

黄河上游 2 种裂腹鱼感应流速及其与体长的关系

王晓臣, 吕彬彬, 邢娟娟, 李 丹, 王彩宁, 任胜杰

(陕西格林维泽环保技术服务有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 为了探究鱼类感应流速随体长因素的变化, 以黄河上游 2 种裂腹鱼为研究对象, 利用环形水槽实验装置, 采用递增流速法, 测试并分析了不同体长鱼类的感应流速。结果表明, 体长 (BL, 20.67 ± 3.65) cm 的花斑裸鲤 (*Gymnocypris eckloni*) 和 BL (14.50 ± 2.24) cm 的黄河裸裂尻鱼 (*Schizopygopsis pylzovi*) 的绝对感应流速分别为 $(4.97 \pm 1.22) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $(4.52 \pm 0.92) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对感应流速分别为 $(0.24 \pm 0.045) \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $(0.31 \pm 0.052) \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$; 绝对感应流速与体长呈正相关关系, 相对感应流速与体长呈负相关关系, 相对感应流速与体长呈现负相关关系是由于绝对感应流速的增加速率小于体长的增加速率; 2 种裂腹鱼类的绝对感应流速差异不显著 ($P > 0.05$); 构建的绝对感应流速与体长的非线性回归模型能够有效地解释鱼类感应流速对体长的响应。该研究对其他较难捕获测试样本区域的鱼类游泳特性的定性预测研究具有一定指导作用, 也可作为过鱼设施的设计提供基础数据支撑。

关键词: 花斑裸鲤; 黄河裸裂尻鱼; 绝对感应流速; 相对感应流速; 非线性回归

中图分类号: S 914

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Induced flow speed and its relationship to body length of two Schizothoracinae fishes in upper reaches of Yellow River

WANG Xiaochen, LÜ Binbin, XING Juanjuan, LI Dan, WANG Caining, REN Shengjie

(Shaanxi Green Wiser Environmental Protection Technology Co. Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: To investigate the response of fish induced flow speed to body length, we tested the induced flow speed of two Schizothoracinae fishes with different body lengths by increasing velocity in mobile Brett-type swim tunnels. Results show that the absolute induced flow speed of *Gymnocypris eckloni* [Body length (BL): (20.67 ± 3.65) cm] and *Schizopygopsis pylzovi* [BL: (14.50 ± 2.24) cm] were $(4.97 \pm 1.22) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and $(4.52 \pm 0.9) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively; and their relative induced flow speed were $(0.24 \pm 0.045) \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$ and $(0.31 \pm 0.052) \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The absolute induced flow speed was positively related to fish body length, while the relative induced flow speed was negatively related to fish body length since the increasing rate of the absolute induced flow speed was less than that of body length. There was no significant difference in the absolute induced flow speed between these two Schizothoracinae fishes ($P > 0.05$). The constructed non-linear regression model can explain the response of fish induced flow speed to body length effectively. This study provides some guidance for the qualitative prediction of fish swimming characteristics in other areas where it is difficult to capture test samples, and also provide basic data for the design of fish facilities.

Key words: *Gymnocypris eckloni*; *Schizopygopsis pylzovi*; Absolute induced flow speed; Relative induced flow speed; Non-linear regression

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-02-26

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404406); 中国电建西北勘测设计研究院有限公司黄河上游高寒区鱼类保护研究项目 (N201312)

作者简介: 王晓臣 (1987—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事水生生态保护与修复研究。E-mail: wangxiaochen1985@126.com

黄河是中国第二大河流,黄河上游是青藏高原所有外流水系中鱼类区系最为独特的地区^[1],黄河龙羊峡以上河段鱼类区系组成以裂腹鱼亚科和条鳅亚科为主,花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni*)和黄河裸裂尻鱼(*Schizopygopsis pylzovi*)为裂腹鱼亚科鱼类优势种群,主要分布于黄河上游干支流,是黄河上游特有的土著鱼类,其繁殖季节为每年5—7月,具有短距离生殖洄游习性^[2-3]。

目前黄河上游已规划并建设了多座水电站^[4],随着河流水能资源被持续开发,河流生态系统一体性被中断^[5-6],阻断了鱼类的洄游通道,影响了鱼类洄游和种群间的基因交流,鱼类的生存、繁衍受到威胁^[7-11]。为了减缓工程设施给水生生态带来的负面影响,修建过鱼设施、恢复河流生态纵向连通性已成为当前生态修复的研究热点。鱼类行为学中的游泳特性和趋向特征是与过鱼设施设计相关的重要指标,感应流速是众多鱼类游泳能力指标的一种表现形式^[11],是鱼道进口以及鱼道流速设计的关键参数^[12-14]。目前针对鱼类感应流速已开展了较多研究^[15-21]。但关于鱼类感应流速对体长的响应关系的研究较少^[21],关于黄河上游特有土著鱼类的感应流速以及对体长因素的响应等研究尚未见报道。

本研究通过对黄河上游2种裂腹鱼的感应流速测定分析了感应流速对体长的响应关系,建立感应流速对体长的响应模型,以期进一步充实裂腹鱼感应流速数据库,为青藏高原地区鱼类行为学的研究提供基础资料,为鱼道等过鱼设施的设计提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验对象

本次实验对象于2018年7—8月采自黄河上游班多至野狐峡黄河干支流,为了满足过鱼对象需求并降低人为驯化因素对实验结果的潜在影响,实验对象全部为3龄及以上成体或亚成体的自然种群,为了减少对实验对象的人为损伤,捕捞方式为笼网,实验前在暂养箱中暂养6 h以内,并循环加水和增氧,使实验对象达到较佳活力状态。

1.2 实验设备

本实验测试设备采用自主设计的鱼类游泳能力测试水槽(图1),水槽长2.0 m、宽1.0 m、高0.5 m,其中实验舱长度0.8 m,整个实验水槽放在一个相

对较大的水箱内(长2.5 m),实验水槽和水箱内充满水,外部连接可以调节转速的电动机,使用变频器调节电动机转速,从而进一步调节实验水槽内的水流速度。实验水槽一侧为水箱,另一侧为实验舱,电动机螺旋桨在水箱一侧,通过螺旋桨转动调节水流速度,水流通过整流器进入实验舱,整流器可以使实验舱内的水流达到相对均匀的流场状态,在实验舱下游设置拦网阻拦实验对象^[22-23]。

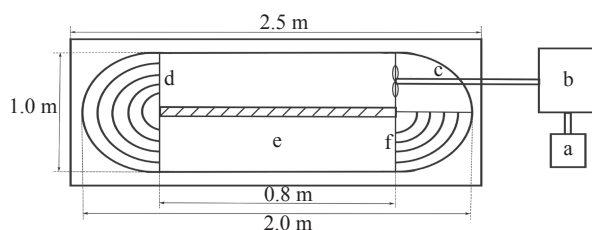


图1 感应流速装置示意图

a. 变频器; b. 电动机; c. 螺旋桨; d. 整流器; e. 实验舱; f. 拦网

Figure 1 Fish induction velocity measurement device

a. Inverter; b. Motor; c. Propeller; d. Rectifier;
e. Test-chamber; f. Wire net

1.3 实验方法

实验采用 Brett^[24-25]“递增流速法”。实验用水来自黄河干流(沉淀处理),水温(16.4~19.7)℃,溶解氧 $\geq 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,通过多次预实验确定将暂养时间不超过6 h的实验对象用于实验,首先将实验对象(单尾)放置于测试水槽中,以5 Hz(游泳区内水流速度约为 $13.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)的水流适应15 min,然后将流速调至0,保持实验对象头部指向与测试水槽水流方向一致,并让实验对象稳定5 s;然后以0.5 Hz为递增量(递增速度约为 $1.625 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),5 s为递增时间,调整设备内水流速度,使水流速度逐步增大,当实验对象调转方向运动时(即鱼类逆流运动时),记录此时设备的水流速度,该水流速度即为鱼类感应流速^[21]。

感应流速即绝对感应流速($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$),为测试实验产生的直接测量结果;相对感应流速($\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$; BL, 体长)则对数据进行转换,为绝对感应流速与鱼类自身体长的相对值,以得到实验对象单位体长的感应流速。

1.4 数据处理

利用LS300-A流速仪对实验舱水流进行标定,用Origin 9.1软件建立实验舱水流速度(v)与变频器频率(x)之间的线性关系式(图2): $y=3.25x-$

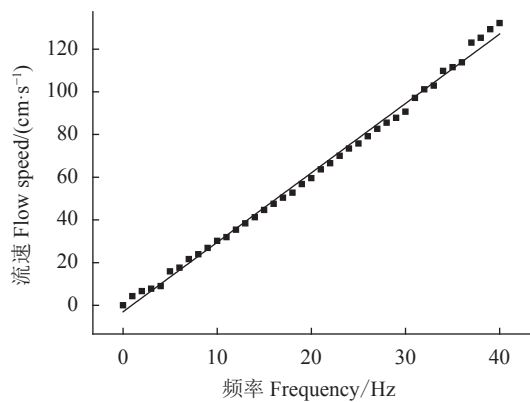


图2 实验舱流速与电动机调节频率的关系
Figure 2 Correlation between test-chamber velocity and motor adjustment frequency

3.02 ($x>0, y>0, R^2=0.996$)。根据线性关系式来间接确定实验对象的感应流速。

采用 Z-score 标准化方法, 对原始数据进行处理, 剔除与平均值偏差超过 3 倍标准差范围的观测数据。实验数据用 Excel 2019 软件处理, 使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。统计结果以“平均值 $\pm$ 标准差 ($\bar{X}\pm SD$)”表示, 自由度 $df=n-1$, 显著性水平 $\alpha=0.05$ 。采用两独立样本 t 检验分析 2 种裂腹鱼之间的感应流速差异。采用双变量相关分析 (Bivariate correlation) 检验 2 种裂腹鱼绝对感应流速和相对感应流速与各自体长之间的关系。采用非线性回归建立 2 种裂腹鱼的体长与感应流速的回归模型。

2 结果

2.1 感应流速结果与分析

对实验结果进行描述性统计分析见表 1 得出, 花斑裸鲤和黄河裸裂尻鱼的绝对感应流速范围。花斑裸鲤的绝对感应流速均值较大, 黄河裸裂尻鱼的较小, 说明黄河裸裂尻鱼对水流变化更加敏感; 花斑裸鲤的相对感应流速均值较小, 黄河裸裂尻鱼的较大; 2 种裂腹鱼的绝对感应流速变异系数均大于相对感应流速变异系数, 表明相对感应流速统计结果的离散程度稍优于绝对感应流速。

结果显示 2 种裂腹鱼感应流速的表征值不一致, 其原因是由于相对感应流速是以体长为除数得到的数据转换结果, 花斑裸鲤体长均值为黄河裸裂尻鱼的 1.43 倍, 而前者的感应流速均值仅为后者的 1.1 倍, 数据转换后产生了这种不一致。

表1 2 种裂腹鱼感应流速统计结果
Table 1 Statistics of induced flow speed of two Schizothoracinae fishes

项目 Item	花斑裸鲤 <i>G. eckloni</i>	黄河裸裂尻鱼 <i>S. pylzovi</i>
尾数 Number of individual	28	28
体长 Body length/cm		
均值 Mean	20.67 $\pm$ 3.65	14.50 $\pm$ 2.24
范围 Range	14.8~27.0	12.2~21.0
绝对感应流速 Absolute induced flow speed/(cm·s ⁻¹)		
均值 Mean	4.97 $\pm$ 1.22	4.52 $\pm$ 0.92
范围 Range	2.62~7.46	2.29~6.64
变异系数 CV	24.50%	20.40%
相对感应流速 Relative induced flow speed/(BL·s ⁻¹)		
均值 Mean	0.24 $\pm$ 0.045	0.31 $\pm$ 0.052
范围 Range	0.15~0.32	0.18~0.40
变异系数 CV	18.80%	16.80%

2.2 感应流速差异性分析

采用两独立样本 t 检验对 2 种裂腹鱼的感应流速及体长进行分析 (表 2), 花斑裸鲤和黄河裸裂尻的绝对感应流速和相对感应流速均满足 Levene 方差齐性检验 ($P>0.05$), 但两者的体长不满足 Levene 方差齐性检验 ($P<0.05$), 需采用校正后的两独立样本检验结果。结果显示, 花斑裸鲤与黄河裸裂尻鱼的绝对感应流速差异不显著 ($P>0.05$), 而两者的相对感应流速则差异极显著 ($P<0.01$)。出现这种差异的原因同样是因体长变量引起, 由于这 2 种鱼的体长存在极显著差异 ($P<0.01$), 导致其相对感应流速也存在极显著差异。

2.3 体长与感应流速相关性分析

根据 2 种裂腹鱼体长与绝对感应流速、相对感应流速的关系图 (图 3), 在实验鱼体长范围内, 绝对感应流速随着体长增长呈增加趋势, 相对感应流速随着体长增长呈减小趋势。双变量相关分析结果显示 (表 3), 2 种裂腹鱼的体长均与绝对感应流速呈极显著正相关关系 ($P<0.01$); 与相对感应流速均呈负相关, 但无统计学意义 ($P>0.05$)。结果表明, 2 种裂腹鱼的体长与绝对感应流速均呈极显著正相关, 体长对 2 种裂腹鱼的绝对感应流速具有较强的解释能力, 可以进一步构建体长与绝对感应流速的回归模型。

表2 2种裂腹鱼感应流速两独立样本t检验结果表

Table 2 Induced flow speed independent-sample t Test of two Schizothoracinae fishes

项目 Item	方差方程的Levene检验 Levene's test for equality of variances		均值方程t检验 T-test for equality of means		
	F	Sig.	t	df	Sig. (双侧)
绝对感应流速 Absolute induced flow speed	1.733	0.194	1.563	54	0.124
相对感应流速 Relative induced flow speed	0.072	0.790	-5.448	54	0.000**
体长 Body length			7.611	44.821	0.000**

注：**.与对照组有极显著性差异 (P<0.01)

Note: **. Very significant difference compared with the control (P<0.01)

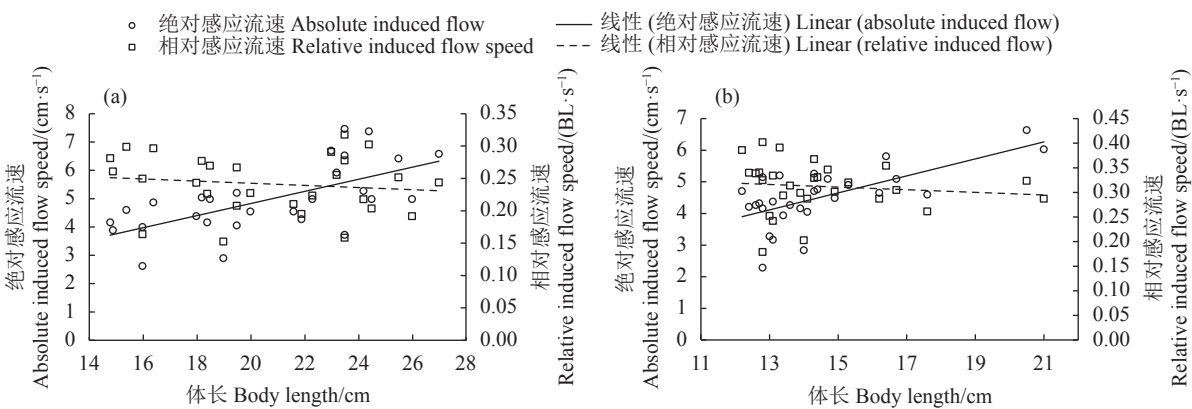


图3 花斑裸鲤 (a) 和黄河裸裂尻鱼 (b) 绝对感应流速、相对感应流速与体长的关系

Figure 3 Relationship between absolute induced flow speed and relative induced flow speed with body length of *G. eckloni* (a) and *S. pylzovi* (b)

表3 2种裂腹鱼体长与感应流速相关分析

Table 3 Bivariate correlation analysis between body length and induced flow speed in two Schizothoracinae fishes

项目 Item	花斑裸鲤 <i>G. eckloni</i>	黄河裸裂尻鱼 <i>S. pylzovi</i>
绝对感应流速 Absolute induced flow speed	$R=0.642$ ($P=0.000$)	$R=0.652$ ($P=0.000$)
相对感应流速 Relative induced flow speed	$R=-0.133$ ($P=0.498$)	$R=-0.115$ ($P=0.560$)

2.4 体长与绝对感应流速回归分析

基于2种裂腹鱼体长与绝对感应流速呈显著正相关关系,进一步采用高斯-牛顿法进行参数估计,对期望函数做泰勒级数展开,再迭代求解,得到非线性回归结果,构建体长与绝对感应流速的回归模型。花斑裸鲤的非线性回归模型为 $y=4.321-0.166x+0.009x^2$ ($R^2=0.420$, $P<0.01$,图4-a),黄河裸裂尻鱼的非线性回归模型为 $y=2.267+0.06x+0.06x^2$ ($R^2=0.427$, $P<0.01$,图4-b)。

3 讨论

3.1 绝对感应流速和相对感应流速的差异性

本研究测定了黄河上游花斑裸鲤和黄河裸裂尻

鱼的绝对感应流速和相对感应流速,从绝对感应流速均值来看,黄河裸裂尻鱼对水流变化的敏感程度高于花斑裸鲤;从相对感应流速来看,花斑裸鲤对水流变化的敏感程度高于黄河裸裂尻鱼;2种裂腹鱼感应流速的表征值不一致。本研究结果与白艳勤等^[16]对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)幼鱼的表征结果以及许晓蓉^[26]关于异齿裂腹鱼(*Schizothorax o'connori*)和巨须裂腹鱼(*S. macropogon*)的表征结果一致。产生这种差异的原因是相对感应流速是以体长为除数得到的数据转换结果,而鱼类体长间的差异性大于绝对感应流速间的差异性。结果显示不同体长的同种或不同种鱼

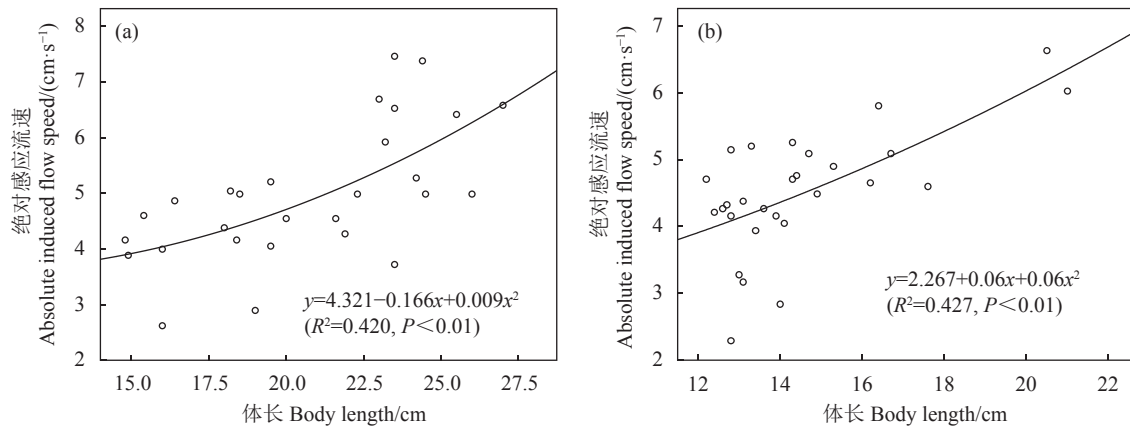


图4 花斑裸鲤 (a) 和黄河裸裂尻鱼 (b) 体长与绝对感应流速非线性回归图

Figure 4 Non-linear regression analysis between body length and absolute induced flow speed of *G. eckloni* (a) and *S. pylzovi* (b)

类应该有一个较小变化范围的绝对感应流速, 其总体标准偏差小于体长总体标准偏差。因此, 相对感应流速不能用来直接比较不同种鱼类对水流变化的敏感程度, 而绝对感应流速可以更直接地比较不同种鱼类对水流变化的敏感程度。

3.2 感应流速差异性原因

本研究结果显示花斑裸鲤和黄河裸裂尻鱼的绝对感应流速范围分别为 $2.62 \sim 7.46$ 和 $2.29 \sim 6.64 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 与王博等^[17]关于光倒刺鲃 (*Spinibarbus hollandi*) 的绝对感应流速 ($6.0 \sim 10.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 以及许晓蓉^[26]关于异齿裂腹鱼和巨须裂腹鱼的绝对感应流速结果 ($6.0 \sim 13.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 ($4.0 \sim 13.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 较为一致, 与蔡璐等^[21]关于光唇裂腹鱼 (*S. lissolabiatatus*)、澜沧裂腹鱼 (*S. lantsangensis*)、云南裂腹鱼 (*S. yunnanensis*)、灰裂腹鱼 (*S. griseus*) 的绝对感应流速 ($10.0 \sim 23.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10.0 \sim 18.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9 \sim 13.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10.0 \sim 16.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 以及王博等^[17]关于白甲鱼 (*Onychostoma sima*) 的绝对感应流速 $10.0 \sim 15.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 较为相近; 以上研究表明不同种鱼类绝对感应流速具有明显的差异性。白艳勤等^[16]认为感应流速的差异性与鱼类的生存环境和习性有关, 洄游性鱼类和流水生境鱼类对水流的变化更加敏感, 与本研究黄河裸裂尻鱼对水流变化更加敏感一致。上述结果还表明裸鲤属和裸裂尻鱼属对水流变化的敏感程度大于裂腹鱼属和白甲鱼属鱼类, 与裂腹鱼类从适应静水环境的原始鲃类进化到适应河川急流环境的进化路径具有一致性^[27]。从鱼类生理学角度看, 鱼类对流速敏感的神经纤维属于体表神经丘, 体表神经丘分散在鱼体表面, 使其表现出趋流性和其他游泳行为^[28-29], 不同种鱼的感应流速差异可能是由于体

表神经丘的分布数量不同, 也可能是栖息于流水生境鱼类的体表神经丘的数量多于栖息于静水生境的鱼类, 但这需从鱼类生理学角度进一步分析和验证。

两独立样本 *t* 检验结果表明, 2 种裂腹鱼的绝对感应流速无显著性差异, 其原因可能与这 2 种裂腹鱼为高度特化种类有关, 它们同是从类似于重唇鱼属的祖先演变而来, 但在不同水文和食物条件下形成, 是平行进化的结果, 亲缘关系较近^[2,27]; 也可能是由于实验误差导致。总体表明亲缘关系较近的鱼类绝对感应流速差异性较小, 但鱼类亲缘关系与其感应流速的差异性还需进一步深入研究。

本研究结果与赵希坤和韩桢锬^[15]研究报道的几种鱼类感应流速均为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 差异较大, 产生这种差异的原因可能主要由实验条件限制所致^[21]; 与白艳勤等^[16]关于瓦氏黄颡鱼的绝对感应流速 [$(33.11 \pm 3.06) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$] 的差异较大, 应该与瓦氏黄颡鱼的栖息环境和身体构造有关, 瓦氏黄颡鱼属底栖性鱼类, 具有扁平胸腹部特征, 可以使鱼类更易贴合水底, 与底部产生摩擦力, 进而表现出更大的绝对感应流速; 与李志敏等^[20]关于厚唇裂腹鱼 (*S. irregularis*) 的绝对感应流速 [$(24.5 \pm 4.13) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$] 差异较大的原因还有待进一步分析。

3.3 绝对感应流速对体长的响应关系

体长对鱼类游泳特性的影响是一个重要的研究课题^[11], 众多相关研究^[17, 20-21, 26, 30-32]都遵循这样的规律: 在一定体长范围内, 鱼类的相对感应流速与体长呈负相关, 而绝对感应流速与体长呈正相关, 本研究结果与上述文献报道结果一致。蔡璐等^[21]认为鱼类体长与绝对感应流速呈正相关的原因是由

于鱼类有逆流习性，当鱼类通过侧线器官感受到水流时开始逆流运动，根据流体力学原理，在流速一定的条件下，体积越大的类似形状物体，其单位重量所受的水流推动力越小，在单位重量条件下所受的水流推进力越大，因而体长较小的鱼更易被水流推动，从而表现出更小的绝对感应流速，即鱼类绝对感应流速和体长呈正相关；该结果有效地解释了同种鱼类体长与绝对感应流速之间的正相关关系。多数研究结果^[11, 17, 20-21]均未给出体长与相对感应流速呈负相关的原因，通过与多数研究结果对比分析

(表 4)，表明体长与相对感应流速呈负相关的原因是由于相对感应流速表征的是鱼类单位体长的感应流速，其数值是绝对感应流速与鱼类自身体长的相对值，体长在相对感应流速数值里以除数的形式存在，在体长与绝对感应流速显著正相关基础上，绝对感应流速的增加速率小于体长的增加速率，从而表现出相对感应流速与体长呈现负相关的一种结果；如果绝对感应流速的增加速率大于体长的增加速率，则相对感应流速与体长呈现正相关。

表4 本研究参考文献中的鱼类体长与感应流速的相关性
Table 4 Correlation analysis between body length and induced flow speed in this study and references

种类 (尾数) Species (Number)	BL/cm		AIF/(cm·s ⁻¹)		RIF/(BL·s ⁻¹)	BL-AIF	BL-RIF
	范围	变幅/%	范围	变幅/%	范围		
花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i> (28)	14.89~27.0	181.3	3.72~6.44	173.1	0.25~0.24	正	负
黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i> (28)	12.20~21.0	172.1	3.90~6.32	162.1	0.32~0.30	正	负
光唇裂腹鱼 ^[21] <i>S. lissolabiatu</i> s (10)	16.25~33.75	207.7	12.5~21.25	170	0.77~0.63	正	负
澜沧裂腹鱼 ^[21] <i>S. lantsangensis</i> (10)	18.13~31.88	175.9	15.15~13.75	90.8	0.84~0.43	负	负
云南裂腹鱼 ^[21] <i>S. yunnanensis</i> (10)	14.60~24.90	170.5	9.38~12.5	133.3	0.64~0.50	正	负
灰裂腹鱼 ^[21] <i>S. griseus</i> (10)	13.75~24.38	175.3	5.63~16.00	284.2	0.41~0.66	正	正
厚唇裂腹鱼 ^[20] <i>S. irregularis</i> (25)	11.89~25.78	216.8	21.54~30.00	139.3	1.81~1.16	正	负

注：BL. 体长；RIF. 相对感应流速；AIF. 绝对感应流速；BL-AIF. 体长与绝对感应流速的相关性；BL-RIF. 体长与相对感应流速的相关性；BL、AIF 等数值根据参考文献线性拟合关系得出

Note: BL. Body length; AIF. Absolute induced flow speed; RIF. Relative induced flow speed; BL-AIF. Correlation between body length and absolute induced flow speed; BL-RIF. Correlation between body length and relative induced flow speed; the values of body length and induced flow speed are obtained according to the linear fitting relationship of the references.

本研究基于体长与绝对感应流速具有较强的相关性，进一步构建了绝对感应流速对体长因素响应的非线性回归模型，可以通过体长参数预测鱼类的绝对感应流速数值，这对于游泳特性预测和鱼类过坝能力预测研究有一定指导作用，对较难获取足够鱼类样本的研究具有一定意义^[21]。

4 结论

本研究表明鱼类绝对感应流速总体标准偏差小于其体长的总体标准偏差，绝对感应流速作为实验直接测量结果可以更直观地表征鱼类对水流变化的敏感程度。2 种裂腹鱼的绝对感应流速与体长呈显著正相关，相对感应流速与体长呈负相关。相对感应流速与体长负相关是因为在体长与绝对感应流速显著正相关基础上，绝对感应流速的增加速率小于体长的增加速率，从而表现出上述结果。本研究构建了 2 种裂腹鱼的非线性回归模型，研究结果可为

青藏高原鱼类行为学研究提供基础资料，为鱼道等过鱼设施的设计提供参考依据。

参考文献:

[1] 唐文家, 何德奎. 黄河上游茨哈峡至积石峡段鱼类资源调查 (2005—2010 年)[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 600-608.
[2] 乐佩琦. 中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目 (下卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 273-379.
[3] 武云飞, 吴翠珍. 青藏高原鱼类 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1991: 437-474.
[4] 安盛勋. 黄河上游水电规划综述 [J]. 西北水电, 2004(3): 1-5.
[5] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. Science, 2005, 308(5720): 405-408.
[6] HENNIG T, MAGEE D. Comment on 'An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales'[J]. Environ Res Lett, 2017, 12(3): 38001.
[7] FAUSCH K D, TORGERSEN C E, BAXTER C V, et al. Landscapes to riverscapes: bridging the gap between research and con-

- servation of stream fishes[J]. Bioscience, 2002, 52(6): 483-498.
- [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.
- [9] CHEN K Q, TAO J, CHANG Z N, et al. Difficulties and prospects of fishways in China: an overview of the construction status and operation practice since 2000[J]. Ecol Eng, 2014, 70(3): 82-91.
- [10] SHI X T, KYNARD B, LIU D F, et al. Development of fish passage in China[J]. Fisheries, 2015, 40(4): 161-169.
- [11] 蔡露, 金瑶, 潘磊, 等. 过鱼设施设计中的鱼类行为研究问题 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3458-3466.
- [12] 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): 39-42.
- [13] 刘志雄, 周赤, 黄明海. 鱼道应用现状和研究进展 [J]. 长江科学院院报, 2010, 27(4): 28-35.
- [14] 郑金秀, 韩德举, 胡望斌, 等. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究 [J]. 水生态学杂志, 2010, 3(5): 104-110.
- [15] 赵希坤, 韩桢鐸. 鱼类克服流速能力的试验 [J]. 水产学报, 1980, 4(1): 31-37.
- [16] 白艳勤, 路波, 罗佳, 等. 草鱼鲢、瓦氏黄颡鱼幼鱼感应流速的比较 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2085-2089.
- [17] 王博, 石小涛, 周琛琳, 等. 北盘江两种鱼感应流速 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2013, 14(2): 223-226.
- [18] 王晓臣, 邢娟娟. 5 种鱼感应流速比较分析 [J]. 水生态学杂志, 2018, 39(2): 77-81.
- [19] 张硕, 陈勇. 黑鲟幼鱼趋流性的初步研究 [J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(3): 282-287.
- [20] 李志敏, 陈明曦, 金志军, 等. 叶尔羌河厚唇裂腹鱼的游泳能力 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1897-1902.
- [21] 蔡露, 王伟营, 王海龙, 等. 鱼感应流速对体长的响应及在过鱼设施流速设计中的应用 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 176-181.
- [22] 石小涛, 陈求稳, 刘德富, 等. 胭脂鱼幼鱼的临界游泳速度 [J]. 水生生物学报, 2012, 36(1): 1-4.
- [23] 刘慧杰, 王从锋, 刘德富, 等. 不同运动状态下鳊幼鱼的游泳特性研究 [J]. 南方水产科学, 2017, 13(2): 85-92.
- [24] BRETT J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon[J]. J Fish Res Board Can, 1964, 21(5): 1183-1226.
- [25] BRETT J R. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature[J]. J Fish Res Board Can, 1967, 24(8): 1731-1741.
- [26] 许晓蓉. 西藏典型裂腹鱼游泳能力及鱼道方案优化数值模拟研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2012: 26-28.
- [27] 曹文宣, 陈宜瑜, 武云飞, 等. 裂腹鱼类的起源和演化及其与青藏高原隆起的关系//青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 118-129.
- [28] VOIGT R, CARTON A G, MONTGOMERY J C. Responses of anterior lateral line afferent neurones to water flow[J]. J Exp Biol, 2000, 203(Pt 16): 2495-2502.
- [29] CARTON A G, MONTGOMERY J C. Responses of lateral line receptors to water flow in the Antarctic notothenioid, *Trematomus bernacchii*[J]. Polar Biol, 2002, 25(10): 789-793.
- [30] HAMMER C. Fatigue and exercise tests with fish[J]. Comp Biochem Physiol, 1995, 112(1): 1-20.
- [31] VERHILLE C E, POLETTI J B, COCHERELL D E, et al. Larval green and white sturgeon swimming performance in relation to water-diversion flows[J]. Conser Physl, 2014, 2(1): 31.
- [32] CAI L, CHRISTOS K, DAVID J, et al. Case study: targeting species and applying swimming performance data to fish lift design for the Huangdeng Dam on the upper Mekong River[J]. Ecol Eng, 2018, 122: 32-38.