

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0129

郭子琪, 郝志红, 孙双科, 等. 水温因素对竖缝式鱼道中草鱼上溯行为影响的试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(6): 170-175. GUO Z Q, QIE Z H, SUN S K, et al. Experiment on the influence of water temperature on the migration behavior of grass carp in vertical slot fishway[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 170-175. (in Chinese)

水温因素对竖缝式鱼道中草鱼上溯行为影响的试验

郭子琪^{1,2}, 郝志红², 孙双科¹, 李广宁¹, 王岑³, 柳海涛¹, 郑铁刚¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001; 3. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:利用鱼道试验模型进行过鱼试验,分析水温因素对模型鱼道中鱼类上溯行为的影响。以某工程竖缝式鱼道为原型,按重力相似准则建立比尺为1:4的水工模型,选择草鱼幼鱼为试验用鱼,试验中采用摄像头全程监测试验鱼上溯过程,统计试验鱼在模型试验段的通过率与通过时间两项指标,进行量化分析。研究发现:在试验水温变化范围18.5~22.5℃内,草鱼幼鱼总体通过率达70%以上,且不同水温区间内通过率无明显变化;采用SPSS软件进行的显著性检验显示,草鱼通过时间与水温因素无显著相关关系。基于上述结果,今后在开展草鱼上溯行为试验研究时,在水温变化范围18.5~22.5℃内,可考虑忽略水温因素的影响。

关键词:水温;草鱼;竖缝式鱼道;上溯行为;显著性检验

中图分类号:TV131 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Experiment on the influence of water temperature on the migration behavior of grass carp in vertical slot fishway

GUO Ziqi^{1,2}, QIE Zhihong², SUN Shuangke¹, LI Guangning¹, WANG Cen³, LIU Haitao¹, ZHENG Tiegang¹

(1. State Key Laboratory of Simulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Fish passing experiments were conducted in a fishway model to figure out the influence of water temperature on the fish migration behaviors. A hydraulic model with a scale of 1:4 was established based on the gravity similarity criterion, and the juvenile grass carp was selected as the test fish. Cameras were used to monitor the migration process of the test fish, and the fish passage rate and passage time were counted and analyzed quantitatively. The experimental results showed that: the total passing rate of juvenile grass carp was more than 70% in the water temperature range of 18.5~22.5℃, and there was no significant change in passing rate in different water temperature ranges, the influence of water temperature on the fish passage rate is not obvious; the SPSS software used to test the significance which showed that the passing time of juvenile grass carp had no significant correlation with water temperature. Based on the above results, the influence of water temperature can be neglected in the future research of the grass carp migration behavior test in the range of 18.5~22.5℃.

Key words: water temperature; grass carp; vertical slot fishway; migration behavior; significance test

收稿日期:2019-11-26 修回日期:2020-04-07 网络出版时间:2020-04-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20200417.1400.008.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401708); 国家自然科学基金(51709278; 51679261); 中国水科院自主科研项目(SKL2018ZY08; HY0145B162019)

作者简介: 郭子琪(1996—), 男, 河北保定人, 主要从事鱼道水力学研究。E-mail: guoziqi1996@sina.cn

通信作者: 孙双科(1966—), 男, 河南南阳人, 教授级高级工程师, 主要从事水力学研究。E-mail: sunsk@iwhr.com

1 问题的提出

鱼类上溯行为是鱼类前往觅食场、产卵场或越冬场的一种周期性活动,其对鱼类种群的生存与繁衍有重要意义^[1]。随着水利水电建设项目的兴建,尤其是闸坝等水工建筑物的建设,对河流上下游的连续性造成了破坏,阻隔了鱼类的上溯路径^[2]。随着近年来对生态环境保护重视程度的提高^[3-4],在被阻隔的河段修建鱼道、鱼梯和升鱼机等过鱼设施的案例越来越多。

鱼道是目前国内外保护鱼类资源、维持河流连续性较为常见的过鱼设施布置方式^[5]。竖缝式鱼道因其对水深变化适应性较强及结构简单等优点,在实际工程中得到了广泛应用^[6]。如国内的上庄新闸鱼道^[7]、长洲鱼道^[8],澳大利亚 Barwon River 的潮汐拦河坝鱼道^[9]皆采用竖缝式鱼道。

针对竖缝式鱼道,国内外开展了大量研究工作。早期研究较多关注不同体型鱼道内的流场结构: Rajaratnam 等^[10]首次对竖缝式鱼道的水流结构进行了系统研究,并建立了过流流量与水深的量化关系; Wu 等^[11]研究发现竖缝式鱼道在底坡为 5% 时呈二维水流结构,在 10% 与 20% 时则呈三维结构; 边永欢等^[12]通过二维数值模拟研究发现竖缝式鱼道中流速度值的变化对流场分布规律无明显影响。近年来,水力学因素对鱼类行为影响的研究开始得到较多关注: 吴震等^[13]研究发现流速与紊动能是引起鱼类折返行为的主要因素; 廖磊等^[14]研究发现流速、紊动能和流速梯度均对齐口裂腹鱼上

溯行为有显著影响; 曹平等^[15]与龚丽等^[16]研究了鱼道中草鱼幼鱼的游泳能力; 张超等^[17]与李广宁等^[18]研究了竖缝式鱼道中不同水流结构对草鱼上溯行为的影响。

水温是影响鱼类游泳能力与上溯行为的重要因素之一。已有部分研究^[19-23]表明,在给定的温度区间内,黄颡鱼、齐口裂腹鱼及草鱼等鱼类游泳能力与水温呈正比关系; Ana 等^[24]研究发现夏季通过竖缝式鱼道上溯的褐鳟数量与水温上升显著相关; Pereira 等^[25]通过分析竖缝式鱼道中七鳃鳗通过数量与水温的关系,发现大部分七鳃鳗于水温 15~19 °C 时上溯; Caudill 等^[26]研究发现鱼道上下游温差超过 4 °C 时会阻碍大马哈鱼和虹鳟通过鱼道上溯。草鱼是四大家鱼之一,属半洄游性鱼类,是国内鱼道工程常见的过鱼对象之一。笔者所在课题组前期开展了竖缝式鱼道对照性过鱼试验研究,研究了鱼道不同水流结构对草鱼上溯行为的影响^[17],在试验研究过程中,因持续时间较长,试验水温有比较明显的变化,因此有必要进一步研究试验水温变化对草鱼上溯行为的影响。

2 试验设计

2.1 试验布置

试验装置包括试验段、回水池、供水系统和录像系统等,见图 1。试验鱼道采用钢骨架支撑,侧壁材料为有机玻璃板,底板采用水泥砂浆浇筑,导板及隔板由灰塑料板制成。

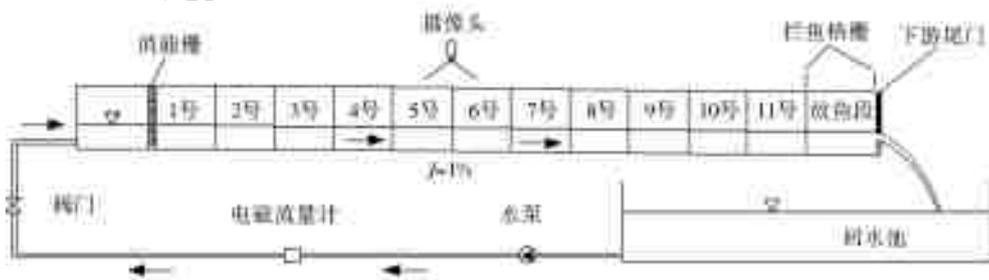


图 1 试验布置

Fig. 1 Experiment layout

鱼道模型以某水电站鱼道工程为原型,按重力相似准则设计,模型比尺 1:4。鱼道采用竖缝式布置方式,试验段设 11 级池室。鱼道水池池长 $L=0.75$ m,池宽 $B=0.6$ m,导板长度 $P=0.15$ m,竖缝宽度 $b=0.075$ m,导向角角度 $\theta=45^\circ$,坡度 $J=1\%$,水深 $H=30$ m,鱼道池室具体尺寸见图 2。

试验模型用水采用自循环系统,模型下游设回水池,试验时采用供水水泵自回水池抽水注入模型上游进水池,进水池中布置消能栅消除水流紊动,水流流经各级鱼道池室,经过出水池末端的尾门排入回水池。模型试验段下游设置放鱼段,其上下游各安装一道拦鱼栅,上游侧拦鱼栅可防止试验鱼提前进入试验段,下游侧拦鱼栅则用以防止试验鱼跌入

回水池。

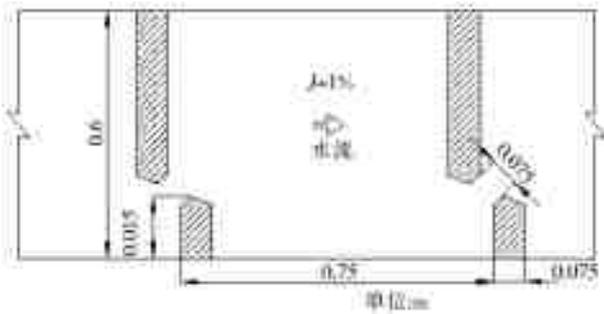


图 2 鱼道池室尺寸
Fig. 2 Fishway pool size

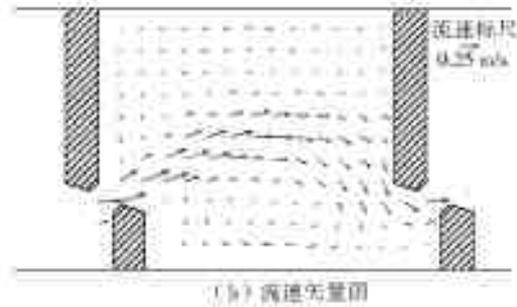
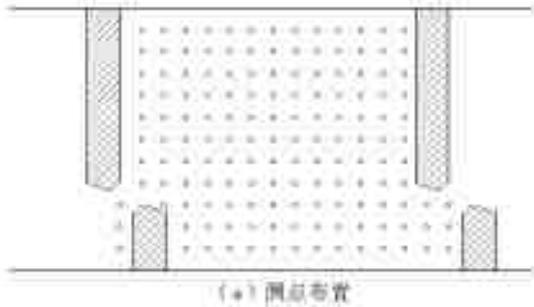


图 3 常规池室流场结构
Fig. 3 Normal pool flow pattern

2.3 试验用鱼

龚丽等^[16]对 6~15 cm 草鱼的临界游泳能力进行了研究,得到拟合公式

$$U_{crit} = 3.960L_B + 47.494 \quad (R^2 = 0.837) \quad (1)$$

式中: U_{crit} 为临界游泳速度,cm/s; L_B 为试验鱼体长,cm。

考虑到鱼道尺寸及草鱼游泳能力等因素,选用体长范围(10±2) cm 的草鱼作为试验用鱼。由式(1)计算得到试验鱼的临界游泳能力为 0.79~0.95 m/s,大于模型鱼道竖缝断面流速 0.4 m/s,可确保试验结果不会因试验鱼游泳能力不足而受到影响。

试验所用草鱼试验前暂养于体积为 1 m³ 的方形水池中,24 h 循环供水,并进行曝气处理,溶解氧浓度保持在 7 mg/L 以上,光照为室内自然光,试验前两日停止喂食。

2.4 试验方法

试验时,先启动供水系统,将鱼道运行水深调至 0.3 m,测量并记录试验鱼道中的水温(自然条件下的环境温度)、溶解氧(DO)、pH 值等参数。试验过程中,保证水体的含氧量 DO>6 mg/L,pH 值介于 7.5~8,确保鱼类活力。待流态稳定后,将试验用鱼放入放鱼段,此时拦鱼栅关闭,试验用鱼不能上溯。待试验鱼适应后(至少 15 min)^[17],撤去拦鱼栅,等待试验鱼上溯。自试验鱼通过最下游第一级竖缝时开始计时,待其通过全部 11 个池室进入最上游一级

2.2 水流流态

使用 P-EMS 电磁流速仪,测量 $P=0.15$ m、 $B=0.6$ m 的鱼道池室中 0.5H 水深的水流流速分布,测点横纵向间隔均为 5 cm,流速测量值为 10 s 时均值,测点布置见图 3(a)。结果表明,常规池室中主流居中呈 S 型分布,主流两侧回流区尺度相近,竖缝处流速约为 0.4 m/s,主流区流速值介于 0.25~0.4 m/s,回流区流速值介于 0~0.2 m/s,常规池室流场结构见图 3(b)。

池室时停止计时,即可得到上溯总历时。若试验鱼自开始计时超过 20 min 未到达最上游一级池室,则视为上溯失败^[17]。

3 试验结果与分析

3.1 通过率

上溯通过率定义为成功通过鱼道模型段的试验鱼尾数与总尾数的比值^[17]。试验中草鱼通过尾数与通过率见图 4,具体数值见表 1。试验用鱼总数 245 条,通过 176 条,总通过率为 72%,总体通过情况良好。对各水温区间通过率进行线性回归分析,得到 $R^2 = 0.1576$,表明在试验水温范围内各水温区间草鱼通过率差异并不明显。

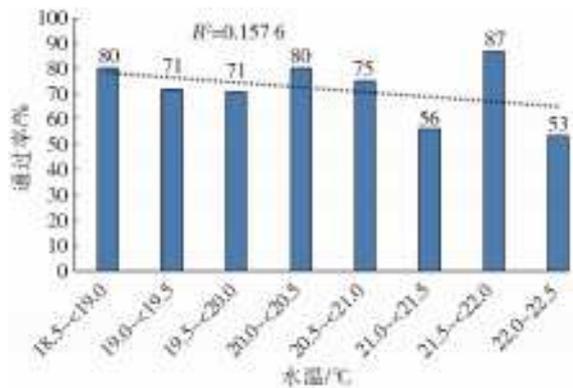


图 4 不同水温条件下草鱼通过率
Fig. 4 Grass carp passing rate in different water temperature conditions

表 1 不同试验水温下草鱼通过数量
Tab. 1 Grass carp passing number in different water temperature conditions

水温区间/℃	P/B=0.25	
	总尾数	成功通过尾数
18.5~<19.0	30	24
19.0~<19.5	35	25
19.5~<20.0	34	24
20.0~<20.5	25	20
20.5~<21.0	36	27
21.0~<21.5	25	14
21.5~<22.0	30	26
22.0~22.5	30	16
总计	245	176

3.2 通过时间

图 5 给出了草鱼通过尾数—通过时间分布图,结果表明,草鱼通过时间明显呈偏态分布,多数试验鱼通过时间低于 225 s,表明草鱼总体倾向于快速通过鱼道模型试验段,这与草鱼的趋流性是一致的。

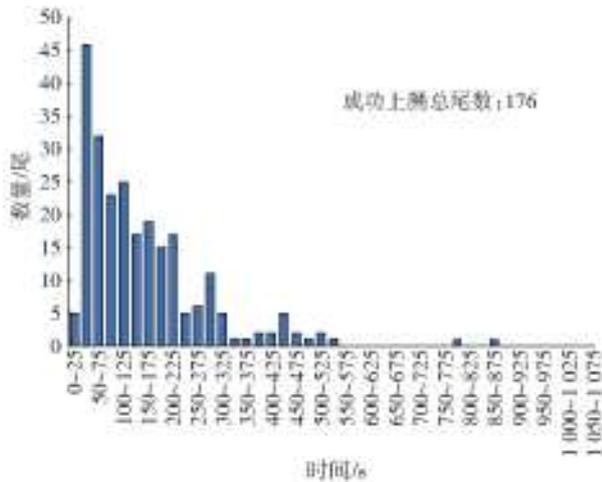


图 5 通过尾数—通过时间分布
Fig. 5 Pass quantity-passing time distribution

图 6 给出了上溯通过时间—水温箱线图,图中各绿色箱体的下边界值为 Q_1 ,上边界值为 Q_3 。 Q_1 、 Q_3 分别称为前四分位数和后四分位数,前四分位数 Q_1 表示有 25% 的数据小于等于 Q_1 ,后四分位数 Q_3 表示有 75% 的数据小于 Q_3 。1.5IRQ (Inter-Quartile Range) 定义为小于 $Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1)$ 且大于 $Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$ 的数据值,1.5IRQ 范围外的值称为异常值。图中中位线表示各水温区间中位数位置。计算均值时不考虑异常值。

从图 6 可以看出:各水温区间试验鱼的通过时间的中位数及均值均小于 300 s;多数水温区间平均值介于 100~200 s,中位数介于 50~150 s。从中位

数及均值来看,草鱼在该体型鱼道的通过时间较为稳定且用时较短,说明试验鱼具有较强的活力,在试验所在温度区间内草鱼在该体型鱼道中的通过效果较好。观察各水温区间的通过时间分布,未发现通过时间与水温区间之间有明显的关联性。

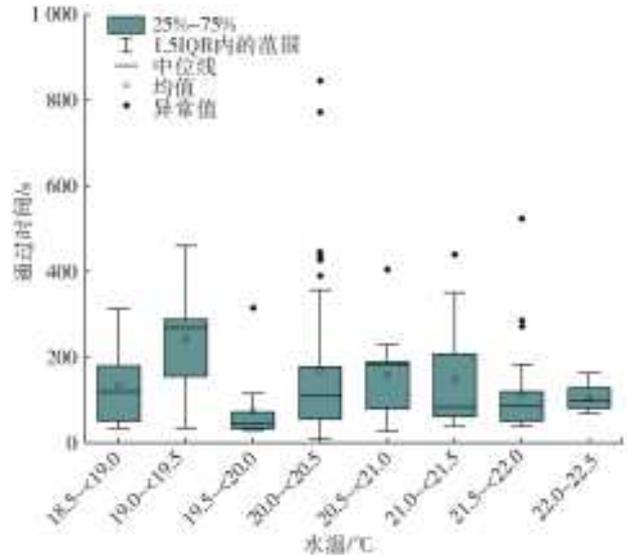


图 6 通过时间—水温箱线图
Fig. 6 Passing time-water temperature boxplot

3.3 水温影响的显著性检验

为进一步分析水温因素对草鱼上溯行为是否存在显著影响,采用 SPSS 软件进行水温对草鱼通过时间影响的显著性检验。如前所述,草鱼在鱼道中的上溯行为具有明显的趋流性,即倾向于快速通过鱼道试验段,因而其通过时间整体上呈偏态分布(图 5),因此,选择采用 SPSS 中提供的多组分布未知样本的显著性检验方法,即 Kruskal-Wallis 检验和 Median 检验进行显著性检验。两种方法侧重点各有不同,Kruskal-Wallis 检验侧重检验样本总体分布的差异,Median 检验则侧重检验样本中位数的差异^[27-28]。

(1)Kruskal-Wallis 检验通过检验 k 个待检验组的总体分布来判断各检验组是否存在差异。其基本思想为先将各样本所有待检验数据升序排列求秩,然后根据各组的平均秩判断差异是否显著,其中秩为所有样本个体升序排列后个体的排名。原假设为各样本的总体分布无显著差异。

进行 Kruskal-Wallis 检验需先构建统计量 K-W 为

$$K-W = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{R}_i - \bar{R})^2 \quad (2)$$

式中: k 为样本组数; n 为总样本量; n_i 为第 i 组样本量; \bar{R}_i 为第 i 组平均秩; \bar{R} 为总平均秩。当样本组

数大于 3 时, K-W 统计量分布近似服从 $k-1$ 个自由度的卡方分布。

(2) Median 检验通过检验 k 个待检验组的中位数来判断各检验组是否存在差异。其基本思想为先将各样本所有待检验数据升序排列求秩, 然后考察各组的秩的中位数位置判断各组数据的差异是否显著。原假设为各样本的总体分布无显著差异。

进行 Median 检验时, 需先构建卡方统计量

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^b \frac{(A_{2j} - T_{2j})^2}{T_{2j}} \quad (3)$$

式中: b 为中位数频数表的总列数; A_{2j} 为中位数频数表中 $(2, j)$ 单元格观测值的观测频率; T_{2j} 为 $(2, j)$ 单元格观测值的期望频率。 T_{2j} 的计算公式为

$$T_{2j} = \frac{n_2 + n_j}{n} \quad (4)$$

式中: n_2, n_j 分别为第 2 行、第 j 列中的观测值; n 为观测值总数。

SPSS 给出的结果为各统计量对应的 P 值。Kruskal-Wallis 检验卡方值 $\chi^2 = 12.25, P = 0.093 > 0.05$; Median 检验卡方值 $\chi^2 = 8.65, P = 0.279 > 0.05$ 。两种检验结果均表明在本试验研究的水温变化范围内, 水温因素对草鱼的上溯行为无显著影响。

4 讨论

研究过鱼对象在鱼道内的上溯行为可为鱼道体型的优化提供参考。在鱼道试验段长度保持不变的前提下, 通过时间无疑是衡量鱼道可通过性的重要指标。在水温 $18.5 \sim 22.5$ °C 变化范围内的试验结果表明, 草鱼在鱼道模型段中的通过时间与水温并无明显相关性。而根据已有研究成果, 水温条件对草鱼游泳能力有直接影响, Yan 等^[23]曾针对体长 (8.6 ± 0.2) cm 的草鱼进行了游泳能力测试, 结果发现在水温 15 °C 与 25 °C 条件下其临界游泳能力分别为 (33.3 ± 1.1) cm/s 与 (43.2 ± 1.7) cm/s, 草鱼游泳能力大体与水温呈正相关关系。

Yan 等^[23]的研究水温变化范围较广, 且囊括本研究的水温变化区间, 但与本研究的结论不一致, 经分析认为, 出现上述差异的原因在于鱼道过鱼试验与游泳能力测试试验存在明显不同所致: 在鱼道过鱼试验中, 草鱼的上溯行为属于基于其趋流性的自主行为; 而在游泳能力测试中, 量测的是草鱼在极限条件下突破水流屏障的游泳能力指标, 属于被动反应。草鱼在试验鱼道中的平均上溯速度将更多取决于鱼道内的水流结构, 而非其临界游泳能力。

Ana 等^[24]研究表明在水温 $4.6 \sim 16.1$ °C, 水温与褐鲟在竖缝式鱼道中的通过数量显著相关; Pereira 等^[25]观测了竖缝式鱼道中七鳃鳗的通过数量, 观测水温范围为 $8 \sim 23$ °C, 观测结果表明多数七鳃鳗于水温 $15 \sim 19$ °C 时通过鱼道。上述文献均表明水温对鱼道中的鱼类上溯行为有明显影响, 与本文结论略有差异, 其主要原因为不同鱼类对水温变化的敏感程度不同: Ana 等^[24]与 Pereira 等^[25]的研究对象分别为褐鲟与七鳃鳗, 水温变幅分别为 11.5 °C 及 15 °C; 本研究研究对象为草鱼, 水温变幅 4 °C。对比可知本研究与上述文献的研究对象及水温变幅均不一致, 故研究结果存在差异。

另外, 以往在开展鱼类行为学研究中, 为了避免水温因素对试验结果产生影响, 往往采用加热等手段维持试验周期内水温的稳定^[17]。在本研究试验过程中发现, 在较长的试验周期内水温的频繁加热与冷却会对鱼类的活力保持形成一定不利影响, 而采用自然水温条件无疑更为有利。根据本研究的结果, 在一定水温区间内水温变化对试验结果的影响可以忽略不计。

5 结论

在竖缝式鱼道模型中进行了草鱼幼鱼的过鱼试验, 研究了不同水温条件对草鱼上溯行为的影响, 结果表明: 在试验水温 $18.5 \sim 22.5$ °C 范围内, 竖缝式鱼道模型试验中草鱼通过率 70% 左右, 且不同水温区间内通过率无明显差异; 对草鱼通过时间进行了 Kruskal-Wallis 检验 ($P = 0.093 > 0.05$) 和 Median 检验 ($P = 0.279 > 0.05$), 两种检验均表明在本试验所在的 $18.5 \sim 22.5$ °C 水温区间内, 水温对草鱼上溯行为无显著影响。

根据本研究结果, 今后在竖缝式鱼道中开展草鱼上溯行为试验研究时, 在水温变化范围 $18.5 \sim 22.5$ °C 内, 可考虑忽略水温因素的影响。

参考文献:

- [1] 赵世亮. 鱼类行为学研究进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(9): 102-104. DOI: 10.16003/j.cnki.issn1672-5190.2010.09.095.
- [2] 蔡露, 张鹏, 侯轶群, 等. 我国过鱼设施建设需求、成果及存在的问题[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 292-299. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202001.029
- [3] 曹庆磊, 杨文俊, 周良景. 国内外过鱼设施研究综述[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 39-43. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2010.05.009.
- [4] 曹娜, 钟治国, 曹晓红, 等. 我国鱼道建设现状及典型案

- 例分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 156-162. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.025.
- [5] 徐体兵, 孙双科. 竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1386-1391. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2009.11.013.
- [6] 王兴勇, 郭军. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 222-228. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2005.03.012.
- [7] 孙双科, 邓明玉, 李英勇. 北京市上庄新闸竖缝式鱼道的水力设计研究[A]. 水电 2006 国际研讨会论文集[C]. 昆明, 2006: 951-956.
- [8] 阮天鹏, 王晓罡. 长洲鱼道挡板结构优化研究[J]. 小水电, 2019(3): 37-40.
- [9] JUSTIN O' C, ANDREW P, BEN F, et al. Assessment of a vertical slot fishway in south-eastern Australia designed to pass numerous species and size classes of fish [J]. *Ecological Management & Restoration*, 2019, 20(2): 151-155. DOI: 10.1111/emr.12367.
- [10] RAJARATNAM N, VANDER V G, KATOPODIS C. Hydraulics of vertical slot fishways [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1986, 112(10): 909-927. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1986)112:10(909).
- [11] WU S, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Structure of flow in vertical slot fishway [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(4): 351-360. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1999)125:4(351).
- [12] 边永欢, 孙双科. 竖缝式鱼道的水力特性研究[J]. 水利学报, 2013, 44(12): 1462-1467. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9350.2013.12.011.
- [13] 吴震, 杨忠勇, 石小涛, 等. 异齿裂腹鱼上溯过程中的折返行为及其与水力条件的关系[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3382-3393. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201911.033.
- [14] 廖磊, 安瑞冬, 李嘉, 等. 齐口裂腹鱼趋流行为的水力学特性研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 69-72.
- [15] 曹平, 穆祥鹏, 白音包力皋, 等. 与鱼道水力设计相关的草鱼幼鱼游泳行为特性研究[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1456-1464. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170758.
- [16] 龚丽, 吴一红, 白音包力皋, 等. 草鱼幼鱼游泳能力及游泳行为试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3): 211-216. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2015.03.010.
- [17] 张超. 竖缝式鱼道过鱼试验与布置体型改进研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [18] LI G N, SUN S K, ZHANG C, et al. Evaluation of flow patterns in vertical slot fishways with different slot positions based on a comparison passage experiment for juvenile grass carp [J]. *Ecological Engineering*, 2019(133): 148-159. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.04.008.
- [19] 吴寿昌, 吴开武, 汪祖莲, 等. 黄颡鱼游泳能力探究 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(1): 222-226. DOI: 10.13881/j.cnki.hljxmsy.2017.0170.
- [20] 于晓明, 崔闻达, 陈雷, 等. 水温、盐度和溶氧对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响 [J]. 中国水产科学, 2017, 24(3): 543-549. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2015.03.010.
- [21] CAI L, LIU G Y, RACHEL T, et al. Effect of temperature on swimming performance of juvenile *Schizothorax prenanti* [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2014, 40(2): 491-498. DOI: 10.1007/s10695-013-9860-0.
- [22] 李会峰. 鲤科鱼游泳能力及其在鱼道设计中的应用 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [23] YAN G J, HE X K, CAO Z D, et al. The trade-off between steady and unsteady swimming performance in six cyprinids at two temperatures [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2012, 37(6): 424-431. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2012.04.006.
- [24] ANA G V, FRANCISCO J S R, JUAN F F P. Seasonal and daily upstream movements of brown trout *Salmo trutta* in an Iberian regulated river [J]. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2017, 418(9): 1484-1493. DOI: 10.1051/kmae/2016041.
- [25] PEREIRA E, CARDOSO G R, QUINTELLA B R, et al. Proposals for optimizing sea lamprey passage through a vertical-slot fishway [J]. *Ecohydrology*, 2019, 12(4): e2078. DOI: 10.1002/eco.2087.
- [26] CAUDILL C C, KEEFER M L, CLABOUGH T S, et al. Indirect effects of impoundment on migrating fish: temperature gradients in fish ladders slow dam passage by adult chinook salmon and steelhead [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(12): e85586. DOI: 10.1371/journal.pone.0085586.
- [27] 薛薇. 统计分析与 SPSS 的应用 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.
- [28] 李济宾, 张晋昕, 李伟栋. 中位数的置信区间和假设检验 [J]. 循证医学, 2010, 10(6): 365-368. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5144.2010.06.010.