

# 我国鱼类洄游通道和生境恢复技术研究现状分析

王思莹<sup>1,2</sup>, 杨文俊<sup>1</sup>, 黄明海<sup>1</sup>, 王智娟<sup>1</sup>

(1.长江科学院 水力学研究所,武汉 430010;

2.武汉理工大学 新材料力学理论与应用湖北省重点实验室,武汉 430070)

**摘 要:**我国目前处于水电开发建设的高峰时期,生态环境保护问题受到高度重视。人们对河流资源的开发利用阻隔了鱼类自由迁徙的洄游通道,大大影响了鱼类赖以生存的环境,亟需发展洄游通道和鱼类生境的恢复技术来加以保护。阐述了鱼类洄游通道和生境恢复的重要意义,总结了该类技术在我国的研究现状和发展过程,指出了我国鱼类洄游通道技术发展面临的主要问题和挑战。通过对21世纪以来(特别是最近5a)国家自然科学基金资助的相关项目及研究成果分析,指明了目前我国鱼类洄游通道和生境恢复技术的主要努力方向,包括:①各种典型鱼类的生活习性和游泳行为能力;②鱼类种群分布及生境因子影响规律;③水电开发对鱼类生境因子的影响规律;④洄游通道和生存环境恢复措施及过鱼效果验证。

**关键词:**鱼类;洄游通道;生境恢复技术;鱼道;鱼类种群分布;国家自然科学基金

**中图分类号:**TV135.9;Q958.12;X176

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-5485(2017)08-0011-07

## 1 鱼类洄游通道和生存环境恢复的意义

由于繁育、繁殖等需求,一些鱼类的不同生命周期需要在不同水域之中进行,在不同水域之间的洄游成为这些鱼类生命中不可或缺的行为习性。然而随着人们对河流资源的不断开发利用,越来越多的隔流建筑物修建于自然河流中,中断了河流生境的连续畅通,改变了上下游的水文及水动力学条件。对鱼类来说,一方面隔断了其自由迁徙的洄游通道,另一方面改变了其长年适应的生态环境,包括水文情势的变化、下泄水温降低、水体中总溶解气体的过饱和等<sup>[1]</sup>,对鱼类的生存发育造成了较大的影响。

我国目前仍处于水利水电工程建设的高峰时期,环境保护问题受到来自社会各方面的高度重视,过鱼设施已成为工程环境影响评价的主要内容之一。针对鱼类及其他生物保护对象的需求,一些重大工程通过设计和建造鱼道、过鱼闸、升鱼机等鱼类过坝建筑物,或采取集运鱼船、增殖放流、河道生态恢复等非工程手段来恢复鱼类洄游通道和生存环境,力求在取得工程综合效益的同时,也能取得良好的生态恢复效果,以利于保持生态系统的平衡和物

种多样化。

鱼类洄游通道和生境恢复技术的发展主要受2方面因素的影响:一是涉及鱼类的行为习性、生理特征的生物学,另一方面是涉及鱼道、过鱼闸、升鱼机等洄游通道恢复措施设计和建设的工程水力学。前者是鱼道等鱼类洄游通道和生境恢复技术发展的基础,后者是该技术实施运行的保障,两者应相互依存,互相支撑,缺一不可。我国在对鱼类洄游通道和生境恢复技术进行的相关研究和设计应用过程中,对鱼类等生物行为习性和生理特性的研究主要集中在对鱼类种群分布的现场调研和对鱼类游泳能力的室内试验观测2方面。由于我国流域分布宽广,鱼种类繁多、习性各异,目前掌握的观测数据和研究深度都十分有限,对不同生境下各种鱼的生理机能和行为特点未形成系统有效的认识。工程设计时则通常从建筑物的体型结构设计出发,注重水力学参数的测定,对鱼类的生活习性等考虑不够。专门研究鱼的生物科学家对工程应用背景和设计准则不甚关注,工程设计人员对鱼的特性又知之甚少,形成了两者研究之间的脱节,即“鱼”和“水”的分离研究,严重制约了我国鱼类洄游通道和生境恢复技术的发展,亟需突破。

因此,将鱼类行为学和鱼道等相关的工程水力

收稿日期:2016-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51479007,51509016);湖北省自然科学基金创新群体项目(2015CFA026);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017IVA065)

作者简介:王思莹(1983-),女,江西樟树人,高级工程师,博士,主要从事水工水力学、流体力学方面的研究,(电话)15972102044(电子信箱)sywang@whut.edu.cn。

学研究相结合,发展鱼类等水生生物洄游通道和生存环境恢复技术,对我国生态环境保护有着重要的意义,在当前水电大开发的背景下显得十分重要和紧迫。

## 2 研究现状

### 2.1 工作基础

陈凯麒等<sup>[2]</sup>通过调查收集水电站蓄水阶段竣工环保验收报告,分析得出我国水电项目所采用的鱼类保护措施主要是鱼道、增殖放流、人工鱼巢、网捕过坝等,其中鱼道是目前使用最多的鱼类洄游通道恢复手段。

我国的鱼道建设和研究大致经历了如下 3 个时期<sup>[3-4]</sup>。①初步发展期:1958 年在规划开发富春江七里垄水电站时首次提及鱼道,1960 年在兴凯湖附近首先建成新开流鱼道;至 20 世纪 80 年代,相继建设了 40 余座鱼道。②停滞期:自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至此后的 20 多年,我国在建设水利水电工程时很少修建过鱼设施,相关的技术研究工作几乎没有开展。③二次发展期:进入 21 世纪后,过鱼设施的研究和建设重新受到重视,一批过鱼设施已建成运行或在规划建设中,如西藏狮泉河鱼道<sup>[5]</sup>、吉林老龙口鱼道<sup>[6-7]</sup>、湘江土谷塘鱼道<sup>[8]</sup>、西江长洲鱼道<sup>[9]</sup>、黑龙江依兰鱼道<sup>[10-11]</sup>、汉江兴隆鱼道<sup>[12]</sup>、大渡河枕头坝一级电站鱼道<sup>[13-14]</sup>、汉江崔家营鱼道<sup>[15-16]</sup>等。

但现有鱼道设施的调研结果表明,我国大部分鱼道运行情况并不理想。因此,在充分认识和了解鱼道研究和建设发展状况的基础上,提出改进方法与措施,提高鱼道的设计水平,大幅加强过鱼有效性,对于保护河流生态、促进水利水电可持续发展具有重要意义。近 2 a,一些学者提出了仿自然式<sup>[17-18]</sup>、流速可控式<sup>[19]</sup>、改进的横隔板竖缝式<sup>[20]</sup>、梯形横断面式<sup>[21]</sup>、螺旋式<sup>[22]</sup>等新型鱼道结构型式,并对其水力特性和设计准则进行了探索性研究。

此外,减缓水利工程建设对鱼类栖息和生存环境影响的主要措施包括建立替代生境拓展鱼类的生存空间、采取分层取水减轻水库下泄低温水对下游河道中鱼类生长发育的不利影响、通过人工优化调度下泄生态流量满足下游鱼类生存的栖息环境需求等。由于以往人们生态保护意识不够强烈,这些研究的开展都发展缓慢,往往浅尝辄止,其广度和深度都比较有限。

总体来说,目前我国鱼类洄游通道和生境恢复技术的水平仍然较低,难以满足我国生态保护的需求,亟需发展。

### 2.2 面临的问题和挑战

我国对鱼类洄游通道和生境恢复研究面临的主要问题如下。①基础研究薄弱、经验不足。国外水电开发进程比我国要早,生态环境保护等方面也有非常丰富的成功经验可供借鉴。我国在这方面起步较晚,基础较薄弱,经验不足。早期我国相关研究主要从借鉴国外成功经验着手开展工作。由于地域、环境、物种等方面的差别,我国鱼道等鱼类保护措施的作用对象以及工作环境均与国外有差别,因此技术引进过程中存在不少问题,需要我国科研工作者进行专门研究。②观测资料欠缺、不系统:由于我国水电开发的规模大,涉及的地域广泛,影响的物种丰富,生态环境保护的任务重,目前针对各流域生态环境保护相关资料的调研查勘仍然存在资料欠缺、已有资料不够全面系统的问题。③重建设、轻管理的运行维护机制:由于以往社会环保意识不强、缺少经费支持等原因,我国早期的鱼类洄游通道和生境恢复工程普遍存在重建设、轻管理的现象;一些设施建成之后即成摆设,没有有效运行。④缺少运行效果的反馈:对已有的成功实例,目前也往往缺乏长期系列的监测,对设施的过鱼情况以及生态修复效果进行反馈评估。

除上述问题之外,我国水电开发存在梯级开发程度高、大坝和高坝数量众多的特点,增加了相关工程措施的建设难度,给我国鱼类保护措施的建设带来了新的挑战。

## 3 主要研究方向

鱼类洄游通道和生境恢复技术的发展与鱼类习性及其生活环境、水电工程建设及其对生态环境的影响、通道恢复设施的特性等方面息息相关。对该技术的研究也应该从这几个方面着手,且必须各方面同步发展,才能实现鱼类生态保护水平的切实提高。本节主要从我国国家自然科学基金近期资助的研究项目和获得成果出发,对我国鱼类洄游通道和生境恢复技术相关的 4 个主要研究方向的研究现状及最新进展作总结分析。

### 3.1 鱼类生活习性及游泳行为

表 1 列出了 2001 年以来,国家自然科学基金资助的有关鱼类游泳行为和生活习性等方面的研究项目信息。此外在生物学专业,有较多针对各种鱼

类本身的生理特征、成长演变、遗传机理等方面的研究项目和成果,本文未列入其中,并不作讨论。

表 1 与鱼类生活习性 & 游泳行为相关的  
国家自然科学基金项目

项目编号	项目名称	负责人	单位	开始年份
31530077	鲤科鱼类生长的生理和发育调控机理研究	殷 战	中国科学院水生生物研究所	2016
11572351	自主游动鱼群中的节能机制研究	王 亮	中国人民解放军理工大学	2016
11502053	基于综合游动力学的鲮科鱼类巡游中的肌肉力学性能研究	张 薇	福州大学	2016
31400954	斑马鱼捕食行为的状态调节及其神经机制的研究	李小泉	中国科学院上海生命科学研究院	2015
31402352	基于动态社会网络的鱼群信息传递机制及模型研究	卢焕达	浙江大学	2015
11402207	考虑肌肉收缩作用的鳗鲡式游动的力学机理研究	陈 明	西北工业大学	2015
51479007	非均匀流场中鱼类运动行为和力学特性研究	王思莹	长江科学院	2015
11372304	鱼体运动链一体化体系下柔性体的自主推进特性研究	陆夕云	中国科学技术大学	2014
11372310	鱼类捕食或逃逸时快速启动的水动力学机理研究	余永亮	中国科学院大学	2014
11102232	月牙尾推进模式水动力学特性的数值模拟研究	王 亮	中国人民解放军理工大学	2012
51173164	鱼体表粘液减阻性能-粘弹响应-超分子结构关系及应用研究	杜 森	浙江大学	2012
50905040	鲮科鱼类游动中的被动动力效应研究	石胜君	哈尔滨工业大学	2010
10832010	鱼类整体游动特性和流动控制机理研究	陆夕云	中国科学技术大学	2009
30870373	中华鲟幼鲟降河洄游行为研究	何绪刚	华中农业大学	2009
10672183	三维仿生鱼和鱼群自由游动机理研究	吴锺结	中国人民解放军理工大学	2007
10332040	鱼类机动运动的特征和机理研究	尹协振	中国科学技术大学	2004
10072063	鱼类波状游动涡流场研究	尹协振	中国科学技术大学	2001

最初出于仿生应用等方面的考虑,中国科学院、中国科学技术大学、清华大学、中国人民解放军理工大学的课题组对鱼类的游泳机理进行了研究,包括对特殊鱼类在巡游、机动等游动状态的运动和力学特性<sup>[23-24]</sup>、推进机理<sup>[25]</sup>、节能机制<sup>[26]</sup>的观测和分析<sup>[27]</sup>。

近几年,从生态保护的角度出发,一些学者开始关注不同影响因素(流速、温度、溶氧水平、盐度、鱼体重、年龄和摄食水平等)对鲫鱼<sup>[28]</sup>、裂腹鱼<sup>[29]</sup>、鲮鱼<sup>[30]</sup>、中华鲟<sup>[31]</sup>、松花江典型鱼类<sup>[32]</sup>以及草鱼<sup>[33]</sup>等各种鱼类游泳特性(运动代谢、游泳能力和生态行为等)的影响<sup>[34]</sup>。

研究结果表明鱼类的游泳速度可分为 3 类,即持续游泳速度、耐久游泳速度(临界游速)和突进游泳速度,其中与鱼道等洄游通道恢复工程设计密切相关的是后两者<sup>[35]</sup>。测得试验条件下,体长 12~20 cm 鲫的相对极限游速为(3.85±1.10) BL/s (BL 表示体长),松花江内怀头鲌相对临界游速为(3.17±0.66) BL/s,翘嘴鲈相对临界游速为(5.84±1.87) BL/s,长春鳊的相对临界游速为(4.56±1.44) BL/s,鲮的相对临界游速为(4.57±0.56) BL/s,草鱼幼鱼(体长 5~15 cm)的相对临界游速为(9.33±2.43) BL/s,体长 10~11 cm 细鳞裂腹鱼的相对临界游泳速度为(11.5±0.5) BL/s。一般来说,同一种类的鱼临界游速随体长的增加而增加,而相对临界游速随体长的增大而减小。这些基础研究,给鱼类保护技术的发展提供了支撑。

3.2 鱼类种群分布及其生境因子响应

表 2 列出了 2001 年以来,国家自然科学基金资助的有关不同流域不同种类的鱼类种群分布、生态特征及环境因子变化对其影响的相关研究项目。此外涉及遗传变化等因素的研究较多,本文不作论述。

现有研究成果多是专门针对中华鲟<sup>[36]</sup>、裂腹鱼<sup>[37]</sup>等特殊鱼种的分布格局、洄游特性及其对生境因子的响应进行的,已有研究表明环境因素中温度、水流和盐度等因素对于鱼类种群分布和洄游运动都具有特别重大的影响<sup>[38]</sup>。这些因素一般是综合作用的,在某种特定状况下,一种因素可能起主导的作用,比如流速较大时,裂腹鱼受生活环境的限制及水流的胁迫,不断地调整行为,适应较大的流速及生理条件的需要。

最近 2 a 立项的国家自然科学基金资助的相关项目显著增加,内容涉及到河口、黄河口、珠江、漓江等多个水系中的各类鱼种栖息地生境因子的时空变化及群落分布。这显示了社会对鱼类生态保护的重视及科研界作出的努力应对。

3.3 水电开发对鱼类生境因子的影响

目前改变我国鱼类生境因子最大的原因是水电开发。表 3 列出了 2001 年以来,国家自然科学基金资助的有关水电开发等对鱼类环境因子造成影响的相关研究项目。

表 2 与鱼类种群分布及其生境因子响应相关的  
国家自然科学基金项目

Table 2 Projects supported by the National Natural  
Science Foundation of China concerning fish species  
distribution and its response of habitat factors

项目编号	项目名称	负责人	单位	年份
41506151	金枪鱼围网渔业中漂流人工集鱼装置对鲢栖息地选择影响的评估	王学昉	上海海洋大学	2016
41576128	珠江口海域生态环境变化对中华白海豚及其摄食鱼类种群的影响	吴玉萍	中山大学	2016
41566003	广西涠洲岛珊瑚礁鱼类物种多样性及重要指示物种的生物学研究	吴志强	广西大学	2016
51579247	长江中游四大家鱼产卵场定位及特征研究	段辛斌	中国水产科学研究院	2016
51509239	三峡库尾江段鱼类行为节律研究	林鹏程	中国科学院水生生物研究所	2016
51509042	漓江上游区河流生境异质性与鱼类多样性的维持机制	黄亮亮	桂林理工大学	2016
31560720	赣东北信江水系淡水鱼类时空变化及其与环境因子之间的关系	程建丽	井冈山大学	2016
51509265	呼玛河冷水性鱼类栖息地影响因子调查与量化评估	胡 鹏	中国水利水电科学研究院	2016
31400359	河流鱼类群落构建机制研究——以长江上游赤水河为例	刘 飞	中国科学院水生生物研究所	2015
41406164	人工鱼礁对毗邻海域大型底栖动物群落特征的影响	徐勤增	中国科学院海洋研究所	2015
41406136	基于 DNA 条形码探讨长江口及其邻近水域鱼类浮游生物的分类与群落结构变化	张 辉	中国科学院海洋研究所	2015
31472280	特大型河口沿岸鱼类群落格局及其维持机制研究	唐文乔	上海海洋大学	2015
41406154	河口/近海区域低氧影响洄游性香鱼种群性别结构作用机制的研究	苗 亮	宁波大学	2015
41476149	闽江口鱼类群落空间格局及功能实现过程	康 斌	集美大学	2015
31400401	黄河口水域梭鱼遗传结构时间变异及其产卵场分布与现状研究	邵 燕	滨州学院	2015
31400354	珠江水系鱼类与环境的相互作用对鱼类多样性海拔梯度格局的影响	帅方敏	中国水产科学研究院	2015
50709023	山区河流鱼类生境需求的水力学指标研究	王玉蓉	四川大学	2008
50679062	长江四大家鱼产卵场的水动力学模型及其产卵繁殖的流场控制机理研究	李大明	武汉大学	2007
50479037	中华鲟的生态水力学特性及生态流场耦合模型	李大明	武汉大学	2005
30371105	长江四大家鱼发生量动态及相关因子的研究	陈大庆	长江水产研究所	2004

表 3 有关水电开发对鱼类生境因子造成影响的  
国家自然科学基金项目

Table 3 Projects supported by the National Natural  
Science Foundation of China concerning the influence of  
hydropower exploitation on the habitat factors of fishes

项目编号	项目名称	负责人	单位	年份
51579160	水电工程对长江鱼类造成的遗传效应研究——以鲢、鳙为例	廖小林	中国科学院水工程生态研究所	2016
41501574	河流拆坝对鱼类多样性的影响机制研究	丁城志	云南大学	2016
51509213	总溶解气体过饱和泥沙共同作用对长江上游特有鱼类的影响机制及规律研究	刘晓庆	西华大学	2016
31572619	洞庭湖水系梯级开发影响下的鱼类多样性及生物响应	刘良国	湖南文理学院	2016
51539006	洪水脉冲作用下鱼类对水沙条件的适应性及避藏行为试验	李荣辉	广西壮族自治区水利科学研究院	2016
51409280	弯道沙洲对“四大家鱼”鱼卵运动的影响机理研究	林俊强	中国水利水电科学研究院	2015
41401066	土地利用对溪流鱼类群落结构的累积效应与生态阈值识别研究	丁 森	华中农业大学	2015
51479127	减水河道水量变化的鱼类饵料生物量响应关系研究	李 永	四川大学	2015
51409176	金沙江下游水电站建设对圆口铜鱼种群生存力影响的遗传随机性分析	熊美华	中国科学院水工程生态研究所	2015
51409175	径流式电站坝下复杂流场中鱼类集群、运动及其驱动因子研究	王 翔	中国科学院水工程生态研究所	2015
51379134	梯级开发背景下生境大小及其分隔对鱼类物种迁徙-灭绝动态研究	唐会元	中国科学院水工程生态研究所	2014
51379135	长江葛洲坝江段鱼类时空动态对水文条件需求的量化	陶江平	中国科学院水工程生态研究所	2014
51309166	阻隔和生境萎缩对长江上游圆口铜鱼有效群体大小的生态学影响	阙延福	中国科学院水工程生态研究所	2014
51309167	基于世代遗传多样性丧失评价生境破碎对长鳍吻鲈种群遗传结构的生态学影响	邵 科	中国科学院水工程生态研究所	2014
51309168	水利工程阻隔影响下的河道洄游性鱼类景观遗传研究——以圆口铜鱼为例	赵 娜	中国科学院水工程生态研究所	2014
51309140	雅砻江裂腹鱼游泳行为研究及其通过鱼道能力评价	涂志英	三峡大学	2014
51209151	圆口铜鱼的产卵场选择及其产卵场分布受梯级电站开发的影响研究	杨 志	中国科学院水工程生态研究所	2013
51209149	三峡水库蓄水运行对中华鲟种群生存力影响的遗传随机性分析	史 方	中国科学院水工程生态研究所	2013
51109146	低温下泄水对鱼类性腺发育影响的分子机制研究	连 灏	中国科学院水工程生态研究所	2012
51109145	生境胁迫效应在圆口铜鱼遗传层面表现的分子诊断与研究	李伟涛	中国科学院水工程生态研究所	2012
51179096	水电开发对细鳞裂腹鱼繁殖生境适宜性的影响评价	刘国勇	三峡大学	2012
51079089	阻隔和生境萎缩对中华鲟繁殖群体遗传结构的生态学影响	朱 滨	中国科学院水工程生态研究所	2011
50979049	水电开发对雅砻江鱼类栖息地生境适宜度影响与评价	黄应平	三峡大学	2010

以中国科学院水工程生态研究所、三峡大学、四川大学等科研机构为代表的研究团队,以三峡、葛洲坝等不同水利工程的建设和运行为背景,选取中华鲟、裂腹鱼等珍稀鱼种为研究对象,进行一系列研究,取得了初步成果<sup>[31,39-43]</sup>。研究成果表明水电开发对鱼类生境可能产生的影响包括:水量减少,栖息地连续性和水力条件改变,水温降低,溶解气体过饱和,泥沙含量变化,产卵场、索饵场和越冬场条件变化等。对西南山区某日调节水库坝后电站下泄排水变化(非恒定流)对下游河道内齐口裂腹鱼栖息地的影响进行研究,结果表明<sup>[43]</sup>产卵场受非恒定流影响水位变幅较大,越冬场受非恒定流影响流速变幅较大,尤其是产卵场河道水位骤升骤降时将影响成鱼产卵及鱼卵的成活率。近 2 a,相关项目明显增多,科研资源的加大投入应该可以进一步促进本方向的发展。

3.4 洄游通道和生境恢复措施和效果

以上研究最终都是为了发展鱼类洄游通道和生境的恢复技术,加强生态保护措施建设,实现生态保护。针对鱼道等措施的设计和建设,我国在历年的工程实践中积累了宝贵的经验。近年来,有关单位和学者也申报获批了不少国家自然科学基金项目,对鱼道、过鱼水轮机、闸坝生态运行调度、生境恢复等相关技术进行专门的深入研究(见表 4)。

表 4 与鱼类洄游通道恢复技术相关的  
国家自然科学基金项目  
Table 4 Projects supported by the National Natural Science Foundation of China concerning measures of fish passage restoration

项目编号	项目名称	负责人	单位	年份
51509016	适合多目标种群的窄深型仿自然鱼道研究	王智娟	长江科学院	2016
51579136	鱼类下行洄游过程中应对加速流的行为学机理	石小涛	三峡大学	2016
51409151	大型低水头轴流式水轮机流道过鱼机理研究	王 熠	三峡大学	2015
51479188	水下噪音对鱼类行为与生理的影响极其引起的生境选择和修复对策研究	李若男	中国科学院生态环境研究中	2015
51409242	河道型水库下游河流鱼类生境修复的生态行为学机制	韩 瑞	中国科学院生态环境研究中	2015
51409289	梯级电站溶解气体过饱和累积效应及对鱼类影响减缓措施	曲 璐	青海大学	2015
51479065	水动力驱动的典型鱼类动态响应与闸坝运行调控机制	王 超	河海大学	2015
51409050	水位梯度驱动下鱼类群体迁移诱发体制研究	李荣辉	广西壮族自治区水利科学研究院	2015
51309140	雅砻江裂腹鱼游泳行为研究及其通过鱼道能力评价	涂志英	三峡大学	2014
51309017	突扩明渠边界层分离再附着流对鱼类游泳行为影响研究	黄明海	长江科学院	2014
31000958	三峡库区圆口铜鱼洄游准备的生理生态学机制	罗毅平	西南大学	2011

目前主要采取减缓阻隔作用和减缓适宜生境被压缩的措施来减缓水利工程建设对鱼类栖息地的不利影响。其中,减缓阻隔包括采取过鱼措施疏通鱼类洄游通道、人工捕捞亲鱼辅助其过坝到上游产卵或者通过人工增殖放流等措施帮助洄游性鱼类完成其生活史,增强非洄游性鱼类上下游的种质交流。减缓适宜生境被压缩的措施主要包括建立替代生境拓展鱼类的生存空间、采取分层取水减轻水库下泄低温水对下游河道中鱼类生长发育的不利影响、通过人工优化调度下泄生态流量满足下游鱼类生存的栖息环境需求等。

特别值得一提的是,近 10 a,针对竖缝式、池堰式、涵洞式、丹尼尔式和组合式等不同类型鱼道的水力特性,科研工作者利用数值模拟和模型试验等研究手段,针对不同进口型式、结构体型等布置条件下鱼道各部位的水流流态、流速场特征、流量与水深的关系、紊流特性及消能率等方面进行了较全面而深入的研究<sup>[44-48]</sup>,促进了鱼道等工程设计水平的发展。而水库分层取水、生态调度运行控制等近几年也成为水利科研的研究热点,社会及科研界对生态保护的重视正逐步落到实处。

4 结论与展望

本文基于我国水电大开发的背景,阐明了发展鱼类洄游通道恢复技术对生态环境保护的重要意义。回顾了我国以鱼道建设为主的鱼类洄游通道和生态恢复技术的发展过程和研究现状,指出目前我国相关技术发展存在的主要问题有:①基础研究薄弱、经验不足;②观测资料欠缺、不系统;③重建设、轻管理的运行维护机制;④缺少运行效果的反馈等。最后,通过对 21 世纪以来(特别是最近 5 a)相关研究成果的归纳总结和对我国国家自然科学基金资助相关项目的调查,指明了我国鱼道洄游通道和生境恢复技术发展的 4 个主要研究方向包括:①各种典型鱼类的生活习性和游泳行为能力;②鱼类种群分布特点及其生境因子响应规律;③水电开发对鱼类生境因子的影响;④鱼类保护措施制定及过鱼效果。

虽然我国鱼类洄游和生境恢复技术的发展面临着艰难的挑战,但我国社会和科研界已经意识到生态保护的重要性,并且已经开始投入较大的科研资源开展工作,相信不久的将来该技术必将得到大力发展,为我国的生态保护切实发挥作用。

## 参考文献:

- [1] 李洪亮,杨安邦,胡魏耿,等.闸坝对鱼类的影响及保护对策措施[J].治淮,2013,(12): 25-26.
- [2] 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].水生生态学杂志,2013,34(4): 1-6.
- [3] 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,2010,27(5): 39-43.
- [4] 刘志雄,周赤,黄明海.鱼道应用现状和研究进展[J].长江科学院院报,2010,27(4): 28-31,35.
- [5] 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.
- [6] 程玉辉,薛兴祖.吉林省老龙口水利枢纽工程鱼道设计[J].吉林水利,2010,(6): 1-4.
- [7] 公培顺,李艳双.老龙口水利枢纽工程鱼类保护工程[J].吉林水利,2011,(10): 36-39.
- [8] 孙斌,杨锡安,李俊,等.湘江土谷塘航电枢纽工程鱼道进鱼口优化方案试验研究[J].湖南交通科技,2013,39(2): 189-192.
- [9] 谭细畅,陶江平,黄道明,等.长洲水利枢纽鱼道功能的初步研究[J].水生生态学杂志,2013,34(4): 30-34.
- [10] 于广年.依兰航电枢纽竖缝式鱼道优化研究[J].水利规划与设计,2011,(5): 65-67.
- [11] 伍跃辉.依兰航电枢纽鱼道建设方案研究[J].环境科学与管理,2013,38(4): 127-131.
- [12] 汪红波,王从峰,刘德富,等.兴隆水利枢纽工程鱼道水力数值模拟[J].水利水电科技进展,2013,33(5): 47-51.
- [13] 李丹丹,高传彬,李刚,等.枕头坝一级水电站鱼道布置设计[J].人民长江,2014,45(24): 82-84.
- [14] 刘四华,陈国栋,马卫忠,等.枕头坝一级水电站鱼道休憩池的数值计算研究[J].科学与财富,2014,(6): 222-225.
- [15] 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,2013,29(3): 184-189.
- [16] 胡正福.汉江崔家营航电枢纽工程鱼道设计[J].低碳世界,2015,(10): 86-87.
- [17] 于广年,王义安.低水头枢纽仿生态鱼道水流条件研究[J].水道港口,2013,34(1): 61-65.
- [18] 王猛,岳汉生,史德亮,等.仿自然型鱼道进出口布置试验研究[J].长江科学院院报,2014,31(1): 42-46,52.
- [19] 陈嘉玉,张鹏,张万达,等.流速可控式新型生态鱼道的概念设计与数值模拟[J].水道港口,2014,35(5): 532-538.
- [20] 张立仁,乔娟,王杰,等.一种改进的横隔板竖缝式鱼道研究[J].水科学与工程学报,2014,(1): 22-25.
- [21] 李恒,宣国祥,王晓刚,等.梯形横断面鱼道内水流特性分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4): 45-49.
- [22] 王新雷,张根广,高猛,等.新型螺旋式鱼道水力特性的数值模拟[J].人民黄河,2014,36(12): 118-121.
- [23] 敬军,李晟,陆夕云,等.鲫鱼 C 型起动的运动学特性特征分析[J].实验力学,2004,19(3): 276-282.
- [24] 吴燕峰,贾来兵,尹协振.斑马鱼 S 型启动运动学研究[J].实验力学,2007,22(5): 519-526.
- [25] 李龙,尹协振.鲮科类鱼尾模型的巡游推进特性实验研究[J].实验流体力学,2008,22(1): 1-5.
- [26] 王亮,吴锤结.“槽道效应”在鱼群游动中的节能机制研究[C]//中国力学学会学术大会'2009 论文摘要集.北京:中国力学学会办公室,2009:18-23.
- [27] 陆夕云,余永亮,尹协振.飞行和游动的生物运动力学研究[J].空气动力学学报,2008,26(增): 1-5.
- [28] 袁喜,涂志英,韩京成,等.流速对鲫游泳行为和能量消耗影响的研究[J].水生生态学杂志,2011,32(4): 103-109.
- [29] 袁喜,涂志英,韩京成,等.流速对细鳞裂腹鱼游泳行为及能量消耗影响的研究[J].水生生物学报,2012,36(2): 270-275.
- [30] 蔡露,涂志英,袁喜,等.鳊幼鱼游泳能力和游泳行为的研究与评价[J].长江流域资源与环境,2012,21(增2): 89-95.
- [31] 罗佳,姜伟,陈求稳,等.葛洲坝下中华鲟产卵场食卵鱼资源量的调查和分析[J].淡水渔业,2013,43(4): 27-30.
- [32] 熊锋,王从峰,刘德富,等.松花江流域典型鱼类的游泳能力比较实验研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2014,36(4): 14-18.
- [33] 龚丽,吴一红,白音包力皋,等.草鱼幼鱼游泳能力及游泳行为试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2015,13(3): 211-216.
- [34] 蔡露,房敏,涂志英,等.与鱼类洄游相关的鱼类游泳特性研究进展[J].武汉大学学报(理学版),2013,59(4): 363-368.
- [35] 郑金秀,韩德举,胡望斌,等.与鱼道设计相关的游泳行为研究[J].水生生态学杂志,2010,3(5): 104-110.
- [36] 班璇,李大美.葛洲坝下游中华鲟产卵场的多参数生态水文学模型[J].中国农村水利水电,2007,(6): 8-12.
- [37] 王玉蓉,谭燕平.裂腹鱼自然生境水力学特征的初步分析[J].四川水利,2010,(6): 55-59.
- [38] 吴琼.鱼类的洄游及影响鱼类洄游的因素和研究方法[J].黑龙江水产,2011,(2): 41-42.
- [39] 王玉蓉,李嘉,李克锋,等.水电站减水河段鱼类生境需求的水力参数[J].水利学报,2007,38(1): 107-111.
- [40] 梅朋森,王力,韩京成,等.水电开发对雅砻江流域生态环境的影响[J].三峡大学学报(自然科学版),2009,31(2): 8-12.
- [41] 夏娟,谭燕平,王玉蓉.水电工程建设对齐口裂腹鱼栖息地的影响分析[J].四川水利,2010,30(2): 59-62.
- [42] 谭燕平,王玉蓉,李嘉,等.雅砻江锦屏大河湾减水河

段中鱼类栖息地模拟研究[J].水电能源科学,2011,29(3):40-43.

[43] 徐爽,王玉蓉,谭燕平.某日调节水电站下泄排水对下游河道内齐口裂腹鱼栖息地的影响[J].水电能源科学,2013,31(7):147-150.

[44] 闫滨,王铁良,刘桐渤.鱼道水力特性研究进展[J].长江科学院院报,2013,30(6):35-42.

[45] 高柱,戴会超,郭卓敏,等.隔板形式对竖缝式鱼道水力特性的影响研究[J].水利水电技术,2014,45(10):37-41.

[46] 高东红,刘亚坤,高梦露,等.三维鱼道水力特性及鱼体行进能力数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):103-109.

[47] 王猛,史德亮,陈辉,等.竖缝式鱼道池室结构变化对水力特性的影响分析[J].长江科学院院报,2015,32(1):79-83.

[48] 黎贤访,朱世洪,邓润兴,等.鱼道进口水力特性数值模拟研究[J].人民长江,2015,46(8):7-9.

(编辑:罗娟)

# Fish Passage and Habitat Restoration Techniques in China : State of the Art

WANG Si-ying<sup>1,2</sup>, YANG Wen-jun<sup>1</sup>, HUANG Ming-hai<sup>1</sup>, WANG Zhi-juan<sup>1</sup>

(1.Hydraulics Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;  
2.Hubei Provincial Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics,  
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** As China is now in the peak of hydropower development and construction, ecological environment protection has received great attentions. The exploitation and utilization of river resources have obstructed the migration passages of fishes, greatly affecting the environment in which fishes live. It is urgent to develop migration passages and habitat restoration techniques. This paper presents the significance of fish migration passages and habitat restoration, outlines the research status and development process of the techniques, and points out the main problems and challenges of technology development for fish passages in China. By summarizing relevant projects and research results supported by the National Natural Science Foundation of China since the 21st Century ( especially in the recent 5 years ), we present the main research directions of migration passages and habitat restoration techniques in China: 1) living habits and swimming ability of typical fishes; 2) influence of fish population distribution and habitat factors; 3) influence of hydropower development on habitat factors; 4) measures of fish passage and living habitat restoration and the verification of their effects.

**Key words:** fishes; migration passage; habitat restoration technique; fish passage; distribution of fish species; National Natural Science Foundation of China

( 上接第 10 页 )

trend, temporal-spatial distributions, matching conditions and patterns of shortage of water resources in Kunming were analyzed by calculating the Gini coefficient, per capita water resources amount, utilization ratio, and load index of water resources. Results revealed that 1) the amount of per capita water resources in Kunming was less than the average values in Yunnan or in China with obvious uneven spatial distribution in the city: the average annual per capita water resources in four main urban areas reached the minimum 299 m<sup>3</sup> per capita, while the extremes ratio was up to 10.78; 2) water resources matched well with cultivated land rather than GDP and population; 3) water resources were rich in northern counties but poor in southern counties of Kunming city, and in addition, the number of regions in water shortage increased, with the shortage level deteriorating gradually; 4) rainwater utilization, water conservation measures, interregional water transfer and industrial restructuring are effective countermeasures of water shortage in Kunming city.

**Key words:** matching of water resources; water resources shortage; Gini coefficient; distribution pattern; Kunming city