

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.007

鳗鱼道堰面加糙的过鱼效果评价

刘超^{1,2}, 张世宝¹, 王二平¹, 谭智天¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046;
2. 中国水利水电建设工程咨询北京有限公司, 北京 100024)

摘要: 为保护我国鳗鲡资源, 解决低水头水工建筑物对幼鳗洄游上溯的阻隔效应, 以2017年6—8月试验资料为基础, 对堰面加糙鳗鱼道的过鱼效率、鳗鲡行为轨迹和游泳速度等进行评价。结果表明: 试验组(下游堰面镶嵌加糙块)和对照组(下游堰面不做处理)的过鱼效果差异明显, 上溯成功率分别为 $82.5\% \pm 2.5\%$ 和 $13\% \pm 4.79\%$ 。与对照组相比, 试验组幼鳗在上溯过程中较为活跃, 其上溯形式与蛇类爬行相似, 呈现S形、Z形和直线形且边缘趋向运动较为明显, 是一种典型的爆发游泳登上堰顶的行为, 单次最大爆发游泳速度高达 0.66 m/s 。
关键词: 鳗鱼道; 模型试验; 过鱼效率; 堰面加糙; 上溯洄游; 行为特征; 游泳能力
中图分类号: S956.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)02-0136-07

Study on elver passing efficiency for weir surface roughing of eel channel

LIU Chao^{1,2}, ZHANG Shibao¹, WANG Erping¹, TAN Zhitian¹
(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. Beijing Co., Ltd. of China Water Resources and Hydropower Construction Engineering Consulting, Beijing 100024, China)

Abstract: In order to protect elver resources in China and to solve the obstruction effect of low-head water-power engineering in the back migration of elvers, based on the indoor monitoring data from June to August, 2017, the passing efficiency of fishway, trajectory of behavior and swimming speed were evaluated by statistical analysis for the eel channel with weir surface roughing. This study shows that the passing efficiency was significantly different between the experimental group (with rough on the downstream face) and the control group (without rough on the downstream face), the migration success rates of which were $82.5\% \pm 2.5\%$ and $13\% \pm 4.79\%$, respectively. Compared to the control group, the elvers of the experimental group were more active in the process of back migration and its form was like the snake crawling, which showed S, Z and straight type. Besides, the edge-oriented movement was more obvious, and was a typical kind of behavior of climbing to the top of a weir though a typical burst swimming events, the maximum explosive speed of which reaches up to 0.66 m/s .
Key words: eel channel; model test; passing efficiency; weir surface roughing; back migration; behavior characteristics; swimming ability

日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)是一种经济价值较高的降河洄游鱼类^[1], 在我国主要分布于长江、珠江流域及附近沿海^[2-3]。性成熟后银鳗降河到马里亚纳群岛的西部海域^[4]产卵, 亲本死亡; 孵出幼体称柳叶鳗(*Leptocephalus*), 跟随洋流漂浮到河口前变成白色透明的鳗苗, 俗称玻璃鳗^[5](*Glass eel*); 随后4—9月上溯洄游进入河川生长^[6]。由于鳗鱼生活习性的特殊性, 人们对鳗鱼的认知较少, 加上近年来我国水利工程(如堰、坝)建设的快速发展阻碍了鳗鲡的洄游上溯, 导致适应鳗鲡生长的河流环境发生改变, 与过去30年里欧

作者简介: 刘超(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工模型试验与数值分析研究。E-mail: abaliuchao@163.com
通信作者: 张世宝, 教授。E-mail: zhangshibao3655@163.com
引用本文: 刘超, 张世宝, 王二平, 等. 鳗鱼道堰面加糙的过鱼效果评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 136-142.
LIU Chao, ZHANG Shibao, WANG Erping, et al. Study on elver passing efficiency for weir surface roughing of eel channel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2): 136-142.

洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)数量下降相似^[7]。鳗鱼的生物资源量逐渐枯竭,处于濒危等级,其中花鳗鲡(*Anguilla marmorata*)被列为国家二级保护动物。因此保证鳗鱼洄游路线的畅通性对延缓该种群的衰退至关重要。

鱼道在一定程度上可减缓水利工程对生态环境造成的负面影响,从而增强其生态相容性^[8-10]。传统的鱼道一般是通过一系列梯级水池,消耗水流能量,使水流流速降低到目标物种的游泳能力范围,有利于游泳和跳跃能力较强的鱼类洄游上溯,但对于游泳能力较差的鱼类过鱼效果较差^[11-12]。上溯洄游阶段的幼鳗游泳能力较弱,跳跃能力差^[8,13-15],很难逾越相邻水池之间的落差,一般认为传统鱼道对于鳗鲡这种特殊种群是无效的;但是,鳗鲡能够利用粗糙表面或被植物覆盖堰面的微弱水流向上攀爬^[5,16],因此鳗鱼道的设计原理就是利用自然或人造建筑为鳗鱼上溯提供攀爬条件。国外学者研究表明鳗鱼道堰面加糙块产生的湍流,对鳗鱼更具有吸引力,湍流被认为是鳗鱼上溯的潜在因素^[17]。在国外鳗鱼道通常被设计成斜坡,坡度控制在 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间,宽度通常为 $0.2\sim 1\text{ m}$ ^[5],通常紧邻传统鱼道^[18]。常见的鳗鱼道形式为堰面镶嵌毛刷、混凝土块、碎石、PVC 螺柱等加糙的斜坡^[19]。但有学者认为随着时间的推移,堰面镶嵌的毛刷通道容易被杂物堵塞,会影响鳗鲡上溯成功率^[20]。虽然堰面镶嵌不同密度的碎石^[21]或PVC^[22]螺柱管有助于鳗鲡顺利上溯,但是对于鳗鱼道过鱼效果的可靠性评价却很少^[17],并且鳗鲡在试图上溯攀登时,缺乏上溯过程中的游泳行为研究,导致所建鱼道过鱼效果不理想^[23]。有学者认为缺乏行为研究的鱼道设计是失败的^[24]。我国在早期并未开展鳗鱼道的相关研究,但是在渔业捕捞^[1]、鳗鲡养殖^[25]、生活习性^[5]等方面有一定研究,近年来有学者对日本鳗鲡的迁移特点进行分析^[26],旨在为我国鳗鱼的保护提供建设性意见。根据调查,我国现有的鱼类保护措施大多采用增殖放流^[27],现有新建鱼道运行时间及监测结果较短,缺乏数据进行有效性评估^[28]。

本文拟通过室内模型试验,探索堰面加糙后(PVC 螺柱)鳗鱼道的过鱼效率、上溯轨迹和行为偏好,为我国鳗鱼道的建设提供些许建议,有助于解决我国南方进海口地区鳗鱼的洄游需求,延缓鳗鱼资源日渐枯竭的趋势,对保护鳗鲡栖息地和恢复河流生态健康具有重大的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用鱼取自珠江水系封开河段,均为体质健康的野生幼鳗。由于向内河上溯阶段的鳗鱼处于青少年阶段,因此对试验用鱼的要求较为严格,平均每尾长度控制在 $(143\pm 13.6)\text{ mm}$ 范围内,平均体宽 $l=(10\pm 1.82)\text{ mm}$ 。试验期间共捕获幼鳗60尾,暂养在珠江河口海岸试验基地的水槽(长8 m,宽0.5 m,水深0.6 m)中,养护期间保持水持续流动。控制水温由原河段的 $15.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以每日 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速度上升,直至实验室水温 $(19.3\pm 1.19)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。定期投放轮虫饵料,并及时清除残渣,保证水体的干净。由于试验用鱼的特殊性,无法像普通鱼一样进行一次性试验,故而每次随机抽取20尾,试验后将鱼放回水槽。为了避免幼鳗对试验环境产生适应而影响试验可靠性,所有试验均在上次试验3 d 后进行,试验结束后将鱼全部放生到原来河段。

1.2 试验装置

试验在水利部珠江河口海岸试验基地完成。鳗鱼道物理模型设计成斜坡形式,由蓄水池、集鱼装置、主槽道、坡度调节装置、盖子、弯道鱼池等构成完整的循环水系统(图1)。基于国外对鳗鱼道尺寸设计成果^[6],试验设计主槽道长3 000 mm,宽525 mm,厚20 mm,鳗鱼道底部安装可调节装置,试验控制坡度 30° 。鳗鱼道底板用水泥砂浆刮制而成,糙率 $n=0.014$,厚度为20 mm,用长度为30 mm 的PVC 管,间隔55 mm(垂直镶嵌在堰面上,镶嵌深度控制在10 mm)作为幼鳗上溯爬行的梯子。下游设置弯道鱼池,主要是为了检验野生鳗鱼是否可以找到鳗鱼道的入口。为了尽可能营造相似的野生环境,在下游弯道鱼池内布置级配不均匀的鹅卵石及水草。分别

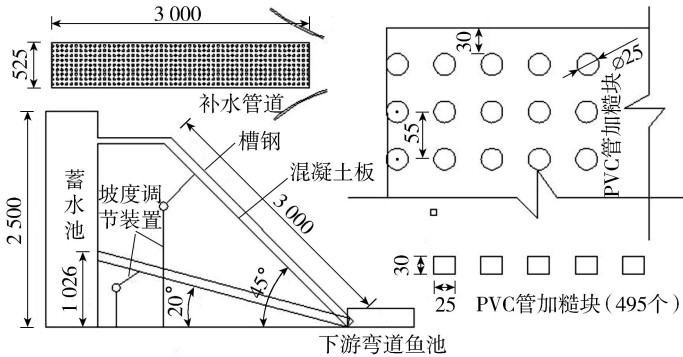


图1 试验装置结构(单位:mm)
Fig.1 Test device(units:mm)

在鱼池弯道、鳗鱼道入口、出口以及中间位置分别安装一台红外高清摄像头(海康:DS-2CD3T36WD-I3)和弱光12 W的灯泡,以便在夜间观测和记录每一尾鳗鱼的行为轨迹及统计幼鳗上溯成功率。

试验进行前将鱼池用水浸泡并洗刷干净,曝气48 h,试验水温(20 ± 1.19) $^{\circ}\text{C}$,溶解氧约为7.8 mg/L。试验所用流量通过电磁流量计(开封牌,图3)进行控制。由于鳗鱼通常在夜间活动,为了试验的准确性和科学性,故试验时间设置在20:00至22:00(基于幼鳗上溯试验,最终确定一组试验时间为2 h)。基于国外学者对幼鳗游泳能力的研究,为降低幼鳗在下游鱼池体能的消耗,试验前对单宽流量进行比选,使下游鱼池平均流速小于 0.3 m/s ^[14]。本文共设置对照组(下游堰面不做处理)和试验组(下游堰面镶嵌PVC加糙块)2组试验。在保证堰面坡度(30°)、单宽流量($4.47\text{ m}^2/\text{h}$)、下游水位(50 mm)不变的情况下,在堰面增加PVC管,探索堰面加糙对幼鳗上溯成功率的影响。每次试验开始前从水槽中随机抽取20尾体质健康的幼鳗放入下游鱼池环形渔网中,并打开摄像机旁的灯泡,期间保证水的流动性,静置2 h后将下游水位调至50 mm,并同时打开4台摄像机对试验期间幼鳗上溯运动行为进行连续录像,以分析其在上溯过程中的行为特征及行为轨迹。每次试验结束时将上游集鱼箱中鱼取出,放入暂养池暂养,3 d后进行下次试验。为了减小试验结果的随机性和增加数据准确性及科学性,每组试验重复6次。

1.3 数据处理与统计

当鳗鲡试图攀爬鳗鲡梯或成功攀爬鳗鱼道时,用4台高清摄像机记录下其攀爬的行为轨迹,对所记录的视频进行分析时需要量化过鱼效率、鳗鱼上溯行为及堰面位置、鳗鲡上溯速度。

过鱼效率:从一次试验开始至试验结束的过程中,当鳗鱼的身体成功穿越鳗鱼道进入上游集鱼装置并停留5 min以上,视为鳗鲡成功通过。过鱼效率定义为成功通过鳗鲡的数量占该次试验鱼总量的百分比,以 θ 表示(式1)。

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^k m}{kN} \times 100\%$$

(1)

式中: m ——每次试验成功上溯鳗鲡的数量; k ——每组试验的次数; N ——该次试验鱼的数量。

鳗鲡上溯行为及堰面位置:鳗鲡不同于其他鱼类,根据其攀爬能力强,游泳能力差的特性,研究不同糙率下鳗鲡上溯行为轨迹过程显得尤为重要。本文采用高清摄像机记录鳗鲡的攀爬过程,并对其进行分析,然后将其攀爬行为进行分类。

为了记录鳗鲡在堰面上的位置,将鳗鱼道做以下量化:纵向上,为量化鳗鲡上溯的最大距离,将3 000 mm长的鳗鱼道划分为6个区段,以鳗鱼道入口为基准,每500 mm为一段;横向上,将鳗鱼道平均划分为3段,分别记左侧(TL)、中间(CE)、右侧(TR),如图2所示。统计第 j 条鱼上溯的最大距离 L_j ,并将其标记在图2上,最后分别统计位置在左侧、中间、右侧的鳗鲡占试验鱼数量的百分比,分别记为 P_{TL} 、 P_{CE} 、 P_{TR} :

$$P_{\text{TL}} = \frac{\sum_{i=1}^m n_{\text{TL}}}{kN} \times 100\% \quad P_{\text{CE}} = \frac{\sum_{i=1}^m n_{\text{CE}}}{kN} \times 100\% \quad P_{\text{TR}} = \frac{\sum_{i=1}^m n_{\text{TR}}}{kN} \times 100\%$$

(2)

式中: n_{TL} 、 n_{CE} 、 n_{TR} ——左侧、中间、右侧区域鳗鱼的数量。

鳗鲡上溯速度:由于鳗鲡运动轨迹不是直线,对于速度的计算较为困难,故对每条成功上溯的鳗鲡,只计算其保守速度 v ,即假定鳗鲡成功上溯的距离是鳗鱼道长度 L ,根据录像统计鳗鲡的运动时间 t ,计算鳗鲡运动上溯的保守速度 $v=L/t$ 。

用SPSS19.0对统计数据进行正态分布检验,如符合正态分布,则进行单因素方差分析检验(one-way ANOVA),差异水平0.05,统计使用平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示,其他数据采用Excel 2016进行处理。

2 结果与分析

2.1 过鱼效率

对照组幼鳗平均上溯成功率为 $13\% \pm 4.79\%$,试验组平均上溯成功率为 $82.5\% \pm 2.50\%$;对照组幼鳗活跃

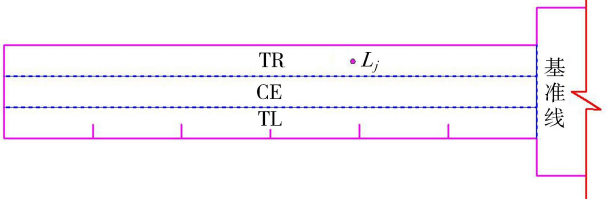


图2 鳗鲡堰面位置示意图

Fig.2 Position of weir surface of eel channel

度较低,在未经加修饰的堰面上,幼鳗的上溯成功率比镶嵌加糙块堰面低 69.5%。经统计检验,2 组试验数据均服从正态分布,且过鱼效率差异性显著($P<0.05$),认为试验所得数据具有统计学意义。综上,修建河口水利工程(低水头坝、堰)会阻碍向内河上溯的幼鳗,堰面镶嵌加糙块将有助于幼鳗的溯河洄游。

2.2 鳗鲡上溯行为及堰面位置

2.2.1 鳗鲡运动方式

分析试验视频可发现,幼鳗在鳗鲡梯的运动大致可以分为 3 种形式:S 形运动,幼鳗身体呈现 S 形,身体各部位缠绕在加糙块上,通过肌肉收缩推动幼鳗向左、右运动(图 3(a));直线运动,分 2 步进行,首先以头部作为支撑,通过肌肉收缩向前拉动尾部,之后以尾部加糙块作为支撑,再次以肌肉收缩推动幼鳗向前运动(图 3(b));Z 形运动,幼鳗身体各个部分依次有序的与加糙块接触,通过肌肉收缩侧向运动(图 3(c))。对于对照组,幼鳗运动形式较为单一,主要呈现 S 形运动,幼鳗在上溯的过程中,由于没有支撑点易滑下,致使过鱼效率较低;试验组情况下,幼鳗以加糙块作为支撑受力条件较好,在一次成功上溯过程中,呈现几种运动方式交叉进行,运动形式较为灵活,成功率较高。

2.2.2 鳗鲡堰面位置

为了进一步探究幼鳗在堰面的行为规律,将 2 组试验所得数据进行量化处理,具体结果见图 4 和表 1。

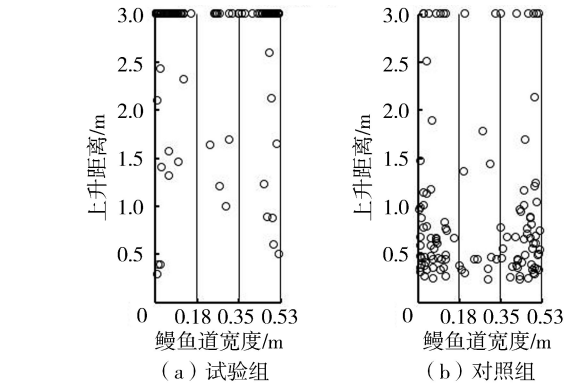


图 4 鳗鲡堰面位置

Fig.4 Position of the weir surface of eel channel

图 4 表明,纵向上两组试验均表现为两侧(TL、TR)幼鳗数量占比明显大于中间(CE);横向上,对照组幼鳗上溯最大距离(3 m)占比明显小于试验组,且上溯距离主要集中在 1 m 以下。相比试验组,对照组幼鳗上溯较为困难,体能消耗较大;对照组幼鳗运动呈现边缘趋势,且尝试上溯的较多。经统计学检验,量化后的试验数据呈现正态分布,堰面两侧幼鳗占比差异不显著(TL vs. TR, $P>0.05$),堰面两侧与中间幼鳗占比差异显著(TL、TR vs. CE, $P<0.05$),具体见表 1。一般认为,幼鳗这种边缘化运动趋势可能与幼鳗察觉到流速上的微弱变化有关。边壁的存在使鳗鱼道两侧流速相对中间较低,它们会利用最有利的区域帮助它们通过;其次幼鳗的边缘化运动可能因为其身体与侧壁接触面积更大,受力更加充分,更利于上溯,图 5 展示幼鳗上

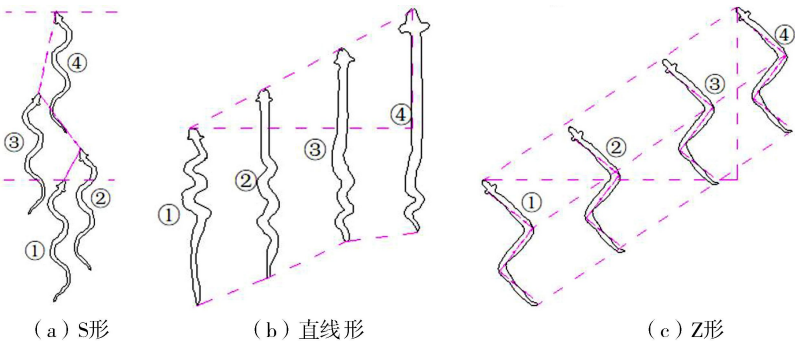


图 3 鳗鲡运动方式分解图(运动顺序:①→②→③→④)

Fig.3 Decomposition map of eel motion(order: ①→②→③→④)

表 1 鳗鲡位置分布百分比及两两比较分析

Table 1 Percentage distribution of eel positions and comparisons of different groups

工况	堰面位置	鳗鲡堰面位置占比 (均值±标准差)	两两比较 (95% 置信区间)
试验组	TR	0.45±0.04	TR vs. CE: $P<0.05$
	CE	0.11±0.03	TR vs. TL: $P>0.05$
	TL	0.44±0.03	TL vs. CE: $P<0.05$
对照组	TR	0.43±0.02	TR vs. CE: $P<0.05$
	CE	0.16±0.02	TR vs. TL: $P>0.05$
	TL	0.41±0.03	TL vs. CE: $P<0.05$

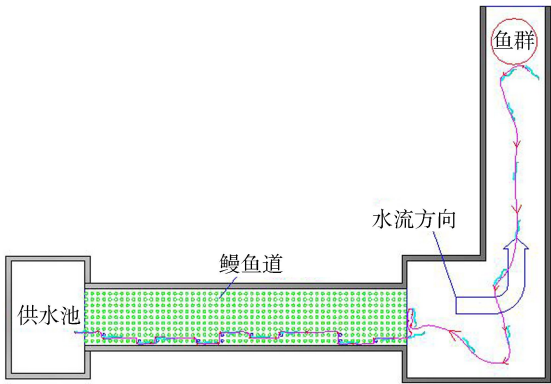


图 5 鳗鲡上溯运动轨迹

Fig.5 Back-migration trajectory of eels

溯运动轨迹。

2.3 鳗鲡游泳速度

鱼类的游泳行为是鱼道设计必须考虑的重要因素,通过视频不难发现(只分析试验组),幼鳗在上溯过程中以游加攀爬的方式快速通过鳗鱼道。具体表现为:在刚刚进入鳗鱼道时以较低的速度进行运动,2~4 s后幼鳗加速摆动尾巴爆发式向前运动,持续时间1~3 s,之后借助加糙块的支撑、堰面摩擦及肌肉收缩开始缓慢向前攀爬,如此循环向前运动。经计算幼鳗在堰面爆发式游泳速度高达0.66 m/s,保守估计速度小于0.3 m/s。此外,爆发式游泳虽然可以使幼鳗快速通过鱼道减缓堰面堵塞,但同时也存在一定风险,例如大量消耗幼鳗体能以及增加幼鳗上溯过程中的不稳定性。

3 讨 论

3.1 堰面加糙对过鱼效率的影响

本文试验是国内首次对日本幼鳗过鱼效率做量化研究,利用堰面加糙块来解决鳗鱼上溯洄游的障碍。结果显示:水利工程的修建给洄游上溯的幼鳗形成障碍,堰面是否镶嵌加糙块对鱼道过鱼效率影响显著,相比于对照组堰面镶嵌加糙块可以使幼鳗实现顺利上溯,过鱼效率从13%提高至82.5%。这一结论与Lucas等^[29]和Russon等^[30]提出的“水利工程(坝、堰)的修建可能对洄游上溯的幼鳗造成障碍”观点相一致。同样与国外学者对欧洲鳗的研究结论相似,即镶嵌有梅花形式石头的堰面可以使过鱼效率从0提高到67%^[21]。虽然与该结论有略微差异,这可能与试验条件有关,据了解Vowles等^[21]所用幼鳗体长、加糙块形式、间隔等都与本文试验不同,但这并不影响堰面镶嵌加糙块可以显著提高幼鳗上溯成功率的事实。

一般上认为幼鳗的游泳能力较差^[13],可以在湿润的壁面攀爬^[16],但是当堰面坡度及堰面流速较大时,幼鳗攀爬优势将不显现,从而对幼鳗的溯河洄游造成障碍,而在堰面镶嵌加糙块^[17,21]可以缓解这种不利优势,幼鳗将会借助堰面凸出的基质向上运动。Legault^[31]认为加糙块密度(间隔大小)通常用来定义鳗鱼尺寸大小的选择性,即加糙块密度越大对较小尺寸的鳗鲡上溯越有利,显而易见,加糙块的设计密度应适应鳗鲡尺寸。本文重点讨论堰面加糙对过鱼效率影响,关于加糙块密度与鳗鲡体宽的关系,将在今后的工作中做进一步研究。

3.2 鳗鲡行为特征讨论

溯河洄游是鱼本身所具有的特性,因此探讨幼鳗在堰面的行为特征显得尤为重要。试验开始阶段,试验组鳗鱼的尝试率和接近率明显高于对照组,这种行为差异是不同设置之间流体动力学差异造成的,试验组的糙块能产生幼鳗更喜欢的湍流,湍流被认为是鱼道的潜在影响因素^[17]。湍流具有吸引流的好处,但其对过鱼效率具有潜在影响,有学者认为湍流会增加幼鳗的体能消耗^[32]和上溯过程中的不稳定性^[33],也有学者认为吸引流的水平会随鳗鱼道所处位置、河流流量的变化而改变。现场运行情况下,会出现更高的湍流,从而会增加向上游迁徙幼鳗的吸引力,并减少洄游延误^[17]。

在河道中,人为修建的水利工程影响幼鳗的洄游上溯。有关研究表明,当低水头水利工程过流堰面流速足够低、坡度足够小或其洪水季被淹没时,幼鳗有机会从湿润的边缘洄游上溯^[34]。试验研究表明:无论是试验组还是对照组,幼鳗的边缘趋向运动较为明显,这一结论与国外学者Piper等^[35]的观点“鳗鲡经常位于障碍物边缘,有利于洄游上溯”一致。

研究表明,幼鳗的游泳形式与蛇类运动形式相似^[20],这与本文研究结果相似,幼鳗身体呈现S形、Z形或直线形在加糙块之间穿插运动,运动形式灵活。幼鳗上溯失败主要发生在直线运动时,因为此运动形式下幼鳗身体受力不充分,易滑下。鳗鱼的游泳形式是一种典型的安圭拉式游泳方式,即快速在加糙块之间游动,是一个典型的快速(爆发)登上堰顶的行为^[17]。

3.3 鳗鲡游泳能力分析

本文试验保守估计幼鳗的平均速度比测量的游泳速度^[14](0.3 m/s)小,这与测试、计算方式或鳗鲡体质差异有关,具体原因尚需进一步研究。但是试验中一些幼鳗的爆发式游泳速度高达0.66 m/s,这与国外学者在相似的研究中得出的结论相似(0.69 m/s),明显高于先前研究中幼鳗在未加修饰堰面的爆发游泳速度0.5 m/s^[14]。国外的一些学者^[36-37]研究表明在开放的渠道中鱼的爆发游泳速度要大于室内被迫发生爆发游泳速度的期望值;也有研究表明实际情况下,如水池、横向通道及深槽通道,鱼类最大速度只能持续几秒

钟^[38],对于传统的鱼道速度 0.5 ~ 1.7 m/s^[8]的设计标准来说,幼鳗的游泳能力^[14]显然是达不到的。

4 结 语

传统的鱼道对于游泳性能低的幼鳗是不适用的,本文基于物理模型的量化分析,对鳗鱼道过鱼效果及鳗鱼溯洄行为展开研究。试验表明堰面镶嵌加糙块可以很好地解决幼鳗溯河洄游,试验组与对照组相比过鱼效率提高 69.5%;幼鳗上溯形式与蛇类爬行相似且边缘趋向运动较为明显,是一种典型的爆发式登上堰顶行为,单次最大爆发游泳速度高达 0.66 m/s。由于鳗鱼道的过鱼效果还受各种内部因素(鳗鲡尺寸、鳗鲡体质等)和外部因素(水温、加糙块镶嵌形式及密度、溶解氧、鳗鱼道坡度等)的影响,此外还需要考虑幼鳗休息池位置选择等因素,因此对鳗鱼道堰面镶嵌加糙块过鱼效果还有待进一步研究,当然今后还应通过大量的实地研究以促进开发出更合理的方式来减轻水利工程对鳗鲡生境造成的破坏。

参考文献:

[1] 帅方敏,李智泉,刘国文,等. 珠江口日本鳗鲡种苗资源状况研究[J]. 南方水产科学,2015,11(2):85-88. (SHUAI Fangmin, LI Zhiquan, LIU Guowen, et al. Study on the seed and seedling of *Anguilla japonica* in the Pearl River Estuary[J]. South China Fisheries Science,2015,11(2):85-88. (in Chinese))

[2] TSUKANOTO K. Oceanic biology: spawning of eels near a seamount[J]. Nature,2006,439(7079):929.

[3] TSUKANOTO K, OTAKE T, MOCHIOKA N, et al. Seamounts, new moon and eel spawning: the search for the spawning site of the Japanese eel[J]. Environmental Biology of Fishes,2003,66(3):221-229.

[4] TSUKANOTO K, MOCHIOKA N, MILLER M J, et al. Video observation of an eel in the *Anguilla japonica* spawning area along the West Mariana Ridge[J]. Fisheries Science, 2013,79(3):407-416.

[5] 智玉龙,侯俊利,张涛,等. 长江口日本鳗鲡苗时空分布特征[J]. 生态学杂志,2013,32(10):2750-2755. (ZHI Yulong, HOU Junli, ZHANG Tao, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of the *Anguilla japonica* elver in the Yangtze Estuary[J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(10):2750-2755. (in Chinese))

[6] 联合国粮食及农业组织. 鱼道:生物学依据、设计标准及监测[M]. 王珂,李志华,刘明典,等译. 北京:中国农业出版社,2011.

[7] TSUKANOTO K, CHOW S, OTAKE T, et al. Oceanic spawning ecology of freshwater eels in the western North Pacific[J]. Nat Commun, 2011, 2: 179.

[8] 陈凯麒,常仲农,曹晓红,等. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 182-188. (CHEN Kailin, CHANG Zhongnong, CAO Xiaohong, et al. The present situation and prospect of the construction of fish way in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2):182-188. (in Chinese))

[9] 温静雅,陈昂,曹娜,等. 国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述[J]. 水利水电科技进展,2019,39(5):49-55. (WEN Jingya, CHEN Ang, CAO Na, et al. A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(5):49-55. (in Chinese))

[10] CHEN Ang, WU Miao, CHEN Kaiqi, et al. Main issues in research and practice of environmental protection for water conservancy and hydropower projects in China[J]. Water Science and Enigneering,2016, 9(4): 312-323.

[11] 赵彬如,戴会超,戎贵文,等. 竖缝位置对竖缝式鱼道水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):69-73. (ZHAO Binru, DAI Huichao, RONG Guiwen, et al. Effect of slot position on hydraulic characteristics of vertical slot fishway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(5):69-73. (in Chinese))

[12] 金志军,单承康,崔磊,等. 过鱼设施进口及吸引流设计[J]. 水资源保护,2019,35(6):145-154. (JIN Zhijun, SHAN Chengkang, CUI Lei, et al. Design of entrance and attraction flow of fish passage facility[J]. Water Resources Protection, 2019,35(6):145-154. (in Chinese))

[13] KNIGHTS B, WHITE E M. Enhancing immigration and recruitment of eels: the use of passes and associated trapping systems [J]. Fisheries Manag Ecol, 1998, 5(6): 459-471.

[14] MC CLAVE J D. Swimming performance of European eel(*Anguilla anguilla*) elevers[J]. Journal of Fish Biology,1980,16:445-452.

[15] FOULDS W L, LUCAS M C. Extreme inefficiency of two conventional, technical fisways used by European river lamprey (*Lampetra fluviatilis*)[J]. Ecological Engineering,2013, 58:423-433.

[16] KEMP P S, O’HANLEY J R. Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a systems[J].

- Fisheries Management and Ecology, 2010, 17: 297-322.
- [17] SOLOMON D J, BEACH M H. Fish pass design for eel and elver (*Anguilla anguilla*) [M]. Bristol: Environment Agency, 2004.
- [18] VERDON R, DESROCHERS D, DUMONT P. Recruitment of American eels in the Richelieu River and Lake Champlain; provision of upstream passage as a regional-scale solution to a large-scale problem [C] // DIXON D A. American Fisheries Society Symposium 33. Bethesda: American Fisheries Society, 2003: 125-138.
- [19] PORCHER J P. Fishways for eels [J]. Bulletin Francais de la Pêche et de la Pisciculture, 2002, 364: 147-155.
- [20] BAKER C F, BOUBEE A T. Upstream passage of inanga *Galaxias maculatus* and redbfin bullies *Gobiomorphus huttoni* over artificial ramps [J]. Journal of Fish Biology, 2006, 69: 668-681.
- [21] VOWLES A S, DON A M, KARAGEORGOPOULOS P, et al. Efficiency of a dual density studded fish pass designed to mitigate for impeded upstream passage of juvenile European eels (*Anguilla anguilla*) at a model Crump weir [J]. Fisheries Management and Ecology, 2015, 22(4): 307-316.
- [22] CORBETT S, MOSER M L, WASSARD B, et al. Development of passage structures for adult Pacific lamprey at Bonneville Dam [R]. Phoenix: Army Corps of Engineers, 2010.
- [23] ACKSON D J, MARMULLA G. Dams, fish and fisheries: opportunities, challenges and conflict resolution [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.
- [24] PAVLOV D S. Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR [M]. Berlin: Nabu Press, 2014.
- [25] 张森, 谢仰杰, 黄良敏. 日本鳗鲡人工繁殖研究现状及存在问题 [J]. 水产科学, 2011, 30(6): 362-368. (ZHANG Sen, XIE Yangjie, HUANG Liangmin. Research status and problems of artificial propagation of *Anguilla japonica* [J]. Fisheries Science, 2011, 30(6): 362-368. (in Chinese))
- [26] 郭弘艺, 魏凯, 唐文乔, 等. 中国东南沿海日本鳗鲡幼体的发育时相及其迁徙路径分析 [J]. 水产学报, 2012, 36(12): 1793-1801. (GUO Hongyi, WEI Kai, TANG Wenqiao, et al. Developmental phases and migration pathways of Japanese eel larvae in southeastern coast of China [J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(12): 1793-1801. (in Chinese))
- [27] 陈凯麒, 葛怀凤, 郭军, 等. 我国过鱼设施现状分析及鱼道适应性管理的关键问题 [J]. 水生态学杂志, 2013, 34(4): 9-14. (CHEN Kailin, GE Huaifeng, GUO Jun, et al. Analysis of current situation of fish-passing facilities and key issues of fish-channel adaptive management in China [J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(4): 9-14. (in Chinese))
- [28] 曹晓红, 陈敏, 吕巍. 我国鱼道建设现状与展望 [C] // 2013 中国环境科学学会学术年会论文集 (第六卷). 北京: 中国环境科学学会, 2013: 6194-6199.
- [29] LUCAS M C, BUBB D H. Seasonal movements and habitat use of grayling in the UK [R]. Bristol: UK Environment Agency, 2005.
- [30] RUSSON I J, KEMP P S, LUCAS M C. Gauging weirs impede the upstream migration of adult river lamprey *Lampetra fluviatilis* [J]. Fisheries Management and Ecology, 2010, 18: 201-210.
- [31] LEGAULT A. Le franchissement des barrages par l'escalade de l'anguille [J]. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 1988, 308: 1-10.
- [32] ENDERS E C, BOISCLAIR D, ROY A G. The effects of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, 2003, 60: 1149-1160.
- [33] TRITICO H M, COTEL A J. The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*semotilus atromaculatus*) [J]. The Journal of Experimental Biology, 2010, 213: 2284-2293.
- [34] LINTONE D, JONSSON B, NOAKES D L G. Effects of water temperature on the swimming and climbing behaviour of glass eels, *Anguilla* spp [J]. Environmental Biology of Fishes, 2007, 78: 189-192.
- [35] PIPER A T, WRIGHT R M, KEMP P S. The influence of attraction flow on upstream passage of European eel (*Anguilla anguilla*) at intertidal barriers [J]. Ecological Engineering, 2012, 44: 329-336.
- [36] CASTRO-SANTOS T. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes [J]. Journal of Experimental Biology, 2005, 208(3): 421-432.
- [37] RUSSON I J, KEMP P S. Experimental quantification of the swimming performance and behaviour of spawning run river lamprey *Lampetra fluviatilis* and European eel *Anguilla anguilla* [J]. Journal of Fish Biology, 2011, 78: 1965-1975.
- [38] SOLOMON D J, BEACH M H. Fish pass design for eel and elver (*Anguilla anguilla*) [R]. Bristol: UK Environment Agency, 2004.