

上溯型鱼道生态设计在中国澎溪河汉丰坝的应用*

Gary E. JOHNSON¹, William S. RAINEY²

(1. 西北太平洋国家实验室,海洋科学实验室,俄勒冈 97204;

2. 国家海洋渔业服务部,温哥华,WA 98683,美国)

摘要:为中国目前新建的大坝工程修建上溯型鱼道提供了科学的生态设计理念和方法,这种生态设计的理念体现了对鱼类生物性和工程学两个学科(也可称之为生物工程学或生态水力学)原理的综合运用。鱼道是指帮助河流中鱼类上溯通过大坝等障碍的结构或装置等,人造的结构或自然的河床均可以成为鱼道的一部分而发挥作用。河流建坝带来的一个主要问题是阻断了鱼类到达大坝上游用以产卵、育幼和摄食的栖息地的通道,降低了鱼类栖息地之间的连接度。为了解决这个问题,最好的解决办法就是设计鱼道,在大坝设计的过程中如果能够加以改进增加鱼道设计,将能帮助鱼类顺利上溯减少其洄游途中不必要的阻碍。鱼道的生态设计理念主要包括 8 个步骤:1) 确定主要的重要鱼种;2) 了解这些种类的生态学特征和生活习性;3) 了解鱼类通道被阻断或将被阻断的区域环境特征;4) 建立鱼道生态设计标准,由相关管理机构统一制定,或者根据需要对具体工程区域进行单独制定;5) 提出鱼道设计的方案并确定最优的方案;6) 根据需要进行对不确定性的关键因素的调查研究,确定鱼道生态设计的标准;7) 根据鱼道生态设计标准及具体区域特点进行鱼道的设计,并由当地相关部门或机构进行评估审查;8) 根据设计方案进行鱼道的建设,并对鱼道建成后的效果进行监测、评估,总结经验。针对不同的大坝和关注鱼种介绍了一系列的鱼道的类型和设计理念。以鱼道的生态设计理念为中国开县附近澎溪河上的汉丰坝上溯型鱼道的设计提出了下一阶段的思路和工作建议。

关键词:生态设计;鱼道;汉丰坝;中国

中图分类号:Q998;X171.1

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2012)03-0016-08

筑坝行为会给河流生境和水生生态系统带来一定的改变,尤其表现在对鱼类种群数量的影响^[1-3]。水库的形成,改变了原来河流到湖泊之间的生境特点^[4]。大坝的修建阻断了洄游鱼类的溯游通道,限制了鱼类对原有产卵场、育幼场和摄食场生境的利用^[5]。同时,鱼类在向下游通过大坝或发电涡轮时往往会受到一定的机械损伤,甚至造成死亡^[6-7]。水利工程造成的原有水力条件的改变对鱼类上溯或下溯过程都带来不利影响,造成种群数量的下降和种群结构的变化^[8]。实际上,一般大型水利工程提案时,往往只注重长远的社会经济收益,而对于鱼类种群数量的影响不重视。值得关注的是,不管大坝是否已经建成,要注意维持工程区上、下游生态系统稳定的功能,对于维持可持续的渔业资源、改善周边环境、减少水源污染等非常重要。

目前在中国和整个东亚地区都非常重视水电能源的开发利用^[3],很多用于防洪、灌溉、河道整治等不同用途的大坝正在建设中。不管出于什么用途或功能而修建的大坝,都将在一定程度上影响鱼类的种群数量^[3]。比如中国在 1973 年修建的丹江口水利工程,由于没有设计修建鱼道设施,对大坝上、下游的鱼类种群或多或少带来了一定的不良影响^[4]。在最新的水利工程设计过程中都融入了对环境要素影响的考虑^[3,9],在大坝设计过程之初就要注重对鱼道结构和设施的同步设计,即便是大坝已经建成,若没有一同建造鱼道设施,也建议对大坝工程进行改造,补充修建鱼道系统^[10]。

在大坝阻断鱼类洄游通道的情况下最主要的解决办法就是修建鱼道^[11-12]。这里提到的鱼道是指帮助洄游鱼类通过大坝等障碍的结构或其他设施。

* 收稿日期:2012-01-23 网络出版时间:2012-5-26 12:13

资助项目:美国博纳维尔电力管理局资助(No. 26934);美国陆军工程部队资助(No. AGRW66KZ80031101)

作者简介:Gary E. JOHNSON,男,五级工程师,科学家,硕士,研究方向为生物海洋学。

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.16_004.html

鱼道设计的目标是为了帮助鱼类安全顺利地通过大坝等障碍进行上溯,减少不必要的阻碍。尽管鱼道的设计永远不能还原没有大坝修建时的状况,鱼道的效果也并不一定能得到保证,但一般能够减小大坝修建对鱼类的影响^[13-14]。鱼道的生态设计综合了鱼类生态学、生物学和工程学的原理,也可称为生物工程学或生态水力学。鱼道一般为人为设计建造,但有些时候自然河床也可被用作鱼道的一部分^[15]。在美国^[16]、加拿大^[17]和西欧^[18]已经开展了30多年的鱼道设计研究工作,其中鱼道主要保护对象是鲑鱼。在拉丁美洲^[13,19-20]和澳大利亚^[21]也进行了很多鱼道相关的重要工作。目前在世界范围内已经有很多鱼道方面的综述研究^[12,22],一致的观点认为在今后鱼道的设计和建造过程中将更多的利用生态设计的理念。

由于洄游鱼类具有不同的洄游习性,仅仅设计或建造完善的上溯型鱼道而忽视下溯型鱼道的建设和考虑,并不能真正地缓解大坝建造对鱼类种群下降带来的不利影响^[5,13]。有一些研究总结了大坝建设对鱼类降河洄游带来的不利影响^[23],同时也提出了一些可能的解决方案^[24]。本文主要阐述上溯型鱼道的设计过程,并不包括下溯型鱼道的设计,但希望在实际应用中应根据实际情况考虑大坝给营降河洄游的鱼类带来的不利影响,并能采取措施减少这种不利影响。

本文的目的在于阐述鱼道生态设计的过程和方法,介绍不同类型的鱼道实例,为中国开县附近的澎溪河上汉丰坝下一步进行鱼道的设计和建造提供一些生态设计上的建议。

1 生态设计理念

生态设计的理念是目前世界范围内进行鱼道设计最主流的设计理念。这里提到的生态设计是指根据对象鱼类的生态习性,综合运用工程学的原理进行鱼道的生态设计。本文提到的生态设计理念和方法来自于美国西北太平洋地区的鱼道设计和建造的经验总结^[11,25-26]。上溯型鱼道的生态设计理念主要包括如图1所示的8个步骤。

第一,确定主要的重要鱼种。重要性可以根据物种在当地文化、经济、娱乐、环境以及其他当地关心的方面来确定,既可以是单一的物种,也可以是多个物种,在确定的重要种较多的情况下,一般情况相对单一物种比较复杂,需要考虑的问题也更多一些。

不同的物种之间很可能在生活史、游泳能力等生态特点或习性上有差异。鱼道设计一般要满足不同游泳能力的物种均能通过洄游障碍,单一的设计并不一定适用于多个物种。实际上,如果不同游泳能力的物种都同等的非常重要,有可能需要分别设计相应的鱼道确保这些鱼种均能通过障碍。主要的重要种的确定影响整个鱼道生态设计的过程。

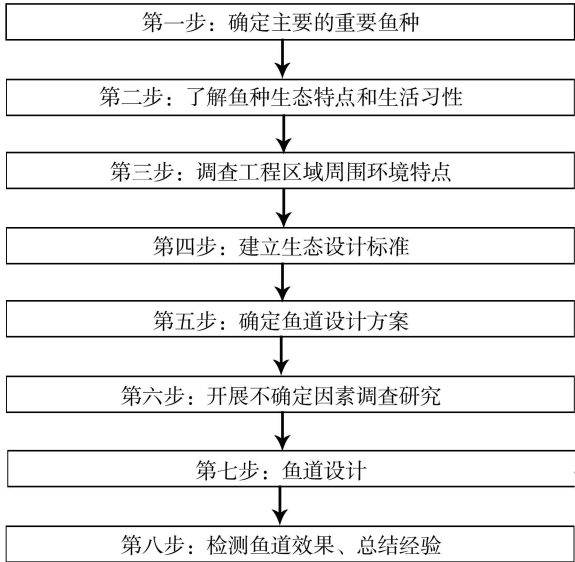


图1 鱼道生态设计理念的8个步骤
Fig. 1 Eight-Step Approach for Eco-Design of a Fishway

第二,了解重要种的生态特点和生活习性。在鱼道的生态设计过程中,需要研究大量的文献。主要的生态特点包括该物种的种群大小和地理分布,繁殖和生活史方式(生活史阶段、每个阶段的大小范围、栖息地喜好、种群的时空分布等),摄食,竞争者与天敌情况等。对于营溯河洄游习性的鱼类,需要考虑的生活习性包括:溯河洄游的原因,洄游特点(季节、昼夜),游泳能力,感知能力,生理状态等。这些特点决定着物种在鱼道建成后形成的水文水力等条件的响应状态,比如相同的水流速度对不同的鱼种来讲,有的可能是吸引流,有的则可能造成流速障碍。水流速度和鱼种的游泳能力同样也很重要。高水下洄游的鱼种鱼道设计与低水下洄游的鱼种的鱼道设计是不同的。了解鱼道设计针对鱼种的生态特点和生活习性是整个鱼道生态设计工程中的焦点。

第三,调查工程区域周边的环境特点,包括景观特点、上溯通道被阻断的水域特点等。工程区域是指大坝或其他水利工程修建的区域。景观特点是指工程位点上下游几千米内的特点。了解工程区域周

围的景观特点和流域特点对鱼道的设计非常重要。例如流域内的水文特点对了解季节性河流在工程位点上的河水径流量非常重要。为确定工程区的水流状况,还需要用了解工程位点周围局部区域的水文特点。受影响鱼种对于水文环境非常敏感,因此在进行工程区选址的时候要尤其关注水文状况的调查,有时还需要用物理或水文建模的方法来帮助我们进行鱼道工程的选址,选址如果不合适,鱼道的过鱼效果会受影响。一般来讲,环境特点包括:地理或物理环境特点,地势地貌特点(高程、水覆盖面),河流径流量等水文特点,水质(水温、浑浊度、酸碱度等),植被群落及鱼类群落情况等。

第四,建立鱼道生态设计标准。这套标准可由相关的管理机构统一制定,也可根据实际情况对具体的工程单独制定。例如,美国国家海洋渔业局制定的标准^[10]能够作为一个模版适用于相应的鱼种(表1)。生态设计标准中包括统一设计参数以及其他适用的标准值,这需要投资者与生物力学专家共同完成和制定(见第七步中多学科专家工作组的相关介绍)。物理标度或流体力学计算等水力建模能够帮助定义设计标准。生态设计中的参数并不一定固定不变,比如鱼道入口处不同的位置可能需要设置不同的吸引流。若选址不合适,即便吸引流足够大,可能也不如在合适的位置以相对较小的水流下的过鱼效果好。生态设计标准的建立或更新都需要对一些不确定性的因素进行阐释或假设。

第五,选择最佳的鱼道设计方案。根据确定的重要种,物种的生态特点和习性以及工程位点周围的环境特点来确定最佳的鱼道设计方案。通过比较评估不同方案的优缺点来选择一个最佳的方案。这一过程需要多学科技术专家组(见第七步)共同完成。

第六,开展关键不确定性因素的调查研究,不断补充完善鱼道生态设计理念。已经知道有些物种可以通过鱼道进行溯游活动,对它们生活习性的了解相对于那些生活习性和鱼道适应性不明确的物种来讲相对更容易些。对于那些生活习性了解尚不够清楚的物种,需要更多的研究并且在对其鱼道的设计中要能及时地进行修改,比如吸引流应该能够灵活地增加以适应鱼种的游泳特点。对以下几点应予以研究了解,比如鱼种的游泳能力,对吸引流的反应,跳跃能力,对不同的鱼道类型的偏好(堰坝式鱼道或者水下孔式鱼道),以及对声、光的反应^[27]。完成

关键性不确定因素的确定后,生物工程学家与投资者共同评审并补充完善鱼道的生态设计理念,继而进行鱼道下一步的设计工作。

第七,依据生态设计理念根据工程位点周边环境进行鱼道设计。为了达到最好的效果,在这一步需要组织一个多学科专家工作组,包括工程师、生物学家、预算与经费管理者等。成立这个专家组的目的是为了综合考虑生物学、结构学和水文方面的不同技术,以实现鱼道设计的成功和最好的过鱼效果。鱼道设计的过程包括鱼道的选址、鱼道功能协调、鱼道设计草图和初步报告。这一部分占整个鱼道设计将近 25% 的比例,鱼道的大小、选址等都应该已经在草图中表现。初步的设计报告应包含大坝的背景信息、鱼类资源情况、设计理念和方法、功能特点、鱼道的预期效果以及其他鱼道设计需要的工程位点信息。在这一步还应完成以下内容:确定目标鱼种、水文、尾水情况、水深情况、地势地貌、鱼道特征的描述以及成本的估算。投资者与管理者随后将重新审查报告,管理者要保证工程量应该在预算范围内。初步设计的完成是进行细节设计前关键的一步。之后,机械、结构、电力等方面的专家将继续完成鱼道的设计。鱼道设计阶段最主要的是鱼道设计的设计图(图2)和相关说明,因为只有凭设计图,建筑公司才能完成鱼道的修建。

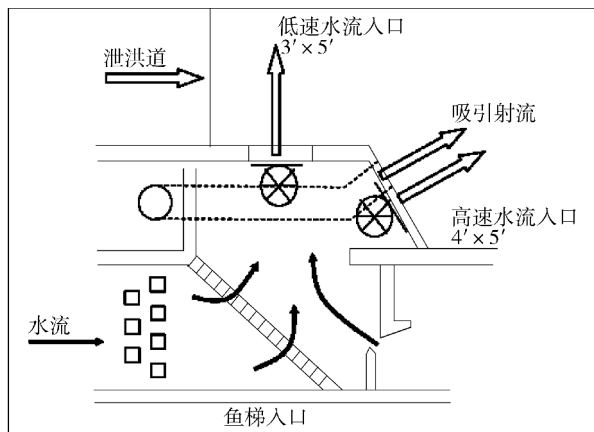


图2 鱼道入口、槽、吸引流等工程原理图

Fig. 2 Example of an Engineering Schematic Showing Fishway (Ladder) Entrances, Pools, and Location of Attraction Flows. (Drawing obtained from US Fish and Wildlife Service, Fisheries Academy, Leetown, West Virginia.)

第八,修建鱼道,并在建成后监测评估其效果,总结经验。在设计过程中,技术专家组应在鱼道的设计过程中设定一些运行标准,以供鱼道建成后对相关运行效果进行评测。根据适应性管理过程,若

运行效果不满意,还可根据事先的预案对鱼道的设计和施工进行修改。在鱼道生态设计中没有先例或预案的情况下,有效的监测评估是保证鱼道过鱼效果成功的主要办法。对于那些生物习性了解尚不够清楚的鱼种来说,只有凭借鱼道建成后的实际监测才可评判鱼道对该鱼种的适用性如何。具体监测的参数应根据目标鱼种和工程具体情况来选择,但一

般可以包括鱼种靠近和进入鱼道入口的效率,鱼梯通过率,鱼种在鱼梯中通过的范围,通过时间,存活率,大坝的运行效果以及对周边的环境影响。通过鱼类的反应来评判鱼道是否成功,并且在适应性管理方法上不断地总结经验,以不断提高现有的或者以后的鱼道运行效果^[28]。

表 1 鲑鱼鱼道设计参数 (NMFS, 2011)
Tab. 1 Selected Fishway Design Parameters from Anadromous Salmonid

参数	定义	说明
选址	鱼道入口应选择在鱼类易于识别并被水流吸引进入的地方。	在大坝已经建成的情况下,可以寻找鱼类停留的位置以及所能承受的水流范围,然后将鱼道的入口设置在这样的区域。如果大坝还没有建成,应利用水文建模的方法确保鱼道入口处的水文状况与其上游栖息地处的水文状况相适应。
吸引流	鱼道入口处吸引流应占整个鱼道流量的 5% ~ 10%, 并且一般情况下入口处吸引流越大,鱼道提供的上溯效果越好。	鱼道中吸引流这一部分往往占据很大的生态足迹,并且成本也比较高。往往采用鱼类跟踪研究选择最佳的鱼道入口处。如果鱼种能够在入口处很好地聚集并进入,此处的吸引流允许尽量减小。
跌水	鱼道入口处的跌水应控制在 0.3 ~ 0.46 m 之间,并取决于鱼种。	这是假设了鱼种具有较强的游泳能力的前提下进行的,跌水的大小必须与目标鱼种的游泳能力相适应。对游泳能力较弱的鱼种需要在水槽之间堰坝处减小跌水,水槽越多,鱼道占据的生态足迹也越大。
尺寸规格	鱼道的宽度应不低于 1.2m, 深度应不低于 1.8m。	鱼道的尺寸规格应由具体实际情况、鱼种形态以及进入鱼道的生物量来决定。
水流状态	水流进入或通过鱼道内部时的水流形式。	目前的鱼道形式主要有 3 种:水下堰坝式、狭槽式和射孔式。对中小型鱼道来讲,狭槽式的鱼道往往最佳,能够减少人力的投入。

2 鱼道类型

为帮助鱼类上溯通过大坝等河流中的障碍,已经有很多类型的鱼道被设计出来。鱼道的设计是基于主要的重要种的生态特点,工程位点周边环境,以及其他生态设计理念中提到的来最终确定的。目前比较流行的鱼道类型有以下几种(见彩色插图 页图 3)。

1) 槽型:即堰坝—孔式鱼道,如经典的“Ice Harbor”鱼道(见彩插图 VI 页图 3a)和垂直射流式鱼道(见彩插图 VI 页图 3b)。在这种鱼道中,鱼类通过鱼道下部的孔进行溯游,并非是越过堰坝。槽型鱼道最早是 1930 年代在哥伦比亚河邦威大坝使用,这种鱼道的一个典型特点是水流的能量在每个槽中得到消减。

2) 隔板狭沟型:最典型的是丹尼尔鱼道(见彩色插图 VI 页图 3c)和阿拉斯 Steeppass 鱼道(见彩色

插图 VI 页图 3d)。这种鱼道一般用于鱼道梯度或高程比较大的情况。

3) 槽—沟混合型:Full Width Sill 鱼道就是这种混合型(见彩色插图 VI 页图 3e)。这种鱼道在径流量比较小的情况下以槽式鱼道运行,在径流量比较大时以隔板狭沟型运行。同时这种鱼道还在不断地进行改进。

4) 类自然鱼道:通过添置一些简单的人为结构营造出一种接近自然状态的鱼道(见彩色插图 页图 3f)。这种类自然的鱼道在很多地方得到了运用,比如在美国的中西部、加拿大、南美、欧洲等,一般适用于游泳能力较弱的鱼种。

5) 石坡式鱼道:石坡式鱼道通过铺设砾石形成 5% ~ 10% 的石坡构建上溯型鱼道。大的卵石围成槽型供洄游鱼类停留。石坡式鱼道适用于水头较低的情况,并且与类自然鱼道比较类似。

6) 升鱼机:利用鱼箱收集鱼类,然后升至大坝

上游水位然后进行放流的过程,例如宾夕法尼亚州的沙士克哈纳河上的鲱鱼升鱼机。

7) 集鱼及运输方法:在大坝下游通过集鱼装置吸引捕获需要上溯洄游的鱼类,利用卡车鱼箱等将鱼运输至大坝上游然后进行放流。这种方法一般用于水头比较高的水坝(>50 m),因为其他类型的鱼道可能由于大坝高度问题并不适用于这种情况。

3 汉丰坝修建鱼道的可能性

汉丰坝(见彩色插图 V 页图 4、5)位于中国重庆市开县的澎溪河上,在三峡水库的蓄水期,澎溪河汉丰坝下游部分将全部被水淹没,如图 6 所示。三峡水库的水平面一般高于平均海平面的 145 ~ 175 m 之间,汉丰坝水库的水平面则为 172 ~ 175 m。三峡水库的蓄水期为 11 月—12 月,在这段时间,鱼类可以借水流越过坝顶洄游到上游,但是在全年中的其他 7 ~ 8 个月份里,三峡水库水位低于 172 m,鱼类是不能够洄游到上游的。这里选择汉丰坝作为一个例子,来探讨当地修建鱼道的可能性。

汉丰坝建成于 2007—2010 年,修建该坝的目的是为了消除该坝上游地区由于三峡水库水位消落带波动对该地区的影响。汉丰坝通过汉丰湖的蓄水作用,发挥着调节水位、防洪护地的作用。汉丰湖周长近 36.4 km,面积约 14.8 km²,容量约 5.6×10⁷ m³。目前已经成为开县当地开展垂钓、旅游等娱乐活动的新场所,并且提供着相应的湿地服务功能。

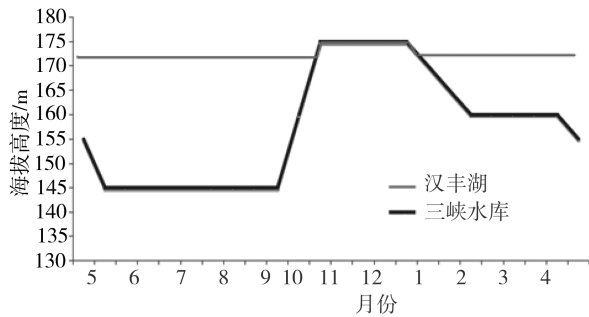


图 6 三峡水库与汉丰湖水位年度变化(王强提供)

Fig. 6 Seasonal Elevations for the Three Gorges Dam Reservoir and the Hanfeng Dam Reservoir (figure provided by Dr. Wang Qiang)

汉丰坝并没有修建鱼道,最近当地相关部门意识到修建鱼道的必要性和价值,提出要在汉丰坝修建鱼道。建议根据图 1 提供的鱼道生态设计理念开始对汉丰坝进行鱼道设计工作。

1) 识别当地主要的重要种。(见附录:汉丰湖

及澎溪河鱼类名录,其中标注了“重庆市受保护鱼类”和“国家二级保护野生动物”)

2) 了解目标鱼种的生态特点和生活习性。

3) 调查汉丰坝周边的环境特点,包括景观、水文、地势地貌、大坝运行情况等。

4) 建立鱼道最佳方案的生态设计标准

5) 基于目标鱼种的洄游习性、坝下水文特征及建设特征,选择 1 ~ 2 最合适的鱼道修建位置。

6) 确定可选的鱼道类型,分析相应的优劣,选择最佳的鱼道类型。

根据见彩色插图 V 页图 4、5 已经对汉丰坝有了一个初步的了解,可以看到在泄洪时坝的下游形成了一个“C”字型的尾水区。这是泄洪道开放的情况下产生的,了解清楚不同泄洪状态下坝下的水文、水流状态非常重要,应尽量使得鱼道入口处的尾水水流状况接近于坝上水流状态,方能发挥最好的集鱼、进鱼效果。在这方面仍有很多工作要做。

关于鱼道的一个重要说明是一条鱼道未必能够对所有的鱼类有效,因为有些鱼类的游泳能力要比目标鱼种的游泳能力差,对于这些鱼种,应根据鱼道生态设计理念为其设计相应的适合他们的鱼道。根据鱼道的生态设计理念,综合考虑目标鱼种、鱼种的生态特点及习性、工程位点周边环境(大坝结构、水文状况、局部地区水文状况)等因素设计出的上溯型鱼道理应获得成功。

致谢:对袁兴中教授(重庆大学)、王强博士(重庆大学)、李若溪编审(重庆师范大学)孟海星博士(华东师范大学)提供的帮助表示诚挚感谢。对汉丰坝开展鱼道生态设计研究是由袁兴中教授提出的。同时感谢陆健健教授(华东师范大学)及袁兴中教授的邀请和支持,得以参加 2011 年 10 月在中国重庆市举办的三峡库区消落带湿地保护和生态友好型利用国际研讨会。

参考文献:

[1] Agostinho A A, Gomes L C, Verissimo S, et al. Flood regime, dam regulation and fish in the Upper Parana? River: effects on assemblage attributes, reproduction and recruitment [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2004, 14: 11-19.

[2] Čada G F, Sale M J. Status of Fish Passage Facilities at Nonfederal Hydropower Projects [J]. Fisheries, 1993, 18: 4-12.

[3] Clay C H. Design of Fishways and Other Fish Facilities [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995.

- [4] Coutant C C, Whitney R R. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2000, 129: 351-380.
- [5] Ead S A, Katopodis C, Sikora G J, et al. Flow regimes and structure in pool and weir fishways[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004, 3: 379-390.
- [6] Ferguson J, Healey M, Dugan P, et al. Potential effects of dams on migratory fish in the Mekong River: Lessons from salmon in the Fraser and Columbia rivers[J]. Environmental Management, 2011, 47: 141-159.
- [7] Godinho A L, Kynard B. Migratory Fishes of Brazil: Life History and Fish Passage Needs[J]. River Res Applic, 2009, 25: 702-712.
- [8] ICEM (International Centre for Environmental Management). MRC strategic environmental assessment (SEA) of hydropower on the Mekong mainstream[R]. Hanoi, Viet Nam; Summary of the final report, 2010.
- [9] Jungwirth M. Bypass channels at weirs as appropriate aids for fish migration in rhithral rivers[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1996, 2: 483-492.
- [10] Katopodis C, Williams J G. The development of fish passage research in a historical context[EB/OL]. (2011-08-09) [2011-12-20]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoeng.2011.07.004>.
- [11] Larinier M, Travade F. Downstream migration: problems and facilities[J]. Bull Fr Peche Piscic, 2002, 364 (suppl): 181-207.
- [12] Larinier M, Marmulla G. Fish passes: types, principles and geographic distribution? an overview[C]//Welcomme R L, Petr T. Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries. Bangkok, Thailand; RAP Publication, FAO Regional Office for Asia and the Pacific, 2004: 183-206.
- [13] Larinier M. Upstream and downstream fish passage experience in France[C]//Jungwirth M, Schmutz S, Weiss S. Fish Migration and Fish Bypasses. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1998: 127-145.
- [14] Lichatowich J A. Salmon without Rivers[M]. Washington, DC: Island Press, 1999.
- [15] Liu J K, Yu Z T. Water quality changes and effects on fish populations in the Hanjiang River, China, following hydroelectric dam construction[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1992, 7: 359-368.
- [16] Mallen-Cooper M, Brand D A. Non-salmonids in a salmonid fishway: what do 50 years of data tell us about past and future fish passage[J]. Fisheries Management and Ecology, 2007, 14: 319-332.
- [17] Muir W, Smith S, Williams J, et al. Survival of juvenile salmonids passing through bypass systems, turbines, and spillways with and without flow deflectors at Snake River dams[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2001, 21: 135-146.
- [18] NMFS (National Marine Fisheries Service). Anadromous salmonid passage facility design[S]. National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle, Washington: National Marine Fisheries Service, Northwest Region, 2011.
- [19] NRC (National Research Council). Upstream: Salmon and Society in the Pacific Northwest[S]. Washington, D C: National Academy Press, 1996.
- [20] Oldani N O, Baigun C R M. Performance of a fishway system in a major South American Dam on the Parana River (Argentina - Paraguay)[J]. River Research and Applications, 2002, 18: 171-183.
- [21] OTA (Office of Technology Assessment). Fish passage technologies: protection at hydropower facilities, OTA-ENV-641[R]. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1995.
- [22] Parasiewicz P, Eberstaller J, Weiss S, et al. Conceptual guidelines for nature-like bypass channels[C]//Jungwirth M, Schmutz S, Weiss S. Fish Migration and Fish Bypasses. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1998: 348-362.
- [23] Pompeu P S, Agostinho A A, Pelicice F M. Existing and future challenges: The concept of successful fish passage in south america[EB/OL]. (2011-07-18) [2011-12-20]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.1557/abstract>.
- [24] Quiros R. Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: Latin America[R]. Mar del Plata, Argentina: Copescap Technical Paper 5, National Fishery Research and Development Institute, 1989.
- [25] Reyes-Gavilan F G, Garrido R, Nicleza AG, et al. Fish community variation along physical gradient in short streams in Spain and the disruptive effect of dams[J]. Hydrobiologia, 1996, 321: 155-163.
- [26] Roscoe D W, Hinch S D. Effectiveness monitoring of fish passage facilities: historical trends, geographic patterns and future directions[J]. Fish and Fisheries, 2010, 11: 12-33.
- [27] Tu Z, Yuan X, Han J, et al. Aerobic swimming performance of juvenile *Schizothorax chongi* (Pisces, Cyprinidae) in the Yalong River, southwestern China[J]. Hydrobiologia, 2011, 675: 119-127.
- [28] Zhong Y, Power G. Environmental impacts of hydroelectric projects on fish resources in China[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1996, 12: 81-98.

附录: 汉丰湖及澎溪河鱼类名录

该名录由王强博士提供, ▲代表长江流域特有种; * 代表重庆市受保护鱼类; * * 代表国家二级保护野生动物。

Taxon	Chinese Name	Scientific Name	Symbol	Taxon	Chinese Name	Scientific Name	Symbol
鲤形目		CYPRINIFORMES		鲫属	鲫	<i>Carassius auratus auratus</i>	
鲤科		Cyprinidae		鳊属	鳊	<i>Aristichthys nobilis</i>	
鳊属	宽鳍鳊	<i>Zacco platypus</i>		鲢属	鲢	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	
马口鱼属	马口鱼	<i>Opsariichthys bidens</i>			圆筒吻鲈	<i>Rhinogobio cylindricus</i>	▲
青鱼属	青鱼	<i>Mylopharyngodon piceus</i>		吻鲈属	吻鲈	<i>R. typus</i> Bleeker	
草鱼属	草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>		近红鲌属	汪氏近红鲌	<i>Ancherythroculter wangi</i> (Kimura)	
鲮属	鲮	<i>Hemiculter leucisulus</i>		圆吻鲮属	圆吻鲮	<i>Distoechodon tumirostris</i> Peters	
	油鲮	<i>H. bleekeri bleekeri</i>		平鳍鳅科		Homalopteridae	
	彩石鲮	<i>Rhodeus lighti</i> (Wu)		间吸鳅属	中华间吸鳅	<i>Hemimyzon sinensis</i>	*
	高体鲮	<i>R. ocellatus</i>		华吸鳅属	四川华吸鳅	<i>Sinogastuomyzon szechuanensis szechuanensis</i>	* ▲
	中华鲮	<i>R. sinensis</i>		鳅科		Cobitidae	
彩石鲮属	彩石鲮	<i>Pseudoperilampus light</i>		条鳅属	短体条鳅	<i>Nemacheilus potanini</i>	
倒刺鲃属	中华倒刺鲃	<i>Spinibarbus sinensis</i>			红尾条鳅	<i>N. berezowski</i>	
结鱼属	瓣结鱼	<i>Tor brevifilis brevifilis</i>		副鳅属	红尾副鳅	<i>Paracobitis variegatus</i>	▲
光唇鱼属	宽口光唇鱼	<i>Acrossocheilus (Acros.) monticola</i>	▲		短体副鳅	<i>Paracobitis potanini</i> (Günther)	▲
泉水属	泉水鱼	<i>Semilabeo prochilus</i>		沙鳅属	花斑沙鳅	<i>Botia fasciata</i>	
突吻鱼属	粗须铲颌鱼	<i>Varicorhinus (Scap.) barbatus</i>			宽体沙鳅	<i>B. reevesae</i> Chang	▲
	多鳞铲颌鱼	<i>V. (Scap.) macrolepis</i>			中华沙鳅	<i>B. superciliaris</i> Günther	
白甲鱼属	白甲鱼	<i>Onychostoma sima</i> (Sauvage et Dabry)		泥鳅属	泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	
	小口白甲鱼	<i>O. lini</i> (Wu)		山鳅属	山鳅	<i>Oreias dabryi</i> Sauvage	▲
鲮属	唇鲮	<i>Hemibarbus labeo</i>		高原鳅属	贝氏高原鳅	<i>Triphophysa bleekeri</i> (Sauvage et Dabry)	
	花鱼骨	<i>H. maculatus</i>		副沙鳅属	花斑副沙鳅	<i>Parabotia fasciata</i> Dabry et Thiersant	
麦穗鱼属	麦穗鱼	<i>Pseudorasbora parva</i>		薄鳅属	红唇薄鳅	<i>Leptobotia rubrilabris</i> (Dabry et Thiersant)	* ▲
银鲃属	银鲃	<i>Squalidus argentatus</i>			长薄鳅	<i>L. elongata</i> (Bleeker)	* ▲
蛇鲃属	蛇鲃	<i>Saurogobio dabryi</i>		胭脂鱼科		Catostomidae	
	光唇蛇鲃	<i>S. gymnocheilus</i> Lo, Yao, et Chen		胭脂鱼属	胭脂鱼	<i>Myxocyprinus asiaticus</i>	* *
裂腹鱼属	齐口裂腹鱼	<i>Schizothorax (Schizoth.) prenanti</i>	▲				
	四川裂腹鱼	<i>S. (Schizop.) kozlovi</i>					
鲤属	鲤	<i>Cyprinus carpio</i>					
原鲤属	岩原鲤	<i>Prexypris rabaudi</i>	* ▲				

Taxon	Chinese Name	Scientific Name	Symbol	Taxon	Chinese Name	Scientific Name	Symbol
鲇形目		SILURIFORMES		食蚊鱼属	食蚊鱼	<i>Gambusia affinis</i>	
鲇科		Siluridae		合鳃鱼目		SYMBRANCHI-FORMES	
鲇属	鲇	<i>Silurus asotus</i>		合鳃鱼科		Symbranchidae	
	南方大口鲇	<i>S. saldatovi meridionalis</i>		黄鳝属	黄鳝	<i>Monopterus albus</i>	
	大口鲇	<i>S. meridionalis</i> Chen		鲈形目		PERCIFORMES	
胡鲇科		Clariidae		鮠科		Serranidae	
胡鲇属	胡子鲇	<i>Clrias fascus</i>		鳊鱼属	鳊	<i>Siniperca chuatsi</i>	
鲢科		Bagridae			斑鳊	<i>S. scherzeri</i>	
黄颡鱼属	黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>			大眼鳊	<i>Siniperca kneri</i> Garman	
	瓦氏黄颡鱼	<i>P. vachelli</i> (Richardson)		鰕虎鱼科		Gobiidae	
	光泽黄颡鱼	<i>P. nitilus</i> (Sauvage et Dabry)		栉鰕虎鱼属	栉鰕虎鱼	<i>Ctenogobius giurinus</i>	
鲢属	大鳍鲢	<i>Mystus macropterus</i>		鰧科		Ophiocephalidae	
拟鲢属	切尾拟鲢	<i>Pseudobagrus truncatus</i> (Regan)		鰧属	乌鰧	<i>Ophiocephalus argus</i>	
	凹尾拟鲢	<i>P. emarginatus</i> (Regan)		颌针鱼目		BELONIFORMES	
	乌苏拟鲢	<i>P. ussuriensis</i> (Dybowski)		鱖科		Hemiramphidae	
鲌科		Sisoridae		鱖属		<i>Hemiramphus kurumeus</i>	
纹胸鲌属	中华纹胸鲌	<i>Glyptothorax sinensis</i>		鲑形目		SALMONIFORMES	
钝头鲌科		Amblycipitidae		银鱼科		Salangidae	
鱼央属	白缘鱼央	<i>Liobagrus marginatus</i> (Günther)		间银鱼属	前颌间银鱼	<i>Hemisalanx prognathus</i>	
鲮形目		CYPRINODONTIFORMES					
青鲮科		Oryziatidae					
青鲮属	青鲮	<i>O. latipes</i>					
胎鲮科		Poeciliidae					

(责任编辑 黄 颖)

(中文翻译 孟海星)