DOI:10.15928/j.1674-3075.2019.01.06

流溪河水厂坝丹尼尔式鱼道运行效果初探

何贞俊[1],莫伟均[1],杨 聿[1],谭细畅[2],张艳艳[1],吕文斌[1]

(1.珠江水利科学研究院,广东 广州 510611;
2.珠江水资源保护科学研究所,广东 广州 510611)

摘要:为检验流溪河水厂坝建立的丹尼尔式鱼道试点工程效果,在2015-2016年鱼道主要过鱼时段4-10月,利用张网法逐日监测。结果显示,鱼道取样共采集鱼类906尾,隶属于3目、8科、32属、34种,体长范围5~74 cm,优势种为尼罗罗非鱼(*Tilapia niloticus*)(数量比51.10%)、鲿(*Hemiculter leucisculus*)(16.23%)、唇鲃(*Hemibarbus labeo*)(8.17%)、银鮈(*Squalidus argentatus*)(6.73%)、东方墨头鱼(*Garra orientalis*)(1.55%),以定居型鱼类为主,未见河口洄游性鱼类。水温与上游水位是影响鱼类种类时间分布的主要环境因素。聚类分析表明,6月过鱼群体的种类和数量独成一类,与其他月份鱼类群体最不相似。虽然Shannon多样性指数在5月和6月分别为2.068和1.719,但总体偏低(1.451±0.535),而Margalef丰富度指数差别较小,表明不同鱼类对鱼道入口的感应存在种间差异,推测是由工程全段翻滚闸门下泄水流导致鱼道入口不易发现所致。研究表明,丹尼尔式鱼道试点工程效果较好,为该河段的绝大部分鱼类提供了上溯通道,对流溪河构建整体过鱼设施体系起到了良好的示范作用,有助于流溪河生态系统的健康与恢复。

关键词:丹尼尔式鱼道;运行效果;流溪河

中图分类号:S956.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2019)01-0035-06

鱼道是对洄游性鱼类进行生态补偿的一项重要工程措施(曹庆磊等,2010)。然而,忽略了对生物因素的充分考虑是造成我国鱼道运行效果不佳的重要原因(Mallen-Cooper & Brand,2007)。因此,如何通过监测过鱼对象来评价鱼道的过鱼效果,进而改进设计与运行方式是我国鱼道建设亟待解决的首要问题。

目前,过鱼效果的评估方法尚无统一标准,国外在这一方面起步较早也相对成熟,Larinier(2008)提出了过鱼效能与过鱼效率两个评价指标,可以简单理解为能过鱼和能过多少鱼的定性和定量概念,并有偏向于定量研究的趋势。在太平洋西北地区,通过水下摄像机对溯河产卵的大麻哈鱼(*Oncorhynchus keta*)和七鳃鳗(*Lampetra japonicum*)实现了较大规模的精确计数(Parsons & Skalski,2010)。美国卡伯特电站鱼道布置了43个PIT标记信号接收线圈,统计出该鱼道的过鱼效率为88%~96%(Castro-Santos et al,1996)。Weibel & Peter(2013)利用PIT标记技术对鱼类通过瑞士中部和北部的8个底斜坡的比例进行了分析,得出了上行效率随鱼的种类、斜坡等级变化而变化;此外,澳大利亚、法国、奥地利及德国对红外计数和声学探测技术均有实施案例(Baumgartner et al,2010),已形成一套比较完整的鱼道监测技术方案和框架;我国的相关研究相对较少,20世纪70年代,裕溪闸鱼道和洋塘鱼道评估的过鱼数量为75尾/h和385尾/h(安徽省巢湖地区水产资源调查小组,1975;徐维忠和李生武,1982);直至2010年以后才有相关过鱼效果监测评估报道,主要有连江西牛鱼道、崔家营航电工程鱼道以及长洲水利枢纽鱼道(李捷等,2013;王珂等,2013;Tao et al,2015),采用的手段主要为截堵法和水声学探测法。

流溪河是广州市的主要河流,位于广州市西北部,全长156 km,中上游建有国家级光倒刺鲃(*Spinibarbus hollandi*)水产种质资源保护区和从化市级唐鱼(*Tanichthys albonubes*)自然保护区,鱼类物种多样性丰富。为解决11座闸坝造成的河流片段化问题并联通鱼类洄游路线,2013年在水厂坝处利用废弃船闸改造丹尼尔式鱼道进行试点研究,以期为流溪河的鱼道建设及生态恢复提供帮助。本次调查采用张网法逐日对试点鱼道的过鱼效果进行监测,旨在评估流溪河鱼道建设的可行性,对后续流溪河整体连通以及生态调度具有指导意义。

收稿日期:2017-05-27

基金项目:广州市科技计划项目(201804010202)。

作者简介:何贞俊,1979年生,男,高级工程师,主要从事生态水力学及鱼类过坝技术研究。E-mail:sdmoweijun@163.com

1　材料和方法

1.1　鱼道位置与形式

流溪河目前建有11座拦河闸坝，自下而上为人和坝、李溪坝、牛心岭坝、大坳坝、街口坝、水厂坝、人工湖坝、卫东坝、胜利坝、青年坝和良口坝，试点鱼道建在流溪河中部水厂坝处，丹尼尔鱼道的地理位置与运行实况见图1。

水厂坝建于1994年，设计水头2 m，由自动翻板门和右岸船闸组成，当上游水位高于设计水位时，闸门自动翻起泄水，维持上游设计水位，船闸已废弃不用，因此利用船闸位置布置丹尼尔式鱼道。鱼道总长20 m，底坡为1∶10，中间设置两个休息池，将鱼槽分割为3段，每段长度分别为8 m、5 m和7 m，槽宽0.9 m，隔板有效过水宽度0.52 m，隔板间距0.8 m，设计水深0.9 m，设计流量0.52 m^3/s。

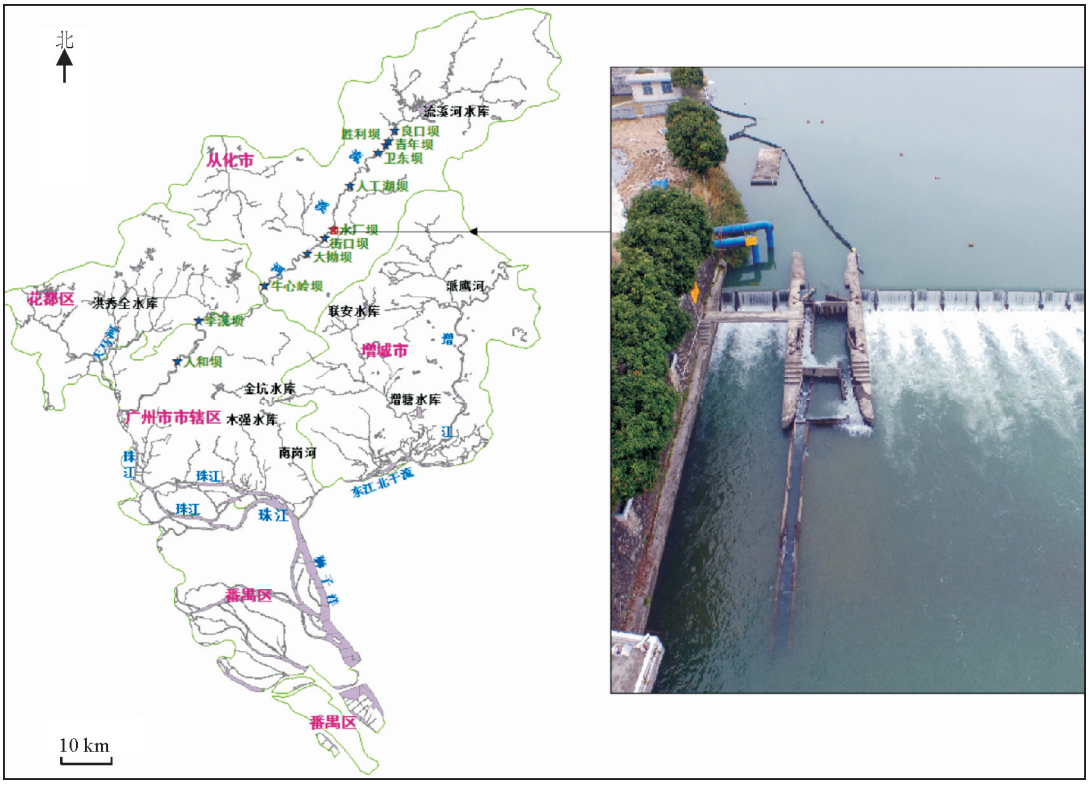


图1　丹尼尔鱼道位置与运行实况

Fig.1　Location and operation of the Denil fishway on the Liuxi River

1.2　鱼类采样

在2015－2016年的主要过鱼时段(4－10月)，利用张网法在水厂坝试点鱼道开展了过鱼效果监测，张网工具鱼笼分前后3层，内层孔口逐渐减小，外网网口长×高＝90 cm×80 cm，内网方形小口边长为20 cm，网目2 cm，整个网长5 m。首先将网口固定在出口闸门上，利用水流的冲击力使渔网口紧贴闸门外侧，与鱼道出口紧密吻合，然后用4根铁丝牵引渔网尾部保持张开状态。每天早上8点收网，统计鱼类种类、体长、体重，以每月采集量作为单位努力捕捞量(catch per unit of effort，CPUE)，同步记录当日水温、上游水位等指标。

1.3　生物多样性指数

根据每月收集的鱼类数据，利用统计软件R，加载Vegan程序包，计算每月的生物多样性指数。

Shannon多样性指数：$H=-\sum_{i=1}^{S}P_i\cdot\ln P_i$

Margalef物种丰富度指数：$D=(S-1)/\ln N$

Pielou均匀度指数：$J=H/\ln S$

式中：P_i为每月第i种的个体数与总个体数比值；S为每批次的鱼类种类数；N为每月采集到的鱼类个体数。

1.4　群落结构分析

使用Excel 2010绘制渔获物的主要优势种相对多度。基于方差分析思想构建法，如果分类正确，处于同类的采样时段内各鱼种数量离差平方和较小，不同类的离差平方和较大，通过R软件对鱼类进行月份的聚类分析(Ward法)，以表征过鱼的时空差异，并进一步利用相关系数矩阵探究优势鱼种与鱼道上游水位及水温的关联程度。

2　结果与分析

2.1　鱼类种类组成

采样期间共采集到鱼类 906 尾,隶属于 3 目、8 科、32 属、34 种。以鲤科鱼类为主,生物量则以丽鱼科为主,优势种有尼罗罗非鱼(*Tilapia nilotic-us*),数量占比 51.10%,鲿(*Hemiculter leucisculus*)占 16.23%,唇鲃(*Hemibarbus labeo*)占 8.17%,银鮈(*Squalidus argentatus*)占 6.73%,东方墨头鱼(*Garra orientalis*)占 1.55%。各月主要优势种比例有一定的变化(图 2)。其中尼罗罗非鱼在各个采样月份均有分布,尤其以 10 月居多,高达 89.25%;鲿在 4 - 7 月上溯较多,5 月占比为 27.39%;唇鲃的上溯时间也集中在 4 - 7 月,在 4 月达到最高峰,占比 43.10%,这可能与唇鲃喜欢栖息于水温较低的水体习性有关,此时段的温度相对较低;银鮈和东方墨头鱼在鱼道出现的时间也有一定的选择性,银鮈在 2015 年 9 - 10 月和 2016 年 4 月未有捕获,而东方墨头鱼仅在 2015 年 8 - 9 月和 2015 年 6 月有捕获,且主要集中在 8 月。

捕获鱼类中,个体差异较为显著,小至中华鳑鲏(*Rhodeus sinensis*)(体长5 cm、体重 20 g),大至革胡子鲇(*Clarias fuscus*)(体长 74 cm、体重 8 300 g)。调查时段内的鱼类生态习性以定居型为主,江湖洄游性鱼类仅四大家鱼,如草鱼(*Ctenopha-ryngodon idellus*)1 尾,鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)3 尾,鳙(*Hypophthalmichthys nobilis*)6 尾,未见河口洄游性鱼类。

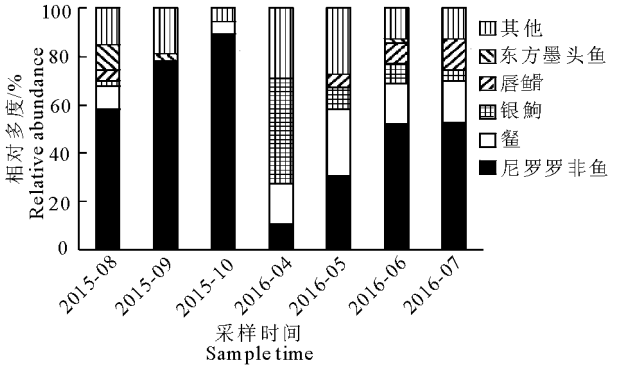


图 2　流溪河水厂坝试点鱼道优势种相对多度

Fig.2　Relative abundance of dominant species in the Liuxi River fishway by month

2.2　生物多样性指数

流溪河水厂坝丹尼尔式鱼道的鱼类群落多样性呈现出显著差异性(表 1)。5、6、7 月的 Shannon 指数、Margalef 指数以及 Pielou 指数处于调查时间段内的一个较高水平,其中 2016 年 5 月的多样性指数最高(2.068),6 月的丰富度指数最高(3.467)。各采样月份的多样性指数和丰富度指数变幅较大,均匀度指数各月份差异相对较小。生物多样性指数是一种应用数理统计方法分析生物群落的种类和数量的数值,一定程度上可以用来评价环境质量,因此认为水厂坝丹尼尔鱼道 5 月的运行条件为该河段的鱼类提供了最佳的上溯条件,5 - 7 月是鱼类通过试点鱼道的高峰期。

表 1 流溪河水厂坝试点鱼道采集时段鱼类多样性

Tab.1　Fish diversity passing the fishway for each month of the study period

日期	种类数	单位努力捕捞量/尾	Shannon 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 丰富度指数	水温/℃	上游水位/m
2015 - 08	12	86	1.544	0.621	2.469	30.75	32.63
2015 - 09	7	37	0.883	0.454	1.660	30.05	32.65
2015 - 10	4	93	0.443	0.319	0.662	27.59	32.61
2016 - 04	13	58	1.871	0.730	2.955	24.58	32.70
2016 - 05	17	157	2.068	0.730	3.164	26.88	32.71
2016 - 06	21	320	1.719	0.565	3.467	29.80	32.69
2016 - 07	17	155	1.627	0.574	3.172	32.00	32.64

2.3　过鱼时段及环境差异

监测结果显示,不同时段进入鱼道的种类和数量不一致,6 月过鱼的种类和数量最多,10 月过鱼种类最少,9 月过鱼数量最少。对试点鱼道不同月份的过鱼情况进行聚类分析(图 3),可见通过鱼道的鱼类群落可分为 3 大类群,6 月单独成一个类群,4 月、8 月、9 月成第二个类群,5 月、10 月、7 月成最后一个类群,8 月与 9 月的鱼类群落以及 10 月与 7 月的鱼类群落最为相似,而 6 月鱼类群落与其它群落最不相似,实际上 6 月正是鱼道过鱼数量和种类最多的时段。

为进一步分析不同时段鱼道运行关键因子对优势种鱼类上溯的影响,作出优势种鱼类上溯频率与水温和上游水位相关系数矩阵二维图(图 4)。与水温、上游水位正相关的种类鲿和银鮈分布在第一相限,实际上鲿与水温的相关性十分微弱,优势种中并无与水温、上游水位呈负相关的种类。唇鲃与上游水位正相关性较强,与水温呈现中度负相关,这可能与该鱼种喜栖息于冷水环境的习性有关。尼罗罗非鱼和东方墨头鱼更多体现了与水温呈正相关特点,水温越高,鱼道中捕获的数量越多。总体上认为,在水厂坝试点丹尼尔式鱼道运行过程中,上游水位的波动对唇鲃的影响最大,而水温的变化会对银鮈、尼罗罗非鱼造成一定的影响。

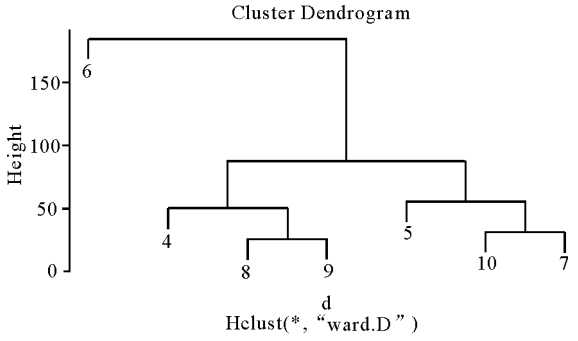
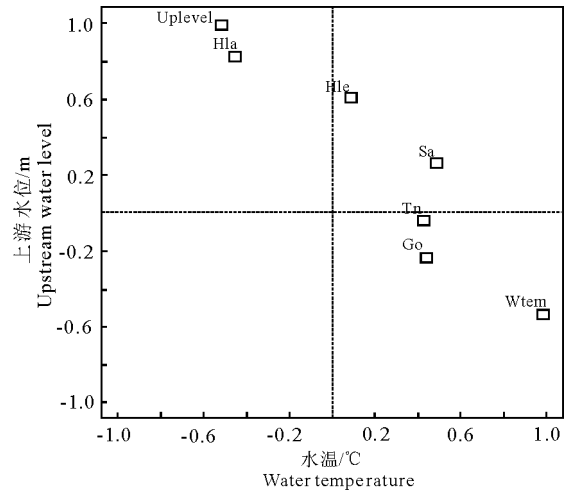


图3 流溪河水厂坝试点鱼道不同月份的鱼类群落聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of the fish community by month in the fishway.



Tn:尼罗罗非鱼;Hle:䱗; Hla:唇鲹;Sa:银鲃 Go:东方墨头鱼

图4 优势种上溯率与水温、上游水位的相关系数矩阵

Tn:*Tilapia niloticus*;Hle:*Hemiculter leucisculus*;Hla:*Hemibarbus labeo*;Sa:*Squalidus argentatus*;Go:*Garra orientalis*

Fig.4 Correlation coefficient matrix of the dominant species passage rate with water temperature and upstream water level

3 讨论

3.1 鱼道运行工况对过鱼种类的影响

流溪河鱼道建设规划是为了解决一些鱼类的洄游与上下游基因交流问题,主要有河口洄游性鱼类、四大家鱼、光倒刺鲃、广东鲂(*Megalobrama thrminalis*)、鲴类、䱗类、鳅类、鲃类、虾虎鱼类、鳜类等。由于工程阻隔,流溪河已呈现片段化,光倒刺鲃主要分布在中上游区域;原分布于该水域的河口洄游性鱼类如花鳗鲡(*Anguilla marmorata*)、七丝鲚(*Coilia grayi*)、花鲈(*Lateolabrax japonicus*)、白肌银鱼(*Leucosoma chinensis*)等也尚未在试点鱼道中出现,反映了要全面恢复流溪河鱼类洄游与交流通道需要自下而上的系统解决方法,但监测中发现了四大家鱼、广东鲂、鲴类、䱗类、鳅类、鲃类、虾虎鱼类、鳜类等34种鱼类,5种优势种均为定居型鱼类,其在不同时段的分布也有差异,主要受水温和上游水位的影响,不同鱼种对水温的适应能力不同,如尼罗罗非鱼不能在低于7℃的水体中生存,水温越高,该鱼种越活跃。研究发现,随着水位的升高,唇鲹的上溯率递增,这可能与其喜欢生活在中下层流动水体习性有关。总体上看,不同月份的过鱼种类及数量以6月为一类群,相邻月份并未表现出明显的聚类特点,这可能是受丹尼尔鱼道运行工况变化较大的影响。

3.2 试点丹尼尔鱼道的过鱼特点

丹尼尔鱼道是一种利用较短的间隔、逆流向、与底板成一定倾斜角度的隔板进行回流消能且坡度很陡鱼道形式。研究表明,维持丹尼尔式鱼道稳定的水力条件只能容许轻微的上游水位变化(Larinier,2008),随着水深的增大,鱼道内垂向流向也会增大(Katopodis & Williams,2012),这类鱼道对游泳能力较强的个体具有选择性,国内鱼类游泳能力相对较弱,因而丹尼尔鱼道运用案例较少;该形式很容易用于现有水坝的改造,且其垂向流具有由底部至表层逐渐增大的特点,一定程度上也能实现游泳能力较弱的鱼类上溯(闫滨等,2013)。

作为一个试点鱼道,流溪河水厂坝丹尼尔式鱼道目前共采集到34种鱼类,根据2013年3-6月珠江水产研究所鱼类资源调查结果(何贞俊等,2015),该水域鱼类共计56种,其中工程所在的街口江段鱼类39种,通过鱼道的种类达到该江段的87.18%,占整个水域的60.71%,认为试点丹尼尔式鱼道为大部分该江段的鱼类提供了洄游或连通通道;另外,在过鱼的形态特点上,通过该鱼道的鱼类体长范围分布较广(5~74 cm)。相关研究表明,鱼类体长与游泳能力呈正比(Hammer,1995),推测试点丹尼尔式鱼道能够为游泳能力较弱的鱼类提供上溯条件,并未出现明显的大个体选择性。实际上,工程建立之初,通过对该鱼道的物理模型研究表明,鱼道表面流速虽高达1.7~1.9 m/s,但底部也有0.6~1.0 m/s的流速区域,且该区域占有效水深的2/3,游泳能力较弱的鱼类可从靠近隔板底部上溯。因此,从鱼道过鱼效能和种类过鱼效率看,试点鱼道是较为成功的,经济技术上也是可行的。

3.3 与国内已有监测成果鱼道比较

国内对于鱼道监测较为系统的研究成果并不多见,李捷等(2013)在连江西牛鱼道共采集38种鱼类,11 853尾;谭细畅等(2015)在长洲鱼道11个批

次采集鱼类 40 种，共计 6 244 尾。与之相比，试点鱼道开展监测的时间跨度更大，但数量却最少，在鱼道的过鱼数量效率上偏低；另一方面，试点鱼道过鱼种类的 Margalef 丰富度指数(2.507±0.935)高于长洲鱼道的(1.494±0.329)，Shannon 多样性指数(1.451±0.535)与长洲鱼道的(1.380±0.279)基本持平，与同类研究河段相比同样处于一个较低水平(李捷等，2009；2010；2012)。从之前的分析可知，试点丹尼尔鱼道内部水力条件能够为不同游泳能力的鱼种提供上溯条件，结合 Shannon 多样性指数可知，造成该指数较低的原因是鱼道入口对不同鱼种的吸引力存在差异，也就直接造成了过鱼数量的减少。水厂坝采用翻滚式闸门进行控流，高于某一水位后可有效稳定上游水位，但同时造成了下游出现大面积的下泄水流，鱼类难以识别鱼道入口，进入鱼道成为小概率事件。

3.4　鱼道过鱼效果监测的必要性

通过对鱼道的监测和评估，可以及时了解鱼道本身对鱼类的增补作用，认知鱼道在设计上的不足，从而进行相应的调整。目前我国的鱼道监测方法单一，持续周期不长，指标不明确，因此在未来的长时间内，还必须做大量的相关研究工作；此外，在监测手段上需要加入更多现代化的手段，如鱼类遥测技术，包括无线电标记、声学标记、PIT 标记(Thorstad et al，2013)、水声学探测技术以及水下视频图像处理技术等，只有不断地及时反馈生物信息，才能科学评价鱼道功能的效应。水厂坝丹尼尔式鱼道经过长时期的采样，复核了主要过鱼种类，同时通过信息反馈明确了鱼道入口难寻的问题，后期可进行有效改进，提高鱼道的过鱼效能和效率。当然，由于监测相关环境因子较少(仅上游水位和水温)，无法进行更为系统准确的分析，还需要增加相关因子如流场的监测，同时增加对上下游鱼类资源的调查分析。

参考文献

安徽省巢湖地区水产资源调查小组，1975. 裕溪闸鱼道过鱼效果及其渔业效益的探讨[J]. 淡水渔业，(7)：19－23.

曹庆磊，杨文俊，周良景，2010. 国内外过鱼设施研究综述[J]. 长江科学院院报，27(5)：39－43.

何贞俊，李新辉，张艳艳，2015. 广州流溪河鱼类资源调查研究[J]. 人民珠江，36(5)：112－114.

李捷，李新辉，谭细畅，等，2009. 广东肇庆西江珍稀鱼类省级自然保护区鱼类多样性[J]. 湖泊科学，2009，21(4)：556－562.

李捷，李新辉，贾晓平，等，2010. 西江鱼类群落多样性及其演变[J]. 中国水产科学，17(2)：298－311.

李捷，李新辉，贾晓平，等，2012. 连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态学报，32(18)：5795－5805.

李捷，李新辉，潘峰，等，2013. 连江西牛鱼道运行效果的初步研究[J]. 水生态学杂志，34(4)：53－57.

谭细畅，黄鹤，陶江平，等，2015. 长洲水利枢纽鱼道过鱼种群结构[J]. 应用生态学报，26(5)：1548－1552.

王珂，刘绍平，段辛斌，等，2013. 崔家营航电枢纽工程鱼道过鱼效果[J]. 农业工程学报，29(3)：184－189.

徐维忠，李生武，1982. 洋塘鱼道过鱼效果的观察[J]. 湖南水产科技，(1)：21－27.

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

Baumgartner L，Bettanin M，McPherson J，et al，2010. Assessment of an infrared fish counter (Vaki Riverwatcher) to quantify fish migrations in the Murray-Darling Basin[M]. NSW Department of Primary Industries.

Castro-Santos T，Haro A，Walk S，1996. A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways[J]. Fisheries Research，28(3)：253－261.

Hammer C，1995. Fatigue and exercise tests with fish[J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Physiology，112(1)：1－20.

Katopodis C，Williams J G，2012. The development of fish passage research in a historical context[J]. Ecological Engineering，48：8－18.

Larinier M，2008. Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France[J]. Hydrobiologia，609(1)：97－108.

Mallen Cooper M，Brand D A，2007. 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，14(5)：319－332.

Parsons A L，Skalski J R，2010. Quantitative assessment of salmonid escapement techniques[J]. Reviews in Fisheries Science，18(4)：301－314.

Tao J P，Wang X，Tan X C，et al，2015. Diel pattern of fish presence at the Changzhou fishway (Pearl River，China) during the flood season[J]. Journal of Applied Ichthyology，31(3)：451－458.

Thorstad E B，Rikardsen A H，Alp A，et al，2013. The use of electronic tags in fish research-an overview of fish telemetry methods[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences，13：881－896.

Weibel D，Peter A，2013. Effectiveness of different types of block ramps for fish upstream movement[J]. Aquatic Sciences-Research Across Boundaries，75(2)：251－260.

(责任编辑　万月华)

Effectiveness of the Denil Fishway, Liuxi River at the Water Plant Dam

HE Zhen-jun[1], MO Wei-jun[1], YANG Yu[1], TAN Xi-chang[2], ZHANG Yan-yan[1], LV Wen-bin[1]

(1.Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, P.R.China;
2.Institute of Pearl River Water Resource Protection, Guangzhou 510611, P.R.China)

Abstract: Liuxi River is the main river in Guangzhou City. While the fishery is highly diverse, the 11 dams and sluices constructed on the 156 km river channel have seriously segmented the river and pose a barrier for fish migration. In 2013, an obsolete shiplock at the water plant dam was transformed into the Denil fishway as a pilot for fish passage construction on the Liuxi River. In August, September and October 2015 and April, May, June and July 2016, daily monitoring of fish passage effieciency was carried out in the Denil fishway by setting a net at the outlet of the fishway. The objective of the study was to evaluate the feasibility of fishway construction on the Liuxi River and provide a reference for reconnecting the river and restoring the ecology. The fish catch was recorded at 8∶00 each day and fish were identified by species, body length and body weight were measured, and water temperature and upstream water level were recorded. A total of 906 fish were collected during the monitoring period, with a body length range of 5 – 74 cm. The collected fish represented 34 species, 32 genera, 8 families and 3 orders. The dominant species was *Tilapia niloticus* (51.10 %), followed by *Hemiculter leucisculus* (16.23%), *Hemibarbus labeo* (8.17%), *Squalidus argentatus* (6.73%) and *Garra orientalis* (1.55%). In terms of ecological type, the fish were dominated by sedentary species and no estuarine migratory fish were observed. The temporal distribution of fish was affected by both water temperature and upstream water level. Cluster analysis shows that the fish population in June was an independent group, displaying significant differences in species number and total number of fish compared to other months. There were also large monthly variations in the Shannon diversity and Margalef richness indices, while monthly variations in the Pielou evenness index were small. The Shannon diversity indices (2.068, 1.719, 1.627), Margalef richness indices (3.164, 3.467, 3.172) and Pielou evenness indices (0.730, 0.565, 0.574) in May, June and July were relatively high. Our research shows that the Denil fishway provides upstream passage for most species in the section investigated and supports ecological restoration of the Liuxi River. This pilot project is a good model for the construction of a complete fish passage system for the Liuxi River.

Key words: Denil fishway; fishway operating efficiency; Liuxi River