

综 述

鱼类水力学试验研究进展

杨 宇¹, 高 勇², 韩昌海¹, 侯轶群³, 董杰英⁴

- (1. 水利工程和水科学国家重点实验室, 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 南京 210029;
2. 中国长江三峡集团公司中华鲟研究所, 宜昌 443100;
3. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079;
4. 衡水市水务局规划设计处, 衡水 053000)

Advance of Hydraulic Tests Concerning about Fishes

YANG Yu¹, GAO Yong², HAN Chang-hai¹, HOU Yi-qun³, DONG Jie-ying⁴

- (1. State Key Lab of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P. R. China;
2. Institute of Chinese Sturgeon, China Three Gorges Corporation, Yichang 443002, P. R. China;
3. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Ministry of Water Resources ; Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Science, Wuhan 430079, P. R. China;
4. Water Authority Design Departmen, Hengshui 053000, P. R. China)

摘要:鱼类与水力学之间关系密切而复杂, 鱼类的很多生理和生态特性要通过水力学试验获得, 也要通过水力学特征量表达。鱼类对水环境的需求、鱼类的生理承受力和鱼类的生态承受力等3个方面是分析水利工程对鱼类生态系统胁迫时的主要参照指标, 包括鱼类与水动力、静力、水体空间和物理化学特性等多方面广泛的研究内容, 而水力学试验正是进行这些研究的重要手段。

关键词:鱼类; 水力学试验; 生理承受力; 生态承受力; 过鱼设施

中图分类号:TV13, S956 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2013)04-0070-06

随着水能资源的开发, 人类活动对水生生态系统的影响日益显著。鱼类作为水生生态系统的重要成员, 受到各种工程和非工程措施的胁迫。鱼类终生生活在水中, 其生命过程和生理过程与水的各种特征紧密相连。因此人类在分析鱼类行为以及进行鱼类保护时不可避免地对鱼类进行大量的水力学试验研究。从事相关试验的有鱼类生态学者也有水力学者。鱼类学者需要水力学者提供正确的试验方法和试验设备, 同时水力学者需要鱼类学者提供鱼类生理生态方面的基本理论支持。

鱼类水力学试验是在设计水力学环境下对鱼类的行为和生理特征进行观察和测试。试验目的是分析不同的水力学环境对鱼类的影响以及鱼类对不同水力学环境的响应。根据研究涉及的对象以及时间、空间尺度, 将相关研究划分如表1。

1 鱼类对水环境的需求

与鱼类对水环境的需求最密切的学科是鱼类行为学(Fish Ethology)(何大仁和蔡厚才, 1998; 柴毅等, 2006; 黄晓荣和庄平, 2002)。鱼类行为学是研究鱼类对刺激(包括内部和外部)反应的学科, 研究对象包括行为的模式、行为的进化、行为的遗传、行为的发展和行为的生理机理。鱼类在自然条件下或试验条件下的各种行为, 包括个体行为和群体行为, 也都是鱼类行为学的研究内容。鱼类产生行为的必要条件是刺激。大多数情况下, 外界环境条件的变化

收稿日期: 2013-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(50909064), 水利部公益性行业科研专项(200801105)。

作者简介: 杨宇, 1976年生, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事生态水力学研究。E-mail: yyang@nhri.cn

可以对鱼类产生刺激,如,水温的变化可以促使鱼群开始洄游。内在环境的变化也会对鱼类产生刺激,如饥饿促使鱼类产生索饵行为,性腺成熟刺激鱼类产生生殖行为等。鱼类行为产生过程见图 1。

表 1 鱼类水力学试验研究内容

Tab. 1 The research contents of fish hydraulics tests

研究目标	时间尺度	空间尺度	归类学科
鱼类对水环境的需求	个体生命史	个体特定生命史阶段所处空间	鱼类行为学
鱼类的生理承受力	个体生命史	个体特定生命史阶段所处空间	鱼类生理学
鱼类的生态承受力	种群生态演替	种群全生命史所处空间	鱼类生态学
鱼类的生境特征	特定的生命史阶段	各个生命史阶段所处空间	鱼类生态学、修复生态学
鱼类的生境修复,过鱼设施	目标种特定生命史阶段	目标种特定生命史阶段所处空间	修复生态学

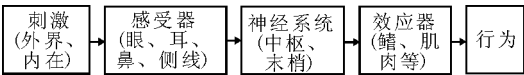


图 1 鱼类行为产生过程

Fig. 1 The procession of fish behaviors generation

在鱼类行为学中进行的鱼类水力学试验,其目的是揭示水流作为一种刺激源对鱼类行为的影响。其研究方法是对鱼类在特定的水流条件下的行为进行反复观察,记录、分析鱼类对特定的水流条件的响应行为模式。在个体鱼行为的基础上,部分学者对在不同的水力学环境中鱼群整体的行为也进行了比较深入的研究(Goodwin R A et al,2006)。

鱼类的趋流性是鱼类水力学试验的研究重点之一。趋流性是鱼类的一种重要的趋性(除此以外还包括趋光性、趋触性和趋底性等),鱼类能根据水流的方向和速度随时调整自身的游向和游速,使自身保持逆流游泳状态或长时间地停留在某一特定的位置。鱼类趋流性的产生主要来自于 3 种感觉:视觉(何大仁和蔡厚才,1998)、触觉(Loeb J, 1918)和水流感觉(Lyon E P,1904)。现在普遍认为,正常鱼类的趋流性是各种感觉的综合作用所决定的。用于研究趋流性的具体指标包括:感应流速、偏好流速、极限流速等。

感应流速是指鱼类刚刚可以产生反应的流速值,又称为起点流速。偏好流速是指在鱼类能克服的流速范围内对它们游动最为适合的流速范围,鱼常喜欢聚集在这个流速范围内顶流前进。极限流速是指鱼类所能克服的最大流速。

一般使用如图 2 所示的试验水槽研究鱼类趋流性。水槽上下游设有进出水装置可以调节水槽内的流速、流量,利用流速仪实测流速或者通过流量计计算流速。也可以使用如图 3 (IAN S,1991)、图 4 所示的装置在实验室或野外测量鱼类的最大可持续泳速等指标。

研究者获得了一些普遍的趋流性规律:游泳能力强的鱼类,其体型大多呈纺锤形;而具有侧扁形、

平扁形等体型的各种鱼类,其游泳能力往往都很弱。鱼类极限流速与体型的关系也与此相类似。栖息在溪流中的香鱼、雅罗鱼等鱼类的趋流性比栖息在流缓或无流的湖泊中的鲫、鲤等鱼类强。无论极限流速还是偏好流速,都是随着体长的增大而提高的(Tudorache C et al,2008; Tytell Eric D,2004)。大鱼一般都具有很强的趋流性,而幼鱼的趋流性往往都很弱,一般总是漂流的(何大仁和蔡厚才,1998)。

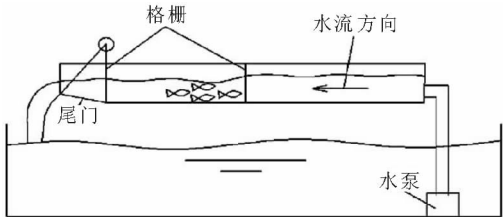


图 2 用于测试鱼类趋流性的试验水槽

Fig. 2 Test flume for studying rheotaxis

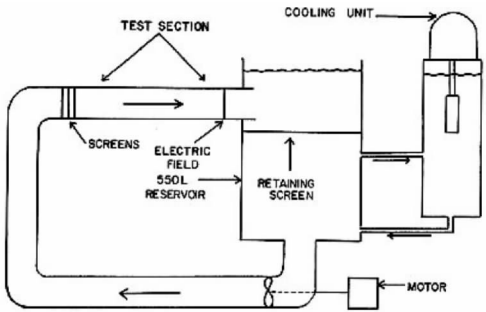


图 3 有压流趋流性试验装置

Fig. 3 Rheotaxis test instrument with pressure flow

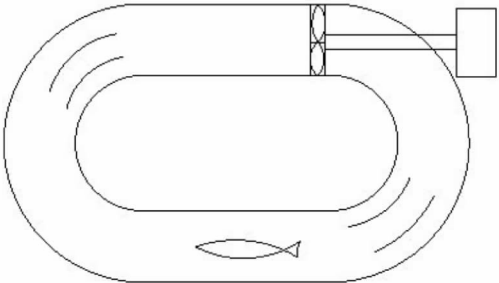


图 4 卧式趋流性试验装置

Fig. 4 Horizontal type rheotaxis test instrument

对于不适合进行水槽试验的大型鱼类,可以通过调查栖息地水力学特征的方法获得其偏好流速。国家水产总局鲟鱼克流试验组(1979)在南京水力学研究所对中华鲟幼鱼进行了水槽试验,同时在长江中上游对中华鲟成鱼的克流能力进行了野外调查。YANG Yu等(2006)进一步对中华鲟栖息地进行详尽调查,危起伟(2003)、谭细畅(2002)、YANG Yu等(2006)结合鱼探仪探测成果获取了中华鲟的偏好流速和偏好水深。

2 鱼类的生理承受力

有些关于鱼类的水力学试验用于分析鱼类的水动力感应和水流对鱼类的伤害,通常要对鱼类生理特征进行检查。比如,分析鱼类通过哪些感受器感应水的波动或者流动;检验多高的流速会使鱼类因游泳疲劳造成运动伤害;何种复杂流场(高脉动、高剪切力)会对鱼类造成何种影响;还包括高坝下泄水流造成的气体过饱和达到何种程度才会引起鱼类气泡病以及鱼类通过水轮机或者溢洪道等造成的伤害。

2.1 水动力感应和承受力

鱼类用于感应水动力的器官主要是侧线。当水流冲击身体时使侧线感受器的感觉顶发生倾斜,位于下部的感觉细胞发出神经冲动,鱼类就对水流产生了感觉。Hofer(1908)以狗鱼为实验材料首次肯定了侧线感觉水流的机能。Dijkgraaf(1963)运用实验生物学方法对侧线的水流感觉机能作了更深入的研究,认为根据水流扰动感知在一定距离处运动的饵料、敌害和同伴是侧线器官的主要机能。侧线在鱼类的索饵、洄游、集群、生殖及防御等各种生活过程中均有一定的作用。

鱼类在通过鱼道等水利工程时,由于持续游动得不到休息,有时会引起因无氧代谢超过正常水平、体内乳酸堆积过多而造成中毒死亡。为避免这种伤害,在设计鱼道时,一般要进行目标种最大可持续泳速的测定。持续速度的最大值为最大可持续泳速或称临界泳速(CSS),测试方法包括恒定流速法和递增流速法。

在恒定流速测试中,鱼被置于恒定的流速中,先允许鱼在水槽中适应一段时间,然后突然或者半突然的增到试验所需流速。Brett(1964)记录中1尾鱼在4.8 BL/s的流水中逆流92 h,另1尾鱼在3.7 BL/s的流水中逆流97 h。Walker(1971)则使得Saite在2.1~3.0 BL/s的流速中游动42 d。Beam-

ish(1966)认为,鱼能够持续游240 min的泳速,是持续(连续并且有氧)泳速。但是,Brett(1967)建议持续泳速是维持时间最长为200 min的泳速。

递增流速法是把鱼放入一个流速逐步递增的水域中,用半数忍耐力(TL_m)方法统计临界速度,即如果有50%的测试鱼能够克服某一流速值,并在特定的时间内能够成活,则称为半数忍耐力,该流速值为这种鱼的临界泳速(U_{crit}),其计算公式为:

$$U_{crit} = V_p + \left(\frac{t_f}{t_i} \times V_i \right) \quad (1)$$

其中: V_i 是增速大小, V_p 是鱼极限疲劳的前一个水流速度, t_f 是上次增速到达极限疲劳的时间, t_i 是两次增速的时间间隔。侯铁群(2010)利用图2的水槽测量了长江流域多种本地鱼类的临界泳速并计算得其无量纲速度和无量纲尾频之间的关系。

2.2 复杂流态对鱼类的影响

研究(Tytell Eric D, 2006; Liao James C et al, 2003)表明,不同的紊动尺度、漩涡和切应力强度对不同种类、不同生长阶段的鱼类有一定的伤害。Coutant和Whitney(2000)研究发现,洄游鱼类利用河流中的紊动提高在水中的游动速度。Morgan等(1976)利用直径为30.5 cm的圆桶模拟漩涡,研究紊动对鱼卵和幼鱼的影响,分析幼鱼的死亡率与水流剪切力关系并提出了一个回归方程,进一步指出,轮船船壳与水摩擦以及推进器产生的巨大紊流在瞬间不会对幼鱼造成致命的伤害。Killgore等(2001)利用推进器模型在水槽中研究了紊动与剪切力对幼鱼的影响,大部分鱼类在紊动强度较高的条件下死亡率较高。Groves(1972)通过喷嘴在水箱中利用淹没射流模拟紊动,研究紊动对大麻哈鱼幼鱼的影响,当喷口流速为9 m/s时鱼的损伤率和死亡率为0,当喷口流速为15 m/s时鱼的损伤率为59%;鱼类产生明显的损伤大部分集中在鱼类的头部,鱼类体长越小越容易受伤。

2.3 过饱和气体对鱼类的影响

鱼类气泡病是由于水中气体分压总和超过大气压即气体过饱和造成的鱼类身体损伤或死亡的疾病(谭德彩等,2006; Lutz Donna Schulze, 1995)。1905年,Marsh和Gorham第1次具体地描述了气栓在鱼类血液循环系统的形成过程和危害程度(Marsh, 1910)。20世纪60年代,哥伦比亚河和斯内克河的气体过饱和现象,造成下游鱼类产生了严重的气泡病,对于高坝下泄水造成的气体过饱和问题才逐渐为人们所重视。Dawley和Ebel(1975)、Ebel(1969)

研究了哥伦比亚河流中氮气过饱和对大马哈鱼和虹鳟的影响,Beiningen等(1970)研究了 John Day 大坝中溶解氮气对斯内克河大马哈鱼的影响。国外的很多研究表明,由于高坝泄流引起的气体过饱和,造成鱼类气泡病会使大量的鱼类死亡(Lutz Donna Schulze,1995; Geldert D A et al,1998; Orlins J J & JS Guliver,1998; Weitkamp D E,2000)。蒋亮(2008)通过野外观测获得了多个高坝下游的过饱和气体情况,并分别利用高压釜、高速射流装置和充气水塔分析气体过饱和产生的原因。董杰英(2011)在实验室中利用循环高压水箱对鲢等多种常见鱼进行了溶解气体耐受性试验,并在三峡泄洪期间在葛洲坝江段对鱼类气泡病发病情况进行了野外试验和调查。

2.4 鱼类通过水利工程的损伤

鱼类通过水利工程一般有3种途径,即电站、泄洪建筑物和鱼道。鱼道是鱼类通行的正常途径,一般具有上下游双向通过性。电站和泄洪建筑物是非正常的通过途径,鱼类只能从上游到下游单向通过。Turnpenny等(1992)在实验室中利用喷嘴,在水箱中通过淹没射流的方式模拟水轮机组的剪切力,观测鱼的损伤率与死亡率,试验结果显示射流速度增加,水流切应力增加,鱼类损伤率和短期死亡率也随之增加。Heisey等(1993)对哥伦比亚河流域的6个水电站进行了38次测量,在溢洪道下游,鱼类的损伤率为0~7.0%,鱼类丧失平衡能力的概率为0.1%~4.7%;并进一步综述了鱼类通过水力发电机组的损伤率,在他们总结的10项研究报告中,因为紊动影响鱼类丧失平衡能力的概率为0.4%~4.1%。最近的研究成果显示,1.2%的鱼类通过发电机组后丧失平衡能力。高勇(2008)在葛洲坝水利枢纽进行了鱼类通过水轮机成活率的试验,试验表明低水头径流式水轮机过鱼成活率较高。

3 鱼类的生态承受力

长期的生态压力将造成鱼类种群演替模式的改变,尤其对其种内和种间关系造成影响。鱼类生态学是研究鱼类的生活方式、鱼类与环境之间相互作用关系的一门学科。具体地讲,鱼类生态学是研究环境对鱼类年龄、生长、呼吸、摄食和营养、繁殖、早期发育、感觉、行为和分布、洄游、种群数量消长以及种内和种间关系等系列生命机能和生活方式的影响以及作用规律和机理,而且研究鱼类对环境的要求、适应和所起的作用。

3.1 鱼类栖息地特征获取

鱼类栖息地水力学特征的获取、模拟和修复是目前鱼类生态水力学的主要研究内容。随着定位技术和超声学的发展,栖息地水力学特征获取也日益便利(YANG Yu等,2006; Shields FDouglas Jr et al,1995; Nystrom Elizabeth A,2002)。ADCP可以对研究区域的水力学特征进行较为详细的获取;高分辨率探鱼仪,如DIDSON可以对图像进行种级的鉴定(Holmes J A et al,2006; Boswell K M,2008)。

3.2 鱼类栖息地模拟

鱼类栖息地的模拟包括物理模拟和数值模拟,由于物理模拟的比尺效应和高昂的成本,其发展较慢。而利用一维、二维甚至三维水力学模型对鱼类的栖息地水力学环境进行模拟取得了巨大的进步(Crowder David W,2002; Crowder David W & Panayiotis Diplas,2000; Kerle et al,2002),并且发展了诸如PHABSIM方法(Center Midcontinent Ecological Science,2001)、IFIM方法(Stalnaker Clair et al,1995)和WESP-TOOL模型(Lorek Helmut & Michael Sonnenschein,1999)等。

4 过鱼设施试验研究

过鱼设施水力学试验开展的比较早,发展得也比较完善(Clay C H,1995; 南京水利科学研究所,1982; Hegberg Charles H et al,2001; Cocks John,1993; Katopodis C et al,1997)。目前此类试验已经成为水工水力学试验中的一项重要内容。

试验通过建立鱼道、鱼梯、升鱼机等过鱼设施的模型,对其水流条件进行模拟,研究其流速分布(Weber Nicole S et al,2002),以保证目标种能安全迅速地通过过鱼设施。很多研究表明:各过鱼设施入口处的流速和流态才是吸引鱼类的关键。试验以鱼类行为学研究结果为基础,以水工水力学为技术支撑。随着计算流体力学(CFD)的发展,越来越多的过鱼设施可以通过数值模拟获得其流速分布(Sotiropoulos Fotis & Yiannis Ventikos,1997)。随着生态水力学中栖息地修复理论的进一步发展,仿自然工法的过鱼设施和低坡度的生态旁通道型的过鱼设施也开始逐渐推广(Katopodis C et al,2001)。

5 结语

随着人口的增加和生态环境的退化,天然河流的鱼类资源正在走向衰退。人们对鱼类的生存环境日益重视。在水利水电工程中建设鱼类保育措施已经成为工程立项的基本条件。同时在生态脆弱区进

行本地鱼类种群的恢复也成为可持续发展的重要环节。因此,应将鱼类生态学和生态水力学进行更深入系统的学科交叉。以鱼类生态学为基本框架,结合鱼类行为学、鱼类生理学,建立以研究水力学在鱼类生态保护中作用的鱼类生态水力学理论,并进一步探索水流在鱼类生态问题中的作用规律和作用机理,发展过鱼设施水力学和鱼类栖息地修复水力学。

参考文献

- 柴毅,谢从新,危起伟. 2006. 鱼类行为学研究进展[J]. 水利渔业, (3): 1-2.
- 董杰英. 2011. 大坝泄洪致河道溶解气体过饱和及其对鱼类的影响[D]. 南京:河海大学.
- 高勇. 2008. 低水头径流式水利枢纽过鱼能力与过鱼措施功能设计[R]. 宜昌:中国三峡工程总公司.
- 国家水产总局鲟鱼克流试验组. 1979. 中华鲟克服流速试验报告[R]. 沙市:长江水产研究所.
- 黄晓荣,庄平. 2002. 鱼类行为学研究现状及其在实践中的应用[J]. 淡水渔业, (6): 53-56.
- 何大仁,蔡厚才. 1998. 鱼类行为学[M]. 厦门:厦门大学出版社.
- 侯铁群. 2010. 洄游鱼类的过坝能力试验与鱼道数值模拟[D]. 南京:河海大学.
- 蒋亮. 2008. 高坝下游水体中溶解气体过饱和问题研究[D]. 成都:四川大学.
- 南京水利科学研究所. 1982. 鱼道[M]. 北京:电力工业出版社.
- 谭德彩,倪朝辉,郑永华. 2006. 高坝导致的河流气体过饱和及其对鱼类的影响[J]. 淡水渔业, (3): 21-25.
- 谭细畅. 2002. 长江中华鲟繁殖群体数量和东湖放养鱼类资源量的水声学评估[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所.
- 危起伟. 2003. 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所.
- 杨宇,胡亚安,韩昌海. 2010. 一种鱼类气泡病试验装置:中国, 201020153549 [P].
- Boswell K M, M P Wilson, J H Cowan Jr. 2008. A semiautomated approach to estimating fish size, abundance, and behavior from dual-frequency identification sonar (DIDSON) data[J]. North American Journal of Fisheries Management, (3): 799-807.
- Beamish F. 1966. Vertical migration by demersal fish in the Northwest Atlantic[J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 23 (1): 109-139.
- Beiningen K T, W J Ebel. 1970. Effect of John Day Dam on dissolved nitrogen concentrations and salmon in the Columbia River, 1968[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 99 (4): 664-671.
- Brett J R. 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon[J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 21 (5): 1183-1226.
- Brett J R. 1967. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature[J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 24 (8): 1731-1741.
- Center Midcontinent Ecological Science. 2001. PHABSIM for Windows User's Manual and Exercises[R]. Department of the Interior U S Geological Survey.
- Clay C H. 1995. Design of fishways and other fish facilities; 2nd [M]. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Cocks J. 1993. A Fishway on the Nokomai[J]. New Zealand Engineering, 48 (2): 18.
- Coutant C C, R R Whitney. 2000. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 129 (2): 351-380.
- Crowder David W. 2002. Reproducing and Quantifying Spatial Flow Patterns of Ecological Importance with Two-Dimensional Hydraulic Models [D]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Crowder David W, Panayiotis Diplas. 2000. Evaluating spatially explicit metrics of stream energy gradients using hydrodynamic model simulations [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, (7): 1497-1507.
- Dawley E M, W J Ebel. 1975. Effects of various concentrations of dissolved atmospheric gas on juvenile chinook salmon and steelhead trout[J]. Fishery Bulletin, 73 (4): 787-796.
- Dijkgraaf S. 1963. The Functioning and Significance of the Lateral Line Organs [J]. Biological Reviews, 38: 51-106.
- Ebel W J. 1969. Supersaturation of nitrogen in the Columbia River and its effect on salmon and steelhead trout [J]. Fishery Bulletin, 68 (1): 1-11.
- Geldert D A, J S Gulliver, S C Wilhelms. 1998. Modeling dissolved gas supersaturation below spillway plunge pools[J]. Journal of Hydraulic Engineering, (5): 513-521.
- Goodwin R A, Nestler J M, Anderson J J. 2006. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM) [J]. Ecological Modelling, (1-2): 197-223.
- Groves A B. 1972. Effects of Hydraulic Shearing Actions on Juvenile Salmon: Summary Report [OL]. http://scholarworks.umass.edu/fishpassage_unpublished_works/102.
- Hegberg Charles H, Susan Jacobs, P Alan Schlindwein. 2001. Fish Passage in Urban Streams Part 1: Regulatory and Re-

- source Issues. Atlanta, GA, USA.
- Heisey, G Paul. 1993. Fish injury and mortality in spillway and turbine passage. *Water Power* 95 [M]. 1417–1423.
- Hofer B. 1908. Studien über die Hautsinnesorgane der Fische [J]. *Berichte der Königlich Bayerischen Biologischen Versuchsstation München*, 1:115,64.
- Holmes J A, G M Cronkite, et al. 2006. Accuracy and precision of fish-count data from “a dual-frequency identification sonar” (DIDSON) imaging system [J]. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 63 (3): 543–555.
- IAN S, HARTWELL ROBERT G OTTO. 1991. Critical Swimming Capacity of the Atlantic Silverside, *Menidia menidia* L [J]. *Estuaries*, (2): 218–221.
- Katopodis C, N Rajaratnam, et al. 1997. Denil fishways of varying geometry [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123 (7): 624–631.
- Katopodis C, J A Kells, et al. 2001. Nature-like and conventional fishways: Alternative concepts? [J]. *Canadian Water Resources Journal*, 26(2): 211–232.
- Kerle F, F Zollner, et al. 2002. Modelling of long-term fish habitat changes in restored secondary floodplain channels of the river Rhine [C]. *Conference Proceedings of the Fourth EcoHydraulics Symposium*.
- Killgore K J, S T Maynard, et al. 2001. Evaluation of propeller-induced mortality on early life stages of selected fish species [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 21(4): 947–955.
- Liao James C, David N Beal, George V Lauder. 2003. The Karman gait: novel body kinematics of rainbow trout swimming in a vortex street [J]. *J Exp Biol*, (6): 1059–1073.
- Loeb J. 1918. Forced movements, tropisms, and animal conduct [M]. *JB Lippincott Company*: 224–227.
- Lorek Helmut, Michael Sonnenschein. 1999. Modelling and simulation software to support individual-based ecological modelling [J]. *Elsevier Science*, 115: 199–216.
- Lutz Donna Schulze. 1995. Gas Supersaturation and Gas Bubble Trauma in Fish Downstream from a Midwestern Reservoir [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, (3): 423–436.
- Lyon E P. 1904. On rheotropism. I. Rheotropism in fishes [J]. *American Journal of Physiology—Legacy Content*, 12: 149–161.
- Marsh M C. 1910. Notes on the dissolved content of water in its effects upon fishes [J]. *Bulletin of the U S Bureau of Fisheries for 1908*, 28: 891–906.
- Morgan R P, R E Ulanowicz, et al. 1976. Effects of shear on eggs and larvae of Striped Bass, *Morone saxatilis*, and White Perch, *M. americana* [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 105(1): 149–154.
- Nystrom Elizabeth A, Kevin A Oberg, Chris R Rehmann. 2002. Measurement of Turbulence with Acoustic Doppler Current Profilers—Sources of Error and Laboratory Results [C]// Tony L Wahl. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference*. Estes Park, Colorado, USA.
- Orlins J J, J S Gulliver. 2000. Dissolved gas supersaturation downstream of a spillway. II: Computational model [J]. *Journal of Hydraulic Research*, (2): 151–159.
- Shields F Douglas Jr, Charles M Cooper, Scott S Knight. 1995. Experiment in stream restoration [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, (6): 494–502.
- Sotiropoulos Fotis, Yiannis Ventikos. 1997. Virtual fish concept: Numerical prediction of fish passage through hydraulic powerplants.
- Stalnaker Clair, Berton L Lamb, Jim Henriksen. 1995. The In-stream Flow Incremental Methodology A Primer for IFIM [R]. Washington, D C: U S Department of the Interior National Biological Service.
- Tudorache C, P Viaene, R Blust. 2008. A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, (2): 284–291.
- Turnpenny A W, M H Davis, et al. 1992. Experimental Studies Relating to the Passage of Fish and Shrimps Through Tidal Power Turbines [R].
- Tytell Eric D. 2004. The hydrodynamics of eel swimming II. Effect of swimming speed [J]. *J Exp Biol*, (19): 3265–3279.
- Tytell Eric D. 2006. Median fin function in bluegill sunfish *Lepomis macrochirus*: streamwise vortex structure during steady swimming [J]. *J Exp Biol*, (8): 1516–1534.
- Walker M G. 1971. Effect of starvation and exercise on the skeletal muscle fibres of the cod (*Gadus morhua* L) and the coalfish (*Gadus virens* L) respectively [J]. *Journal du Conseil*, 33(3): 421–427.
- Weber N S, D M Joy. 2002. Use of a scale model to design fishway resting pool improvements [J]. *Canadian Water Resources Journal*, 27 (4): 401–426.
- Weitkamp D E. 2000. Total dissolved gas supersaturation in the natural river environment [R]. Washington: Chelan County Public Utility District No 1.
- YANG Yu, YAN Zhong-min, CHANG Jian-bo. 2006. Assessing Chinese Sturgeon Spawning Ground by Using Acoustic Doppler Current Profiler to Measure River Velocities [C], *International Symposium on Flood Forecasting and Water Resources Assessment for IAHS-PUB*. Beijing, China.