
崔家营[28]	网具回捕	2012 年 9 月 19—26 日	鱼道内	每天 2 次, 每次 10 h	数量、种类、 体长、体重
	声学监测	2012 年 9 月 19—26 日	鱼道出口	整个时间段	数量

过鱼效率和对大坝上下游关键物种资源的补充效果。

3　结论及展望

通过国内外过鱼设施运行效果监测评估方法的回顾发现:国内外均开展了大量的研究与实践探索,一定程度上改善了河流联通性,在洄游性鱼类资源量恢复方面取得一定效果;国际上尚未建立系统科学的过鱼设施运行效果评估方法,我国大多数过鱼设施处于刚刚建设完成的初步运行阶段,在运行过程中大多还未开展过鱼设施运行效果监测和评估,需要进一步的监测才可开展有效性验证。我国鱼类种类数量多、空间跨度大、江河生态环境差异显著,长期以来,我国水生生物基础研究相对薄弱,鱼类生态习性研究和生境监测相对匮乏。随着河流开发理念的转变和国家对环保的重视不断提高,未来河流筑坝开发和管理过程中需更加合理的考虑布置过鱼设施,针对主要洄游性鱼类分布河段和鱼类洄游特性,因地制宜地开展过鱼设施设计,尤其针对高坝大库的过鱼设施建设,应更加有针对性地确定过鱼设施类型,保障鱼类洄游通道和连通性。同时,在工程建设完成后适时开展过鱼设施监测和运行效果评估,不断优化过鱼设施与工程主体运行管理方式,加强过鱼设施监测评估方法的基础研究,尽早规范我国过鱼设施运行效果监测方法,出台运行效果监测评估技术规范以指导实践工作,确保过鱼设施真正发挥实际作用。

过鱼设施作为河流连通性保持和恢复的重要措施之一,除了本身特定的多目标过鱼任务外,还要维持上下游河流的连通性和连续性,保障河流的生态完整性。因此,评价其运行效果,应首先从河流上下游鱼类种群资源的连通性和完整性,从降河洄游与溯河洄游两个方面评价对洄游性鱼类的保护效果,在目前以过鱼设施上行过鱼效果评估为主的现状下,还应加强对下行过鱼效果评估方法的研究。在保障实现过鱼设施设计目标的前提下,开展过鱼设施对保持水生生态完整性、水生生物完整性、河流连通性和连续性等多个方面的研究,全面评价过鱼设施的运行效果。根据实际运行效果评估结果,改进设计和运行管理方式,从更好地维持河流生态系统健康的角度,推进针对不同坝高和不同工程类型的过鱼设施设计研究,推进过鱼设施建设和运行。

参考文献:

[1] 廖文根,李翀,冯顺新,等. 筑坝河流的生态效应与调度补偿[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[2] 董哲仁. 筑坝河流的生态补偿[J]. 中国工程科学,2006,8(1):5-10. (DONG ZHEREN. Ecological compensations for damed rivers[J]. Engineering Science,2006,8(1):5-10. (in Chinese))

[3] 国家环境保护总局环境影响评价管理司. 水利水电开发项目生态环境保护研究与实践[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.

[4] CHEN ANG, WU MIAO, CHEN KAI QI, et al. Main issues in environmental protection research and practice of water conservancy and hydropower projects in China[J]. Water Science and Engineering,2017, 4(9):312-323.

[5] 陈昂,隋欣,廖文根,等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2016,14(6): 401-411. (CHEN ANG, SUI XIN, LIAO WENGEN, et al. Review study on instream ecological base flow in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2016,14(6): 401-411. (in Chinese))

[6] 陈昂,吴淼,沈忱,等. 河道生态基流计算方法回顾与评估框架研究[J]. 水利水电技术,2017(2): 97-105. (CHEN Ang, WU MIAO, SHEN CHEN, et al. Review of method for calculation of river ecological base-flow and study on its assessment framework[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017 (2): 97-105. (in Chinese))

[7] ÖZ M, EVREN INANAN B. The importance of fish passages in streams for natural reproduction of fish[C]// International Animal Rescue. International Animal Rescue Conference. Aksaray: International Animal Rescue Conference, 2017:75-89.
[8] 联合国粮食及农业组织. 鱼道:生物学依据、设计标准及监测[M]. 北京:中国农业出版社, 2011.
[9] 陈凯麒,葛怀凤,郭军,等. 我国过鱼设施现状分析及鱼道适宜性管理的关键问题[J]. 水生态学杂志,2013(4):1-6. (CHEN KAIQI, GE HUAIFENG, GUO JUN, et al. Study on the situation analysis of fish passages and the key issues of adaptive management in China[J]. Journal of Hydroecology,2013(4): 1-6. (in Chinese))
[10] SILVA A T, LUCAS M C, CASTRO-SANTOS T, et al. The future of fish passage science, engineering, and practice[J]. Fish and Fisheries, 2018, 19(2): 340-362.
[11] BEZ N. Global fish abundance estimation from regular sampling: the geostatistical transitive method [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59(12):1921-1931.
[12] CLAY C H. Design of fishways and other fish facilities [M]. Ottawa: The Department of Fisheries of Canada, 1961.
[13] GRIFFITHS M. 欧盟水框架指令手册[M]. 水利部国际经济技术合作交流中心,译. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
[14] MANDAL P, TU Z Y, YUAN X, et al. Importance of design factor in improvement of fishway efficiency[J]. American Journal of Environmental Protection, 2015, 4(6):344-353.
[15] TAO JIANGPING, QIAO YE, TAN XICHANG, et al. Species identification of Chinese sturgeon using acoustic descriptors and ascertaining their spatial distribution in the spawning ground of Gezhouba Dam[J]. Chinese Science Bulletin,2009,54(21): 3972-3980.
[16] 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 Hydropower Research,2005,3(3):222-228. (in Chinese))
[17] 白音包力皋,郭军,吴一红. 国外典型过鱼设施建设及其运行情况[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011,9(2):116-120. (BAIYINBAOLIGAO, GUO Jun, WU Yihong. Analysis of the design, construction and operation of typical fish passages in overseas projects[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(2): 116-120. (in Chinese))
[18] ROSCOE D W, HINCH S G. Effectiveness monitoring of fish passage facilities: historical trends, geographic patterns and future directions[J]. Fish & Fisheries, 2010, 11(1):12-33.
[19] WINFIELD I J, FLETCHER J M, JAMES J B, et al. Assessment of fish populations in still waters using hydroacoustics and survey gill netting: experiences with arctic charr (salvelinus alpinus) in the UK[J]. Fisheries Research,2009,96(1):30-38.
[20] KIBRIA G. Sustainability in hydropower and safe fish passage[R]. Berlin: Research Gate Online Publication, 2017.
[21] KIDDER J. Fish passage criteria; an historical review [C]//American Fisheries Society. Cal/Neva and Western Division Annual Meeting: Verification of Fish Design Criteria for The Built World. Nevada: American Fisheries Society,2016:1-20.
[22] 陈凯麒,常仲农,曹晓红,等. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报,2012,43(2):182-188. (CHEN KAIQI, CHANG ZHONGNAO, CAO XIAOHONG, et al. Status and prospection of fish pass construction in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(2):182-188. (in Chinese))
[23] SHI X T, KYNARD B, LIU D F, et al. Development of fish passage in China[J]. Fisheries, 2015, 40(4): 161-169.
[24] 国家环境保护总局环境影响评价管理司. 水利水电开发项目生态环境保护研究与实践[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
[25] 曹娜,钟治国,曹晓红,等. 我国鱼道建设现状及典型案例分析[J]. 水资源保护,2016,32(6):156-162. (CAO Na, ZHONG Zhiguo, CAO Xiaohong, et al. Status of fishway construction in China and typical case analysis [J]. Water Resources Protection,2016,32(6):156-162. (in Chinese))
[26] 赵彬如,戴会超,戎贵文,等. 竖缝位置对竖缝式鱼道水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2017,39(5): 69-73. (ZHAO Binru, DAI Huichao, RONG Guiwen, et al. Effect of slot position on hydraulic characteristics of vertical slot fishway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 39(5): 69-73. (in Chinese))
[27] 陈昂,温静雅,王鹏远,等. 构建河流生态流量监测系统的思考[J]. 中国水利,2018(1):7-10. (CHEN Ang, WEN Jingya, WANG Pengyuan, et al. Establishment of river ecological flow monitoring system[J]. China Water Resources,2018(1):7-10. (in Chinese))
[28] 王珂,刘绍平,段辛斌,等. 崔家营航电枢纽工程鱼道过鱼效果[J]. 农业工程学报, 2013(3): 184-189. (WANG Ke, LIU Shaoping, DUAN Xinbin, et al. Fishway effect of Cuijiaying navigation-power junction project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013(3): 184-189. (in Chinese))
[29] 李捷,李新辉,潘峰,等. 连江西牛鱼道运行效果的初步研究[J]. 水生态学杂志,2013(4):53-57. (LI Jie, LI

Xinhui, PAN Feng, et al. Preliminary study on the Operating Effect of Xiniu Fishway in Lianjiang River[J]. Journal of Hydroecology, 2013 (4): 53-57. (in Chinese))

[30] 谭细畅,黄鹤,陶江平,等. 长洲水利枢纽鱼道过鱼种群结构[J]. 应用生态学报,2015(5):1548-1552. (TAN Xichang, HUANG He, TAO Jiangping, et al. Fish population structure in the fishway of Changzhou hydro-junction[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015(5):1548-1552. (in Chinese))

[31] 熊军,石鹏. 峡江水利枢纽鱼道建成运行效果好 日均过坝1252尾鱼 打通鱼类"生命通道"[EB/OL]. [2019-04-19]. http://www.jxcn.cn/system/2018/06/01/016941045.shtml.

[32] 水利部中国科学院水工程生态所. 鱼道过鱼效果观测技术规范研究[R]. 武汉:水利部中国科学院水工程生态所, 2017.

[33] 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司. 四川省大渡河枕头坝一级水电站环境影响评价报告书[R]. 贵州:中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 2011.

[34] 陈静,郎建,周小波,等. 雅鲁藏布江藏木水电站鱼道工程设计与研究[J]. 水电站设计,2017(1):52-58. (CHEN Jing, LANG Jian, ZHOU Xiaobo, et al. Fishway design and research of Zangmu hydropower station in the Brahmaputra River[J]. Design of Hydroelectric Power Station,2017(1):52-58. (in Chinese))

[35] 王军,陈舟. 曹娥江大闸枢纽工程鱼道设计与实践[J]. 浙江水利科技,2017,45(5):51-53. (WANG Jun, CHEN Zhon. Fishway design and practice of Cao'e Jiang Sluice Project[J]. Zhejiang Hydrotechnics,2017,45(5):51-53. (in Chinese))

[36] 吴晓春,史建全. 基于生态修复的青海湖沙柳河鱼道建设与维护[J]. 农业工程学报,2014(22):130-136. (WU Xiaochun, SHI Jianquan. Construction and management of Fish Passage on Shaliu River adjacent to Qinghai Lake based on ecological restoration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014(22): 130-136. (in Chinese))

[37] 赵宪女,焦景辉. 浅析老龙口工程鱼道设计及应用[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2015(1): 82-84. (ZHAO Xiannv, JIAO Jianghui. The analysis on the design and application of fishway in Laolongkou [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition),2015(1): 82-84. (in Chinese))

[38] 徐维忠,李生武. 洋塘鱼道过鱼效果的观察[J]. 湖南水产科技, 1982 (1): 21-27. (XU Weizhong, LI Shengwu. Effectiveness observation on Yangtang Fish Passage[J]. Hunan Aquatic Science and Technology, 1982(1):21-27. (in Chinese))

[39] 裕溪闸鱼道过鱼效果及其渔业效益的探讨[J]. 淡水渔业,1975(7):19-23. (Study on passage effectiveness and fishery benefit of Yu-Xi Sluice Fish Passage [J]. Freshwater Fisheries. 1975(7):19-23. (in Chinese))

[40] 斗龙港闸鱼道[J]. 水产科技情报,1974(2):1-5. (Doulong harbor Fish Passage[J]. Fisheries Science & Technology Information,1974(2):1-5. (in Chinese))

[41] 王亚平. 用闸门控制运行方式提高鱼道过鱼效果及节约淡水试验研究[J]. 水利水运科技情报,1978(5): 64-79. (WANG Yaping. Experimental study on improving fish-channel over-fish effect and saving fresh water by using gate control operation mode[J]. Technical Information in Water Conservancy and Transportation, 1978(5): 64-79. (in Chinese))

[42] PRICE D, QUINN T, BARNARD R J. Fish passage effectiveness at road crossing culverts in the Puget Sound Region, Washington [C]//American Fisheries Society. North American Journal of Fisheries Management. Nevada: American Fisheries Society, 2010:1110-1125.

[43] NOONAN M J, GRANT J W A, JACKSON C D. A quantitative assessment of fish passage efficiency [J]. Fish & Fisheries, 2012, 13(4):450-464.

[44] ROSS TAYLOR AND ASSOCIATES. Fish Passage Monitoring Methods prepared for the California Fish Passage Forum [R]. North York: Ross Taylor and Associates, 2015.

[45] ADAMS C F, HARRIS B P, STOKESBURY K D E. Geostatistical comparison of two independent video surveys of sea scallop abundance in the Elephant Trunk Closed Area, USA[J]. Ices Journal of Marine Science, 2008, 65(6):995-1003.

[46] GEORGAKARAKOS S, KITSIOU D. Mapping abundance distribution of small pelagic species applying hydroacoustics and Co-Kriging techniques [J]. Hydrobiologia, 2008, 612(1):155-169.

[47] 郭坚,芮建良. 以洋塘水闸鱼道为例浅议我国鱼道的有关问题[J]. 水力发电,2010,36(4):8-10. (GUO Jian, RUI Jianliang. Question and suggestion on fishway construction in China:lesson learned from the operation of Yangtang Lock Fishway[J]. Water Power,2010,36(4): 8-10. (in Chinese))

[48] TAO JIANGPING, WANG XIANG, TAN XICHANG, et al. Diel pattern of fish presence at the Changzhou Fishway (Pearl River, China) during the flood season [J]. Journal of Applied Ichthyology,2015,31(3):451-458.

[49] 祁昌军,曹晓红,温静雅,等. 我国鱼道建设的实践与问题研究[J]. 环境保护,2017,45(6):47-51. (QI Changjun, CAO Xiaohong, WEN Jingya, et al. The practice and problems of the fishway construction in China [J]. Environmental Protection, 2017, 45(6):47-51. (in Chinese))

(收稿日期:2018-08-08 编辑:骆超)