

涵洞过鱼效果评价方法述评

邓晓川¹, 石迅雷¹, 王永猛¹, 严登华², 徐刚¹, 石小涛^{1,3}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100000

3. 湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 三峡大学, 湖北 宜昌 443002;)

摘要:涵洞作为常见的输水建筑物,也承担着维持河流连通性的功能。对涵洞过鱼效果进行评价,可以确定其对鱼类迁移的影响程度和阻碍原因,对修复涵洞、优化设计具有重要意义。概述涵洞过鱼的障碍类型,包括落差障碍、下游水深不足障碍、流速障碍和水深障碍;总结涵洞过鱼效果评价方法,包括简易评价法、监测评价法和虚拟评价法,分析各方法优缺点;指出虚拟评价法在涵洞过鱼效果评价中的巨大优势与发展前景;提出了提高模拟精度的方向:利用开放水槽获得更精确的鱼类游泳能力数据,深入分析鱼类的跳跃行为与下游水深、流量以及起跳速度和方向的关系并量化各因素对鱼类跳跃的影响程度,适当调整水力计算方法以适应国内规范,量化鱼类运动模式与水力学条件的响应关系等。

关键词:涵洞;过鱼效果;简易评价法;监测评价法;虚拟评价法

中图分类号:TV672;S956 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)06-0123-08

鱼类在其整个生活史中需要在各栖息地之间迁移以满足觅食、产卵、越冬等需要(Fausch et al, 2002; Gowan et al, 1994)。但随着人类对水力资源开发利用不断加深,大坝、公路等建筑物对河流连通性的影响也越来越显著(金志军等, 2018; 许家炜等, 2018; P  pino et al, 2012)。涵洞是修复河流连通性的重要手段之一,但在实际工程中只分析如何取得最优过水效率,节省工程造价(胡晓等, 2018),流域内鱼类的迁移需求没有得到足够重视。过鱼效果不佳的涵洞会对鱼类产生“选择性”干扰,对流域内鱼类种群结构、丰度影响显著(Evans et al, 2015; Nathan et al, 2018; 许晓蓉等, 2012)。对涵洞过鱼效果进行评价,可以确定其对鱼类迁移的影响程度和阻碍原因,对修复涵洞、优化设计具有重要意义。本文在充分认识涵洞过鱼的障碍类型基础上,总结涵洞过鱼效果的评价方法并分析优缺点,以期为涵洞工程建设提供参考。

1 涵洞过鱼存在的障碍类型

对涵洞进行过鱼效果评价需要确定鱼类通过率,判定鱼类在涵洞内通行的障碍类型以及对该鱼类上溯的影响程度(Mahlum et al, 2014a)。涵洞必须满足2个条件才能保证良好的过鱼效果(Castro-Santos et al, 2009):鱼类能够顺利进入涵洞;鱼类进入涵洞后能够立即通过。根据阻碍鱼类进入涵洞和通过涵洞的原因,将涵洞可能存在的障碍类型分为以下4种。

1.1 落差障碍

涵洞位置选择不当或设计不合理,水流长时间对下游过度冲刷,导致涵洞下游段底部高程大于下游水面高程,即涵洞与下游河道存在竖向落差。此时,鱼类需要通过跳跃进入涵洞。如果落差超过鱼类的跳跃高度,涵洞便存在落差障碍。鱼类跳跃高度利用下式计算:

$$H = V_{\text{leap}}(\sin\theta_{\text{leap}})t + \frac{1}{2}gt^2 \quad (1)$$

$$L = V_{\text{leap}}(\cos\theta_{\text{leap}})t \quad (2)$$

式中: H 为跳跃的垂直高度,m; L 为跳跃的水平距离,m; θ_{leap} 为跳跃速度,m/s; θ_{leap} 为跳跃角度; g 为重力加速度,9.8 m/s²; t 为时间,s。

公式①②的模型中将鱼视作质点,并未考虑鱼的体长,所以跳跃距离需要减去鱼体全长,折减鱼类体长后对上式变形如公式③④。但鱼类跳跃时直至身体完全离开水面,尾部才不再提供动力,即鱼类在跳跃过程中,实际加速时间比计算模型中的加速时

收稿日期:2020-01-08 修回日期:2020-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51922065, 51679126);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划鱼类过坝技术项目(T201703)。

作者简介:邓晓川,1990年生,男,硕士研究生,研究方向为生态水利学。E-mail: 381597161@qq.com

通信作者:石小涛,1981年生,男,教授,研究方向为生态水利学。E-mail: fishlab@163.com

间长,因此跳跃高度和距离的实际值大于计算值。

$$V_{\text{leap}}=\left[\frac{ag}{\sin\theta_{\text{leap}}\cos\theta_{\text{leap}}}\right]^{1/2}$$

③

$$V_{\text{leap}}=\left[\frac{a^2g}{2\cos^2\theta_{\text{leap}}(a\tan\theta_{\text{leap}}-b)}\right]^{1/2}$$

④

式中: $a=L-f\cos\theta_{\text{leap}}$, m ; $b=H-f\sin\theta_{\text{leap}}$, m ; f 为鱼类体长, m 。

鱼类在自然环境中的跳跃行为实际受诸多因素影响。首先,流量大小影响鱼类跳跃的主动性(涂志英等,2011;Lauritzen et al,2010)。其次,起跳位置的水力环境影响跳跃的高度。例如涵洞出流落入下游河道使水流掺气并产生波动,只有驻波处流态比较稳定,鱼类通常会选择在驻波位置起跳以获得足够的动力。但稳定驻波的发生与多个因素有关,如落差与下游水深比值,涵洞出射流的形状、角度以及流量等。

1.2 下游水深不足障碍

当涵洞出口与下游水位存在落差且下游水深较小时,水流自涵洞射入下游会发生掺气,由于空气压缩性远大于水的压缩性,使得鱼类在掺气水流中通过摆尾获得动力变小,其跳跃高度受限。通常以 $D/H<1$ (D 为下游水深, m ; H 为落差, m)作为下游水深不足的判断标准。

1.3 流速障碍

流速障碍包括 2 种情况:涵洞内流速 $\geq$ 鱼类爆发游泳速度,鱼类无法克流上溯;涵洞内流速 $<$ 鱼类爆发游泳速度,但由于涵洞过长,鱼类虽然能够上溯,但在达到疲劳极限时仍未能通过涵洞。

1.4 水深障碍

涵洞内水深过浅,不仅无法托起鱼类身体,不能满足其游泳所需,而且鱼类不能获得足够的氧气供给。长时间处于水深不足的区域,会对鱼类造成严重伤害,甚至死亡。

2 涵洞过鱼效果评价方法

涵洞过鱼障碍已有较为明确的判断标准,在充分认识涵洞过鱼的障碍类型基础上,总结涵洞过鱼效果的评价方法,主要有以下 3 种。

2.1 简易评价法

当研究区域内存在多个涵洞时,逐一进行过鱼效果评价效率低下,可对所有涵洞过鱼效果进行快速简易评估,筛选出存在明显障碍的涵洞再有针对性地深入分析。由于鱼类通过涵洞时的主要障碍为

流速障碍与落差障碍,产生这 2 类障碍的决定因素分别为涵洞坡度和出口落差。快速评估法就是以坡度和落差作为主要分析点(Bourne et al,2011),采用下列标准评估涵洞的通行障碍:

(1)涵洞出口落差 $>$ 鱼类 2 倍体长,鱼类无法进入涵洞,通过率为 0;

(2)涵洞出口落差 $\leq$ 鱼类 2 倍体长,但下游水深 <1.5 倍出口落差,鱼类无法通过跳跃进入涵洞,通过率为 0;

(3)没有出口落差时,涵洞坡度 $>1.5\%$,鱼类无法顺利通过涵洞,通过率为 0;

(4)没有出口落差时, $0.5\%\leq$ 涵洞坡度 $\leq1.5\%$,鱼类通过率为 50%;

(5)没有出口落差时,涵洞坡度 $<0.5\%$,鱼类可完全通过,通过率为 100%。

采用该评价标准,Clarkin 等(2005)曾在实地考察中,以体长 15 cm 的鲑作为分析对象,采用简易评价法对涵洞式涵洞进行研究,分析流程如图 1。

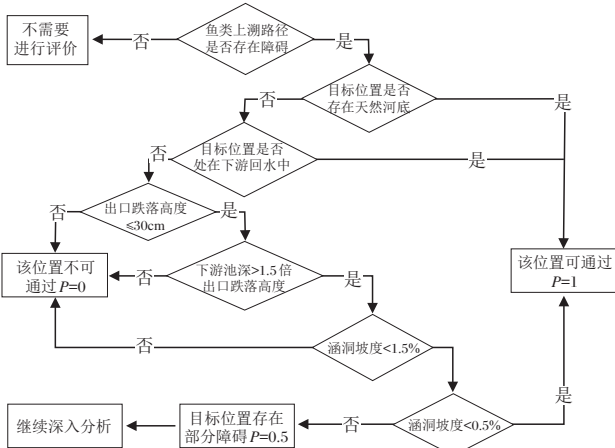


图 1 针对体长 15 cm 鲑的快速分析流程

Fig. 1 Flow chart for rapid virtual evaluation of salmon (body length of 15 cm) passage

鱼的种类不同,行为能力也会有所差异。在对过鱼对象已有深入研究的基础上,简易评价法的判断标准可以适当调整。例如,Januchowski-Hartley 等(2014)2010–2012 年选取美国与加拿大交界处的五大湖作为试验地,将该流域鱼类整体按照游泳能力分为较弱、中等、较强 3 类,采用简易评价法对该流域的涵洞通过性进行了模拟预测。首先,将涵洞内部流速采用简化方法分析:当水深 $h<12$ cm 时,选取 0.5 h 处流速作为断面流速;当水深 $h>12$ cm 时,选取涵洞内 2~4 个断面,每个断面取距涵洞底部 6 cm 处的流速,并选取其中最小值作为断面流速。其次,选取 0.4、0.7、1.0 m/s 分别代表游泳能力较弱、中等、较

强的 3 个鱼类群体的游泳速度。涵洞通过性的判断标准为: 当存在出口落差时, 鱼类无法通过; 当不存在出口落差时, 将流速与游泳速度对比以判断通过性, 并将通过性简化为 0 (不可通过) 或 1 (可通过)。最终发现使用该方法判断涵洞过鱼效果, 在一定范围内与现场实测数据较为接近。

简易评价法能够快速对多个涵洞进行评价, 该方法快速便捷, 但需要以深入了解过鱼对象的行为能力为基础, 而且所得结果相对比较粗略, 通常只作为初步判断。

2.2 监测评价法

监测评价法即利用监测设备对涵洞过鱼效果进行实测, 为分析过鱼效果获取数据支撑。根据实测方法不同, 又分为直接法和间接法。

2.2.1 直接法 通常采用张网法、视频监控或水声学监测等方法直接获得涵洞过鱼数据。

张网法即在涵洞上游段布置张网, 定期获取渔获物 (一般 1 次/d), 并记录渔获物的种类、数量和规格, 分析各涵洞过鱼效果 (王珂等, 2013)。张网法需要定期采集样本, 不适宜长期观测, 且易受水流影响或无关人员干扰造成网具丢失, 使得数据缺失。

视频监控则需要在涵洞内关键部位 (通常为进口, 出口以及坡度变化处) 布置监测设备, 获取涵洞内的鱼类行为, 并定量获取各关键点的鱼类通过率, 确定影响鱼类上溯的地点及鱼类相应的生理变化等 (Negrea et al, 2014)。视频监控能够直观准确地获取连续性数据, 不仅能获得过鱼数量, 而且能掌握过鱼的时空规律, 但观测范围受水体浊度和光照条件影响较大, 监测期间的悬浮垃圾也可能遮挡摄像头影响观测效果, 而且对观测设备要求较高, 布置仪器需专业人员操作, 收集整理数据耗时长, 需要配套开发分析软件实现自动计数等功能。

水声学监测即通过在水下布置换能器, 向采样区域发射声波脉冲信号, 再检测反射信号并转换为图像信息, 获得鱼类分布区域和数量。水声学监测对鱼类无伤害, 但观测量程同样受水体浊度影响较大, 而且如果水位在短期内波动较大, 需要随时调整换能器高程和信号强度以适应水位波动, 而且仪器易受各种环境噪声的干扰影响监测精度。

综上, 直接法的优点是能够直接定量获取涵洞内鱼类通过率, 为优化设计和修复涵洞提供最准确的数据参考, 但数据采集易受外界干扰, 观测过程步骤繁琐, 分析数据工作量大, 耗时耗力。

2.2.2 间接法 通常采用标记重捕法, 即在涵洞下游

捕获适量鱼类样本进行标记, 经适应性暂养后再放回原采样点。经过一定时间间隔后在涵洞上下游再次收集目标鱼类, 检查经标记的鱼类数量, 分析过鱼效果。或者直接在涵洞上下游同时收集渔获物, 比较鱼类种群结构和物种丰度 (Blank, 2008; Burford et al, 2009; Nislow et al, 2011)、基因亲缘系数 (Knaepkens et al, 2010; Timm et al, 2016), 分析当前上下游各指标的差异性以及涵洞修建前后的历史差异性 (Neville et al, 2014; Whiteley et al, 2014; Wood et al, 2014), 从而间接判断出涵洞在较长的时间尺度上对鱼类通过性的影响 (Jesse et al, 2005; Diebel et al, 2015)。此外, 也可以通过 PIT 遥测, 即在鱼体内植入标签, 并在涵洞进出口关键位置布置 PIT 天线, 当受标记的鱼类到达感应区域, PIT 天线就会发射信号记录数据。

间接法数据收集相对简便, 能够简明判断涵洞对鱼类通过性的影响效果。但调查周期较长, 不能对涵洞内通行障碍的类型和位置进行判定。鱼类在上溯成功后也会有折返行为, 而且, 如果涵洞下游流域内还存在其他栖息地, 鱼类没有较强的上溯需求时, 间接法分析的数据结果不能准确反映涵洞内鱼类的通过性。

2.3 虚拟评价法

虚拟评价法即利用计算机软件模拟辅助分析。计算机运算能力强大, 已广泛应用到水利事业中 (王光朋等, 2018; 王学阳等, 2018), 利用软件模拟可以简化分析成本 (李烈等, 2018; 杨培思等 2018), 提高效率 (蒋永强等, 2018)。涵洞过鱼效果评价涉及水力学、鱼类行为学两大领域 (李修峰等, 2006; 方真珠等, 2012)。FishXing 软件则是唯一结合了水力学、鱼类行为学及工程学内容的软件, 不仅能计算涵洞内水力参数, 而且能够模拟鱼类在涵洞内上溯历程。FishXing 通过汇集涵洞信息 (长度、坡度、粗糙系数、入口型式等)、水文信息 (流量、下游水深及水面高程等) 和鱼类信息 (体长、游泳能力、跳跃能力等), 模拟鱼类在涵洞内的上溯过程, 返回障碍类型并以表格、图像和动画的形式输出模拟结果。其内部判断鱼类通过性的障碍分析流程如图 2。

利用 FishXing 软件综合各类数据进行虚拟评价时, 首先根据涵洞布置型式, 判断鱼类能否成功进入涵洞, 然后模拟出涵洞内流场分布特征, 将流场与鱼类游泳能力 (游泳速度、疲劳时间等) 和行为偏好耦合, 能够较准确地模拟涵洞过鱼效果, 不仅判断出障碍类型, 还能定位障碍点, 为优化设计提供参考, 而

且成本低,效率高,可以同时多个涵洞过鱼效果进行评价,因而在实际中广泛应用。部分应用如表 1。

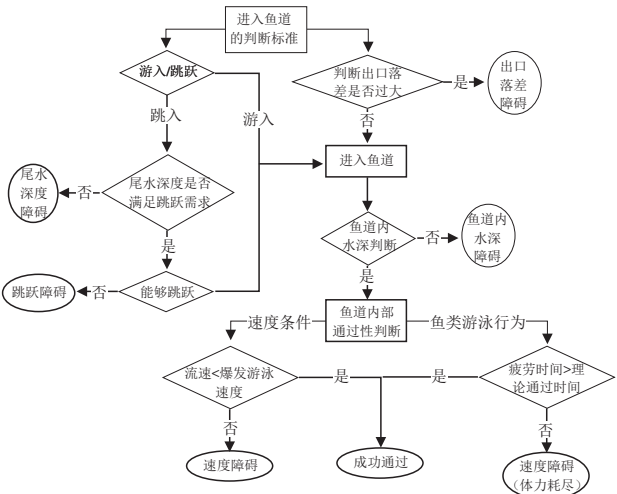


图 2 涵洞内部鱼类通过性判断流程

Fig. 2 Flow chart for judging fish passage through culvert

FishXing 软件有着丰富的参数输入模块,能够很好地模拟工程设计中的各类情况,例如 FishXing 软件中提供了 8 种类进口型式,14 种建材选项,用户在下拉列表种选择进口型式和建材后,软件会自动确定对应的进口损失系数 K_e 和糙率 n ,减少了用户查表核对参数的工作量。其次, FishXing 软件收录了 196 篇文献中 67 种鱼类的各项生理数据,包括体长、全长、叉长数值及比例关系;跳跃高度,游泳能力指标(游泳速度,疲劳时间),以及获取数据的实验方法,实验鱼数量,环境温度等信息。这些信息被整理为数据库存储于软件中,用户在使用时可以根据需要直接调取,也可以自定义上述参数。此外,由于水具有粘滞性,同一断面上流速分布不均匀,靠近边壁流速较小。而鱼类有沿边壁上溯以节省体力的习性,即使断面平均流速

大于鱼类爆发游泳速度,鱼类仍能沿边壁低流速区上溯。FishXing 软件充分考虑鱼类该习性,设置了速度折减系数(Velocity Reduction Factors),即鱼类实际运动区域的流速与断面平均流速比值。

丰富的参数设置使 FishXing 软件在评价过鱼效果时能较全面分析各影响因子,取得较好的模拟精度,但进行虚拟评价时仍需要注意以下几点。

(1)合理选择参数。受环境影响,涵洞实际的进口损失系数和糙率与默认值可能存在差异,疏忽这一影响会降低软件模拟过鱼效果的准确性。用户在实测后自定义参数值,能够显著提升软件模拟精度(Bourne et al, 2011)。

(2)准确量化最小水深。水深不足是涵洞主要过鱼障碍之一,最小水深的取值对软件模拟精度有显著影响。国外研究对最小水深的取值参考了公路涵洞设计规范(Washington Department of Fish and Wildlife, 2003),该规范中建议以鳊为过鱼对象时最小水深取 24 cm。Burford 等(2009)将该值减小为 9.1 cm,发现 FishXing 软件预测准确率只有 17%, FishXing 软件判定 11 个涵洞存在水深障碍,但其中 10 个仍然有鱼类成功上溯。Mahlum 等(2014b)通过试验将最小水深取值降为 4~8 cm(即 2/5 倍鱼类体长), FishXing 模拟准确率上升至 75%。上述研究说明,准确量化最小水深是进行虚拟评价前必须准备工作。

(3)合理选择速度折减系数(Velocity Reduction Factors)。在涵洞等小水体中,速度折减系数对流场的影响较大,主要体现在边界层。胡运桑等(2015)在鲢幼鱼通过水流速度障碍的试验中观察到明显贴壁上溯的行为,指出量化小个体或弱游泳能力鱼类利用边界上溯的规律。涵洞式鱼道主要过鱼对象是小个体或弱游泳能力鱼类,速度折减系数可通过边界层流场影响鱼类上溯行为。因此,合理设置速度

表 1 Fishxing 软件在国内外的实践应用

Tab. 1 Application of FishXing software at home and abroad

年份	地点	应用结果	参考文献
2001	美国加利福尼亚	利用 FishXing 软件对 Little French Creek 涵洞进行改建设计,且建成后过鱼效果良好	许晓蓉等, 2012 方真珠等, 2012
2007	美国特拉诺瓦国家公园	利用鳊和鲢探寻涵洞不同的障碍评估方法之间的差异性,并利用 FishXing 进行辅助工作,发现 FishXing 预测结果与实际值略有差异,但准确性高于快速评估法。而且修正进口损失系数 K_e 、糙率 n 后,预测精度明显提升	Bourne et al, 2011
2008	美国蒙大拿州锡利莱克市	对 45 个不同类型的涵洞过鱼效果进行预测,并进行现场试验验证 FishXing 的准确性。FishXing 预测只有 4 个涵洞能保证鱼类通过,但实际观察结果证明 FishXing 预测的准确率只有 17%	Burford et al, 2009
2009–2011	加拿大特拉诺瓦国家公园	利用 FishXing 预测鳊在纽芬兰特拉诺瓦国家公园河流内的通过性	Mahlum et al, 2014b
2013	湖北省宜昌市	将鲢幼鱼在 PVC 水槽中的通过性与 FishXing 模拟结果对比,发现 Fishxing 不能准确模拟鲢通过水流速度障碍的成功率	胡运桑等, 2015
2016	韩国 Andong 水库和 Imha 水库	利用 FishXing 软件对外来物种大嘴鲈在 Andong 水库和 Imha 水库之间的输水隧道内的通过性进行评估,以寻求生态保护的最好方案	Ji-Woong et al, 2016

折减系数是软件准确模拟鱼类利用边界层流场上游的关键。

(4) 鱼类在不同发育阶段的游泳能力、游泳状态和水力因子的响应存在差异。此外, 环境温度, 氧含量等因素也影响着鱼类游泳能力。在通过试验获取过鱼对象游泳能力数据时, 应注意保证环境因子和实验对象选取符合工程实际。

(5) 软件以鱼类个体为分析对象, 对该“个体”的参数设置直接影响了模拟的准确性。目前, 大多数试验中取游泳能力平均值进行模拟分析, 但由于鱼类存在个体差异, 简单以平均值进行分析不能完全保证最佳过鱼效果, 还要对游泳能力数据进行权重优选后再模拟分析。

综上, 虚拟评价法能够在评价过鱼效果时最大化考虑各类影响因素, 能取得较好的模拟精度, 提高设计效率, 减少后期工程修复成本, 保证尽可能多的鱼类通过涵洞, 取得较好的过鱼效果。

3 展望

尽管国内外对过鱼设施已有深入研究(Bunt et al, 2012; 2016), 但由于涵洞过鱼效果受诸多因素影响, 如涵洞结构型式(涵洞与河流夹角、涵洞长度、坡度、出口型式、建筑材料等)、涵洞内水力特征(流速、流量、上下游水位差等)(Rolls, 2011; 汪亚超等, 2013)、过鱼对象(体长、游泳能力, 行为偏好等)以及环境因子(声、光、水温、pH、溶解氧)、运行管理措施(艾克明, 2010; 吕巍等, 2013)等, 且涵洞内可能存在多种障碍, 因此过鱼效果准确量化仍需深入研究(Kemp et al, 2010)。

涵洞过鱼效果的评价方法各有优劣, 合理选择评价方法能够很好指导涵洞工程建设。在对已建涵洞进行修复时, 可以选用简易评价法快速对流域内多个涵洞进行初步分析, 判明影响河流连通性的关键涵洞, 再用虚拟评价法进行分析, 为修复工程提供参考。在对新建涵洞进行设计时, 可以选用虚拟评价法对初步设计进行优化, 后期再利用监测评价法定量获得准确数据, 然后进一步分析, 优化涵洞设计和完善过鱼效果评价体系。虚拟评价法效率高, 所得数据结果较为准确, 能够最大化节省成本, 减少后期修复压力, 有着巨大的优势与发展前景。为适应国内行业规范和工程实际, 提高虚拟评价法的准确性, 需要在以下几个方面深入研究。

(1) 利用开放水槽创造更接近自然情况的水力

环境, 从而获取更精确的鱼类自主游泳能力数据, 提高虚拟评价法的准确性;

(2) 量化各因素与鱼类跳跃行为和能力的关系, 提高虚拟评价法对“落差障碍”评价的准确性;

(3) 虚拟评价法应在水力计算方法上适度调整, 以适应国内工程设计规范;

(4) 深入研究鱼类运动模式与水力学条件的响应关系, 在爆发游泳和持续游泳模式外, 充分考虑“爆发-滑行”等游泳模式, 并把国内鱼类游泳能力和行为偏好整理成数据库方便直接调用。

参考文献

- 艾克明, 2012. 鱼道水力设计的基本要点与工程实例[J]. 水利科技与经济, 18(10):82-85.
- 方真珠, 潘文斌, 赵扬, 2012. 生态型鱼道设计的原理和方法综述[J]. 能源与环境, (4):84-86.
- 胡晓, 井沛然, 黄利燕, 等, 2018. 涵洞过鱼通道典型挡板水力特性研究[J]. 长江科学院院报, 35(9):68-74.
- 胡运桑, 石小涛, 陈求稳, 等, 2015. 鲢幼鱼通过水流速度障碍的模拟[J]. 生态学报, 35(8):2652-2658.
- 蒋永强, 杨忠勇, 石小涛, 等, 2018. 基于多重水力学因子的竖缝式鱼道中鱼类上溯轨迹模拟[J]. 生态学杂志, 37(4):1282-1290.
- 金志军, 马卫忠, 张袁宁, 等, 2018. 异齿裂腹鱼通过鱼道内流速障碍能力及行为[J]. 水利学报, 49(4):512-522.
- 李烈, 李明泉, 蔡德所, 等, 2018. 基于FLOW-3D的异侧竖缝式鱼道水力特性研究[J]. 广西水利水电, 185(5):5-8.
- 李修峰, 黄道明, 谢文星, 等, 2006. 汉江中游江段四大家鱼产卵场调查[J]. 江苏农业科学, (2):145-147.
- 吕巍, 王晓刚, 2013. 浅议我国鱼道运行管理存在的问题及对策——以洮水洋塘鱼道为例[J]. 水生态学杂志, 34(4):7-9.
- 涂志英, 袁喜, 韩京成, 等, 2011. 鱼类游泳能力研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 20(S1):59-65.
- 王光朋, 查小春, 黄春长, 等, 2018. 河道糙率系数取值变化在古洪水流量重建中的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 32(5):116-122.
- 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.
- 王学阳, 苏晓成, 2018. HEC-RAS模型在猪龙河上多桥壅水分析中的应用[J]. 人民珠江, 39(4):21-24.
- 汪亚超, 陈小虎, 张婷, 等, 2013. 鱼道进口布置方案研究[J]. 水生态学杂志, 34(4):30-34.
- 许家炜, 陈静, 林晨宇, 等, 2018. 齐口裂腹鱼在低照度下的趋光行为[J]. 生态学杂志, 37(8):2394-2402.
- 许晓蓉, 刘德富, 汪红波, 等, 2012. 涵洞式鱼道设计现状与展望[J]. 长江科学院院报, 29(4):44-48.
- 杨培思, 蔡德所, 莫崇勋, 2018. 基于FLOW-3D的竖缝式鱼

- 道水力特性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 43(4): 1675–1683.
- Blank M D, 2008. Advanced studies of fish passage through culverts: One-dimensional and three-dimensional hydraulic modeling of velocity, fish energy expenditure, and a new barrier assessment method[D]. Montana of USA: montana state university: 13.
- Bourne C M, Kehler D G, Wiersma Y F, et al, 2011. Barriers to fish passage and barriers to fish passage assessments: the impact of assessment methods and assumptions on barrier identification and quantification of watershed connectivity[J]. *Aquatic Ecology*, 45(3): 389–403.
- Bunt C M, Castro-Santos T, Haro A, 2012. Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration [J]. *River Research & Applications*, 28(4): 457–478.
- Bunt C M, Castro-Santos T, Haro A, 2016. Reinforcement and Validation of the Analyses and Conclusions Related to Fishway Evaluation Data from Bunt et al.: "Performance of Fish Passage Structures at Upstream Barriers to Migration" [J]. *River Research & Applications*, 32(10): 2125–2137.
- Burford D D, McMahon T E, Cahoon J E, et al, 2009. Assessment of Trout Passage through Culverts in a Large Montana Drainage during Summer Low Flow[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 29(3): 739–752.
- Castro-Santos T, Cotel A, Webb P W, 2009. Fishway evaluations for better bioengineering: An integrative approach[J]. *Challenges for Diadromous Fishes in a Dynamic Global Environment*, 69: 557–575.
- Clarkin K, Connor A, Furniss M J, et al. 2005. National inventory and assessment procedure—for identifying barriers to aquatic organism passage at road-stream crossings [R]. United States Department of Agriculture Forest Service.
- Diebel M W, Fedora M, Cogswell S, et al, 2015. Effects of road crossings on habitat connectivity for stream-resident fish[J]. *River Research and Applications*, 31(10): 1251–1261
- Evans N T, Riley C W, Lamberti G A, 2015. Culvert Replacement Enhances Connectivity of Stream Fish Communities in a Michigan Drainage Network[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 144(5): 967–976.
- Fausch K D, Torgersen C E, Baxter C V, et al, 2002. Landscapes to Riverscapes: Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes[J]. *Bioscience*, 52(6): 483–498.
- Gowan C, Young M K, Fausch K D, et al, 1994. Restricted Movement in Resident Stream Salmonids: A Paradigm Lost?[J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 51(11): 2626–2637.
- Knaepkens G, Verheyen E, Galbusera P, et al, 2010. The use of genetic tools for the evaluation of a potential migration barrier for the bullhead[J]. *Journal of Fish Biology*, 64(6): 1737–1744.
- Januchowski-Hartley S R, Diebel M, Doran P J, et al, 2014. Predicting road culvert passability for migratory fishes[J]. *Diversity and Distributions*, 20(12): 1414–1424.
- Jesse Rush O' Hanley, Tomberlin D, 2005. Optimizing the removal of small fish passage barriers[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 10(2): 85–98.
- Kemp, P S, O' Hanley, J R, 2010. Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis[J]. *Fisheries Management & Ecology*, 17(4): 297–322.
- Lauritzen D V, Hertel F S, Jordan L K, et al, 2010. Salmon jumping: behavior, kinematics and optimal conditions, with possible implications for fish passageway design[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 5(3): 035006.
- Mahlum S, Kehler D, Cote D, et al, 2014a. Assessing the biological relevance of aquatic connectivity to stream fish communities[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(12): 1852–1863.
- Mahlum S, Cote D, Wiersma Y F, et al, 2014b. Evaluating the Barrier Assessment Technique Derived from FishXing Software and the Upstream Movement of Brook Trout through Road Culverts[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 143(1): 39–48.
- Nathan L R, Smith A A, Welsh A B, et al, 2018. Are culvert assessment scores an indicator of Brook Trout, *Salvelinus fontinalis*, population fragmentation? [J]. *Ecological Indicators*, 84: 208–217.
- Negrea C, Thompson D E, Juhnke S D, et al, 2014. Automated detection and tracking of adult Pacific lampreys in underwater video collected at Snake and Columbia River fishways[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 34(1): 111–118.
- Neville H M, Peterson D P, 2014. Genetic monitoring of trout movement after culvert remediation: family matters I[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(11): 1680–1694.
- Nislow K H, Hudy M, Letcher B H, et al, 2011. Variation in local abundance and species richness of stream fishes in relation to dispersal barriers: implications for management and conservation[J]. *Freshwater Biology*, 56(10): 2135–2144.
- Pépino M, Rodríguez M A, 2012. Rodríguez and Pierre Magnan. Fish dispersal in fragmented landscapes: a modeling framework for quantifying the permeability of structural

barriers[J]. *Ecological Applications*, 22(5):1435–1445.

Rolls R J, 2011. The role of life–history and location of barriers to migration in the spatial distribution and conservation of fish assemblages in a coastal river system[J]. *Biological Conservation*, 144(1):339–349.

Timm A, Hallerman E, Dolloff C A, et al, 2016. Identification of a barrier height threshold where brook trout population genetic diversity, differentiation, and relatedness are affected[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 99(2/3):195–208.

Washington Department of Fish and Wildlife, 2003. Design of Road Culverts for Fish Passage[R]. Washington.

Whiteley A R, Coombs J A, Letcher B H, et al, 2014. Simulation and empirical analysis of novel sibship–based genetic determination of fish passage [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(11): 1667–1679.

Wood D M, 2014. Effects of Culverts on Brook Trout Genetic Diversity [D]. West Virginia: West Virginia University: 18–28.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Review of Methods for Evaluating Fish Passage Through Culverts

DENG Xiao-chuan¹, SHI Xun-lei¹, WANG Yong-meng¹, YAN Deng-hua², XV Gang¹, SHI Xiao-tao^{1,3}

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University,
Yichang 443002, P.R.China;

2. Water Resources Department, China Institute of Water Resources and
Hydropower Research, Beijing 100000, P.R.China

3. Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage,
China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China;)

Abstract: As a common water delivery structure, culverts play an important role in connecting rivers but significantly affect fish abundance and community structure. To optimize culvert design, evaluation of fish passage through culverts is necessary to assess how culverts affect fish migration. In this study we first considered the factors that interfere with fish passage through culverts, including the drop between culvert and downstream water level, inadequate downstream water depth, and culvert water velocity and depth. Then, we summarized the methods used to evaluate fish migration through culverts and analyzed the advantages and disadvantages of each method. The simple evaluation method, based on an understanding of the swimming behavior, allows rapid evaluation of culverts, but the results are adequate only for an initial assessment. Measuring fish passage rates directly with monitoring equipment gives accurate results but requires a large, long term effort. Thus, development of an accurate virtual evaluation method would be highly advantageous. FishXing software can comprehensively analyze the factors affecting fish passage, at low cost and high efficiency, and provide accurate information for design optimization. Finally, several suggestions were made for improving the simulation accuracy of FishXing software: (1) Obtain more accurate data on fish swimming ability using open flume testing. (2) Quantify the impact of factors that affect fish jumping by analyzing the relationship between fish jumping behavior and downstream water depth and flow, and the relationship between jumping speed and direction. (3) Modify the parameter input module so that the design can be adapted to local standards. (4) Quantify the response of fish movement patterns to hydraulic conditions.

Key words: culvert; fish passage effectiveness; simple evaluation method; monitoring evaluation method; virtual evaluation method