

天然水域产卵环境下中华鲟趋触行为的流速响应特征

涂法宪^{1,2}, 黄志勇^{2,3,4}, 石小涛^{1,2}, 张沈威^{1,2}, 朱佳志⁵, 梁栋鑫^{2,3,4}, 姚博远^{3,4}, 常剑波⁶

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 计算机与信息学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 三峡大学 湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 5. 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 湖北 宜昌 443100; 6. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为探究繁殖前期的中华鲟(*Acipenser sinensis*)在天然水域产卵巢内的趋触行为对流速的响应特征, 本研究于2024年11月在长江夹岸水域布设产卵巢, 通过推流泵调控流速以形成不同的流速环境, 并对不同流速条件下的中华鲟趋触行为强度进行了统计与分析。结果显示: (1) 中等流速(0.12~0.20 m/s)条件下趋触行为强度显著高于自然流速(0.05~0.15 m/s, $P<0.01$), 各区域内中华鲟趋触行为强度增幅均达到50%以上, 其中中低流速区域B与高流速A内的趋触行为强度最高, 分别达到(50.10±2.93)次/h与(47.80±5.61)次/h, 而当流速过高(>1.0 m/s)时, 中华鲟的趋触行为强度有所降低, 其中高流速区降幅最大达到28.0%。(2) 中低流速区B的趋触行为发生比例始终最高, 随着流速的增加, 由初始流速下的29.1%逐步增加至35.0%, 且在高流速条件下显著高于其他区域($P<0.01$)。研究表明, 流速对中华鲟趋触行为存在非线性调控作用, 流速增量为0.02~0.10 m/s时, 可最大化促进其趋触行为, 同时繁殖前期中华鲟存在自主选择水流的行为, 其趋触行为更加偏好于在中低流速区域进行, 为优化中华鲟产卵环境流速调控, 修复天然产卵场生境提供了关键理论依据。

关键词: 中华鲟; 天然水域; 趋触行为; 流速偏好; 行为生态学

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

中华鲟(*Acipenser sinensis*)是我国重点保护的珍稀水生动物, 具有重要的科学研究、生态和渔业价值^[1], 随着三峡、葛洲坝等水利工程的修建以及生境退化等诸多因素, 其栖息地与产卵地遭到了较为严重的破坏, 繁殖活动遭受了较大的影响, 导致中华鲟的种群数量急剧减少, 如今中华鲟已经被列为IUCN (International union for conservation of nature)极危物种, 面临着灭绝的风险^[2]。为保护中华鲟的种群延续, 国家各级政府以及科研单位已经采取了一系列的中华鲟保育措施, 而中华鲟的人工繁殖一直是保育的重点环节。近年来诸多科研机构针对中华鲟的人工繁殖展开了一系列研究, 其中在室内养殖池中的

人工繁育工作已经取得了突破性的成果^[3-7], 而室内环境和自然水域情况不同, 目前在自然水域条件下的中华鲟繁育工作仍处在试验阶段, 因此对于自然水域下人工产卵环境中的中华鲟行为特征仍待研究。

鱼类的行为既反映了其内部的生理状态同时也是其对外部环境因素的响应, 不仅与鱼类自身生存所进行的捕食、繁殖等活动密切相关, 还是其与外部环境之间交流及适应的方式^[8]。研究鱼类行为不仅能够加深对鱼类生理状态及行为模式的了解, 还有助于理解鱼类对外部环境变化的响应机制, 找到其行为与环境因素之间的相关性, 为人工繁育及栖息地修复等提供理论支

收稿日期: 2025-03-09 修回日期: 2025-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(52279069); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2023AFA005); 中国长江三峡集团有限公司项目(2022HJ83-007)

作者简介: 涂法宪(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态水利。E-mail: 1271599391@qq.com

通信作者: 石小涛, E-mail: fishlab@163.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

撑^[9-12]。趋触行为指的是生物倾向于接触或靠近固体表面的行为,是生物趋触性的一种表现方式,鱼类的趋触行为主要表现为贴壁游动或石缝藏身,是一种回避空旷区域并对其栖息场所进行探索的表现方式,趋触行为强度受到环境因素的影响,与光照强度以及昼夜节律等密切相关^[13],同时在不同栖息水层之间也表现出差异性,总体呈现出从上层鱼到下层鱼逐渐增强的趋势^[14],充分体现了环境因子对鱼类自身行为的影响。同时趋触行为能够促使鱼类在封闭空间的边缘活动以更快适应陌生环境^[15],因此促进趋触行为的发生不仅有助于缩小鱼类活动范围进而促进鱼类集群,而且能够消除鱼类对陌生空间的恐惧感,维持其生理状态的稳定。中华鲟作为我国特有的淡水保护性底栖鱼类,探究其在人工营造的产卵环境下的趋触行为对于环境因素的响应模式,不仅有助于加深对底栖鱼类行为特征的理解,同时也为人工繁育过程中促进中华鲟集群以及维持中华鲟生理健康提供了理论支持。

本研究于长江夹岸的自然水域中布置人工产卵巢,并对其环境流速进行人工调配,通过水下摄像的方式对产卵巢中中华鲟的趋触行为进行观测,同时详细记录水温、流速等环境因子数据,对自然水域中不同流速条件下的中华鲟繁殖前期的趋触行为特征进行了统计分析,从而探究其与流速之间的响应关系,以期丰富中华鲟行为研究资料,并为自然水域中中华鲟人工繁殖环境优化、中华鲟产卵栖息地营造与修复提供理论指导与数据基础。

1 材料与方法

1.1 试验用鱼

试验所用中华鲟为中国长江三峡集团公司中华鲟研究所人工繁育的处于繁殖前期的子二代亲鱼,随机挑选出规格一致且健康的中华鲟9尾,规格为体长 (181.2 ± 4.0) cm,体质量 (84.23 ± 11.08) kg,并在试验期间通过水下相机对其进行持续健康监测。

1.2 试验仪器设备

为有效地观测中华鲟对流速的响应,本试验所用产卵巢由网片围成,规格为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}\times 6\text{ m}$,网片规格为1 600D \times 40股,网目尺寸为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 。其顶部与底部分别使用绳索对浮筒与船锚进行

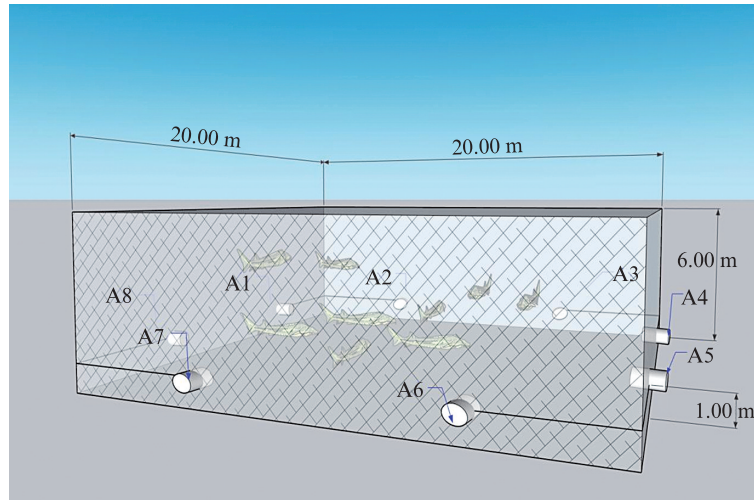
连接完成产卵巢的固定,所用的固定绳索直径为18 mm。产卵巢四周布设有8台霸勒斯水下相机(IPC5MPIR—PBX10),布设高度距底部1.5 m,用于对产卵巢中的中华鲟行为进行观测并记录,其布设位置如图1所示。产卵巢布置于天然水域中,为获得试验水域的实际温度,本试验采用温度记录器(MX2203)进行水温的测量与记录,水温数据记录间隔为10 min,通过HOBObconnect程序(1.8.0.1716899801)进行数据的上传及保存。同时为了对实验水域的流速进行调控,于产卵巢靠近上游的一端布置了7台凯普德推流泵(QJB-W7.5/12,7.5 kW),推流泵布设位置距离产卵巢10 m,每台推流泵均可独立控制,以便通过不同的开泵情况营造不同的水域流速,产卵巢内流速使用路博便携式流速仪(LB-JCM1)进行测量并记录。

1.3 试验设计与参数设置

本试验的实施地点为湖北省宜昌市胭脂坝附近的夹岸水域($30.637\ 356\ 3^{\circ}\text{N}$, $111.338\ 233\ 4^{\circ}\text{E}$),此处江水流速平缓,能够最大限度地减少自然流速变化对实验区域的干扰,维持实验区域流速的稳定性^[16-18]。且此处底质以卵石为主,满足中华鲟生长所需地形特征,较为适宜试验工作的开展。为研究繁殖前期产卵巢内中华鲟的趋触行为是否会受到流速的影响,针对不同流速下产卵巢内中华鲟的趋触行为强度开展了对比试验。设计了不开启推流泵(工况1)、开启3台推流泵(工况2)以及开启7台推流泵(工况3)等3种不同的推流工况,以营造不同的流速环境。为确保相机布设区域内流速测量结果的准确性,在实验区域内选取3个典型位置作为测量点,分别为相机布设点、相机前方0.9 m处以及布设区域中心位置,以获得具有代表性的流速数据。工况1条件下,产卵巢中为自然流速,流速为 $0.05\sim 0.15\text{ m/s}$,平均流速为 0.1 m/s 。工况2条件下,产卵巢内A1与A2相机布设区域的流速为 $0.12\sim 0.52\text{ m/s}$,平均流速为 0.20 m/s ,A3与A4相机布设区域的流速为 $0.08\sim 0.32\text{ m/s}$,平均流速为 0.15 m/s ,A5与A6相机布设区域的流速区间为 $0.04\sim 0.25\text{ m/s}$,平均流速为 0.12 m/s ,A7与A8相机布设区域的流速为 $0.10\sim 0.36\text{ m/s}$,平均流速为 0.18 m/s 。工况3条件下,产卵巢内A1与A2相机布设区域的流速为 $0.80\sim 1.80\text{ m/s}$,平均流速为 1.20 m/s ,A3与A4相

机布设区域的流速为 0.30~1.40 m/s, 平均流速为 0.70 m/s, A5 与 A6 相机布设区域的流速为 0.20~0.80 m/s, 平均流速为 0.5 m/s, A7 与 A8 相机布设区域的流速为 0.80~1.20 m/s, 平均流速为 1.00 m/s(表 1)。由此可按照平均流速将产卵巢内部划

分为 4 个区域, 分别为 A1 与 A2 相机布设的高流速区 A, A3 与 A4 相机布设的中低流速区 B, A5 与 A6 相机布设的低流速区 C 以及 A7 与 A8 相机布设的中高流速区 D。



A1~A8 分别表示用于观测的 8 台相机。

A1~A8 respectively represent 8 cameras used for observation.

图 1 中华鲟产卵巢相机布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of camera layout in Chinese sturgeon spawning net cage

通过对 3 种不同流速条件下的中华鲟趋触行为强度进行对比从而探究流速对中华鲟趋触行为的影响, 同时对比产卵巢内不同流速区域中的中华鲟趋触行为强度以探究中华鲟在繁殖前期对流速是否存在偏好性。为避免光照与温度因素的干扰, 本试验选取 7:00—17:00 作为拍摄记录时段, 并选取气温变幅较小的 11 月 10 日至 11 月 18 日开展试验, 试验期间每日的平均水温为 21.13~21.20 °C(图 2), 属于中华鲟适宜生长温度^[19]。分别设置不开泵、开启 3 台泵以及开启 7 台泵的流速工况, 每种流速工况分别维持 3 d, 通过水下相机记录中华鲟在产卵巢中的趋触行为。

试验定义当中华鲟沿着产卵巢内壁在 0.5 倍标准体长的距离内游动, 并且移动 2 个体长单位的距离时为发生 1 次趋触行为^[20], 统计结束后进行趋触行为强度 \bar{C}_{ij} 与趋触行为发生比例 P_{ij} 的计算, 计算公式为

$$\bar{C}_{ij} = \frac{C_{ij}}{t_j} \pm \sigma \quad (i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, 3) \quad (1)$$

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^4 C_{ij}} \quad (i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, 3, 4$ 分别为高流速区 A、中低流速区 B、低流速区 C 与中高流速区 D; $j=1, 2, 3$ 分别为工况 1、工况 2 与工况 3; C_{ij} 为 j 工况下 i 区域内中华鲟趋触行为发生的次数; t_j 为 j 工况下的监测时长; σ 为标准差; \bar{C}_{ij} 为 j 工况下 i 区域内平均每小时中华鲟的趋触行为发生次数, 次/h; P_{ij} 为 j 工况下 i 区域内趋触行为发生比例。

1.4 数据统计与分析

采用 YOLOv10 目标检测模型与 sort 跟踪算法对水下相机所采集到的视频进行处理, 分割出中华鲟趋触行为视频片段并标注对应的时间以及相机序列号, 然后采用自编程序对所得的趋触行为视频片段进行处理, 统计每台相机所检测到的中华鲟趋触行为次数并计算趋触行为强度。所有实验数据均采用 SPSS 30.0 软件进行分析, 采用单因素方差分析 (One way ANOVA), 并利用 LSD 多重比较法比较各组的差异, 数据结果以平均值±标准差 (Mean±SD) 表示, 当 $P<0.05$ 时, 表示差异显著。

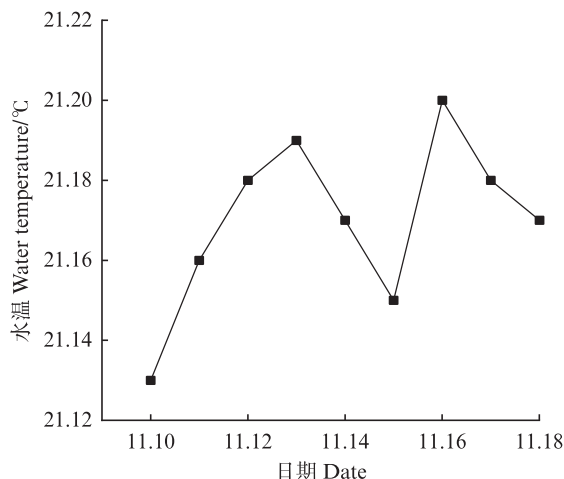


图2 试验期间每日平均水温

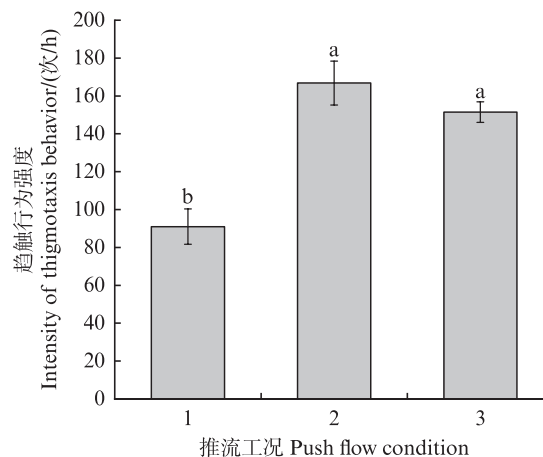
Fig. 2 Daily average water temperature during the experiment

2 结果

2.1 流速变化对中华鲟趋触行为强度的影响

不同流速工况下各区域中华鲟趋触行为强度如图3所示,3种工况条件下中华鲟趋触行为呈现出不同的强度,不同流速条件下的中华鲟趋触行为强度存在显著性差异($P<0.01$),随着工况流速的增加,工况2与工况3流速条件下中华鲟的趋触行为强度均极显著大于工况1流速条件($P<0.01$),而工况2与工况3流速条件下的中华鲟趋触行为强度之间无显著性差异($P>0.05$)。

表2为不同开泵情况下产卵巢内各区域的趋触行为强度情况,在初始流速(0台泵)下,各区域内中华鲟的趋触行为强度表现:中低流速区B的强度最高,为 (26.5 ± 2.24) 次/h;高流速区A和低流速区C的强度相近,分别为 (23.8 ± 4.46) 次/h和 (23.5 ± 3.85) 次/h;中高流速区D的强度最低,为 (17.2 ± 1.88) 次/h。随着开泵情况的改变,各区域内中华鲟的趋触行为强度呈现出先增后减的变化趋势,各区域的中华鲟趋触行为强度均在开启3台泵时达到峰值,其中B区域强度最大为 (50.10 ± 2.93) 次/h,其次为A区域强度为 (47.80 ± 5.61) 次/h,区域C与区域D分别为 (38.10 ± 6.07) 、 (30.80 ± 4.50) 次/h。当开启7台泵时各区域趋触行为强度均有所回落,其中B区域仍保持在最高强度,达到 (47.20 ± 1.74) 次/h,区域A、区域C以及区域D的趋触行为强度均保持在相对较低的水



不同字母表示不同流速工况下中华鲟趋触行为强度具有显著性差异($P<0.05$)。

There is a significant difference ($P<0.05$) in the intensity of contact behavior of Chinese sturgeon under different flow velocity conditions represented by different letters.

图3 不同流速下中华鲟趋触行为强度变化

Fig. 3 Changes in the intensity of contact behavior of Chinese sturgeons under different flow velocities

平,分别为 (34.40 ± 2.38) 、 (32.20 ± 1.31) 和 (26.80 ± 3.10) 次/h。

从各区域中华鲟的趋触行为强度的变化情况可以看出,流速的改变对中华鲟趋触行为有着显著影响,不同流速区域的趋触行为强度呈现出先增后减的变化趋势,这表明适当的流速增加能够促进中华鲟趋触行为的进行,而当流速过高时则会削弱其趋触行为强度。

2.2 中华鲟流速偏好性

如图4所示在工况1流速条件下各区域的趋触行为强度之间均无显著性差异($P>0.05$),在工况2流速条件下,区域A与区域B($P>0.05$)、区域A与区域C($P>0.05$)以及区域B与区域C($P>0.05$)的中华鲟趋触行为强度之间无显著性差异,而区域A与区域D($P<0.05$)的中华鲟趋触行为强度之间存在显著性差异,区域B与区域D($P<0.01$)的趋触行为强度之间存在极显著性差异,区域C与区域D($P>0.05$)的趋触行为强度之间无显著性差异。在工况3流速条件下,区域A与区域C($P>0.05$)、区域A与区域D($P>0.05$)以及区域C与区域D($P>0.05$)的趋触行为强度之间无显著性差异,区域A与区域B($P<0.01$)、区域B与区域C($P<0.01$)、区域B与区域D($P<0.01$)的趋触行为强度之间存在极显著性差异。

表1 不同开泵情况下产卵巢内不同区域的流速分布情况

Tab. 1 Flow velocity distribution in different areas of the spawning net cage with different thrust pumps turned on

开泵情况 Pump operation status	区域 Region	平均流速 Average velocity/(m/s)	流速分布范围 Flow velocity distribution range/ (m/s)
0 台泵 Zero pumps	高流速区 A	0.10	0.05~0.15
	中低流速区 B	0.10	0.05~0.15
	低流速区 C	0.10	0.05~0.15
	中高流速区 D	0.10	0.05~0.15
3 台泵 Three pumps	高流速区 A	0.20	0.12~0.52
	中低流速区 B	0.15	0.08~0.32
	低流速区 C	0.12	0.04~0.25
	中高流速区 D	0.18	0.10~0.36
7 台泵 Seven pumps	高流速区 A	1.20	0.80~1.80
	中低流速区 B	0.70	0.30~1.40
	低流速区 C	0.50	0.20~0.80
	中高流速区 D	1.00	0.80~1.20

表2 不同开泵情况下产卵巢内各流速区域的趋触行为强度

Tab. 2 The intensity of contact behavior of Chinese sturgeons in different regions with different thrust pumps turned on

区域 Region	开泵情况 Pump operation status	趋触行为强度 Intensity of contact behavior/(次/h)
高流速区 A High velocity zone A	0 台泵	23.80±4.46
	3 台泵	47.80±5.61
	7 台泵	34.40±2.38
中低流速区 B Low to medium velocity zone B	0 台泵	26.50±2.24
	3 台泵	50.10±2.93
	7 台泵	47.20±1.74
低流速区 C Low velocity zone C	0 台泵	23.50±3.85
	3 台泵	38.10±6.07
	7 台泵	32.20±1.31
中高流速区 D Medium to high velocity zone D	0 台泵	17.20±1.88
	3 台泵	30.80±4.50
	7 台泵	26.80±3.10

如图 5 所示,在工况 1 流速条件下,中低流速区 B 的趋触行为发生比例为 29.1%,高流速区 A、低流速区 C 的趋触行为发生比例分别为 26.2%、25.8%,中高流速区 D 趋触行为发生比例最低为 18.9%;进入工况 2,中低流速区 B 与高流速区 A 的趋触行为发生比例进一步增长至 30.0% 与 28.7%,而低流速区 C 的趋触行为发生比例则下降至 22.8%,中高流速区 D 变化较小,其趋触行为发生比例微降至 18.5%;在工况 3 流速条件下,区

域 B 趋触行为发生比例升至 35.0%,高流速区 A 与低流速区 C 的趋触行为发生比例分别回落至 22.7% 与 21.3%,中高流速区 D 比例则增长至 21.0%。可以看出,各区域的趋触行为发生比例均随着流速的增加而不断变化,且中低流速区域的趋触行为发生比例始终最高,这表明中华鲟在面临流速差异时存在自主选择不同流速水域的行为,同时其趋触行为更加偏好于在中低流速区域进行。

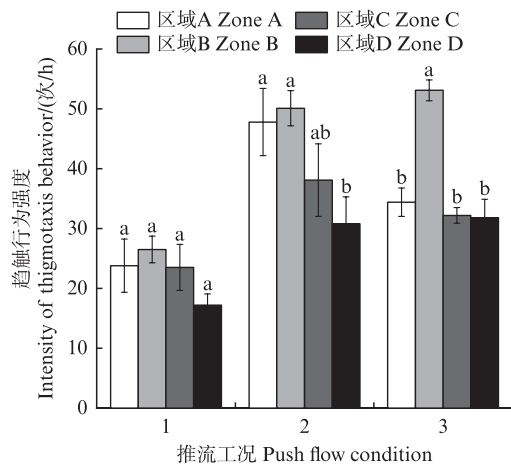


图4 不同流速下各区域的中华鲟趋触行为强度变化
Fig. 4 Changes in the intensity of contact behavior of Chinese sturgeons in different regions under different flow velocities

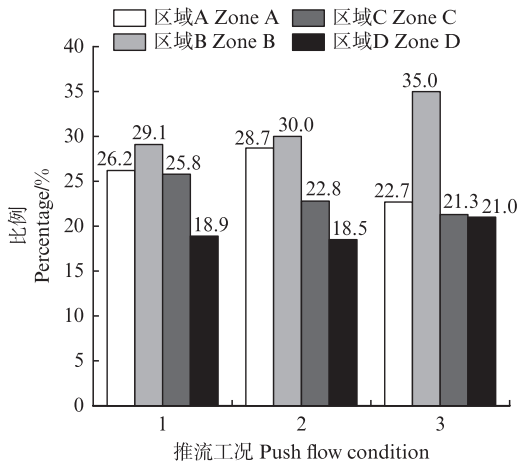


图5 不同流速工况下各区域的中华鲟趋触行为强度比例
Fig. 5 Proportion of contact behavior intensity of Chinese sturgeon in different regions under different flow velocity conditions

3 讨论

3.1 流速对趋触行为强度的影响

游泳行为是鱼类在整个生命周期中适应水域生态环境的重要方式,而水流变化对鱼类游泳行为具有直接影响^[21]。KE等^[22]通过对鲢和鲤鱼的行为学试验发现,设置障碍物或改变流速时,两种鱼类的游泳行为均发生显著变化;钟金鑫等^[23]对云南华鲮幼鱼的研究同样证明,流速会对鱼类游泳行为产生影响。这些研究表明,鱼类在游泳过程中会主动根据水流变化调整行为模式。HVAS等^[24]的研究显示,大西洋鲑在较高流

速环境中,会控制自身游速在网箱内循环游动,以减少个体间相互碰撞。朱智文^[25]关于流速对花鲈行为、生长及生理生化等影响的研究也得出相似结论:在低流速条件下,适当增加流速可促使花鲈向养殖池外圈活动。这与本研究结论一致,即适宜的流速增加能够促进中华鲟在产卵巢外围游动,进而导致趋触行为强度提升。

当流速升高至较高水平时,鱼类为维持游泳状态稳定,会通过增加摆尾频率调整运动模式,此时其运动方式逐渐从有氧运动转向无氧运动。这一过程中,肝脏加速分解肝糖原产生乳酸,导致血液中乳酸浓度显著升高^[26],同时肌肉内乳酸大量积累,伴随乳酸根与H⁺生成,加剧血液酸化进程。血液酸化打破机体内部环境平衡,使鱼类更易疲劳,进而导致运动能力和新陈代谢水平下降^[27]。为减少能量消耗,鱼类往往通过趋流性行为策略进行适应性调节。李想等^[28]和宋波澜等^[29]对红鳍银鲫的研究表明,低流速时其游泳无定向性,而流速增加后趋流性显著增强;李丹等^[30]对杂交鲟幼鱼的研究亦发现,高流速下幼鱼趋流率升高,且在顶流断面上分布比例最高。这与本研究中中华鲟的行为表现一致:高流速环境下,中华鲟为降低能量消耗,会减少大范围活动并增加趋流行为比例,进而导致趋触行为强度减弱。

3.2 趋触行为的流速偏好性

CAI等^[31]在对花鲈鲤的测试中发现,较低流速水流(0.10~0.27 m/s)对其具有更强吸引力。李鹏程等^[32]关于长江鲟在天然水域人工产卵生境中繁殖行为特征的研究表明,长江鲟在繁殖期间存在自主选择不同流速水流的行为,且在繁殖期前更偏好在中低流速区域(0.15~0.33 m/s)活动。这一系列研究揭示,在复杂流场中鱼类普遍存在对偏好性水流的自主选择行为,与本研究中华鲟在区域流速差异下偏好中低流速区域的现象一致。从能量代谢与行为策略角度分析,鱼类在高速水流中活动将导致过度能量消耗,引发的疲劳会迫使鱼类返回低流速区恢复体力^[33],因此其对中低流速区域的显著偏好,更可能是繁殖前期通过减少游动距离、降低代谢速率以储存能量的生存策略体现。

本研究探究得出流速增量为0.02~0.10 m/s时能够促进中华鲟的趋触行为发生,同时中华鲟在繁殖期之前更偏向于在中低流速区域活动,这

表明在天然水域中进行中华鲟产卵场景的建设时应当严格把控环境流速,在进行产卵环境的流速设计时需平衡趋触行为激励与能量消耗阈值。通过适量的流速增加以最大程度激发中华鲟的趋触行为,促进中华鲟繁殖前期的集群行为并维持其生理状态稳定,同时防止过高的流速增幅对其趋触行为强度的削弱。其次,产卵巢设计需兼顾流速分区异质性,通过设计推流泵布局形成梯度化流速场,在营造高流速产卵区域的同时设置足够的中低流速区域以供中华鲟栖息与聚集,为中华鲟提供多样化的行为选择空间,从而提高其繁殖适应性。此外,研究结果可为长江中下游中华鲟产卵场修复工程提供理论支撑,例如在底质改造中结合流速调控,通过改变产卵场局部的流速条件在产卵场内形成梯级流速场,满足野生中华鲟在繁殖期前的流速偏好。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 刘文成,李君轶,李鹏程,等. 三峡蓄水以来葛洲坝下中华鲟产卵场河床质特征变化规律[J]. 水生生物学报, 2024, 48(4): 568-578.
- LIU W C, LI J Y, LI P C, et al. Variation regularity of bottom substrate characteristics in spawning ground of Chinese sturgeon downstream the Gezhouba dam from impounding of the three gorge reservoir [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(4): 568-578.
- [2] 刘文成. 葛洲坝下中华鲟产卵场河床地形及底质演变特征[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- LIU W C. Characteristics of riverbed topography and substrate evolution of Chinese sturgeon spawning grounds under Gezhouba Dam [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [3] 郭柏福,常剑波,肖慧,等. 中华鲟初次全人工繁殖的特性研究[J]. 水生生物学报, 2011, 35(6): 940-945.
- GUO B F, CHANG J B, XIAO H, et al. The reproductive biology of first filial generation of *Acipenser sinensis* growing up in the freshwater environment [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(6): 940-945.
- [4] 刘鉴毅,危起伟,陈细华,等. 葛洲坝下中华鲟繁殖生物学特性及其人工繁殖效果[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1397-1402.
- LIU J Y, WEI Q W, CHEN X H, et al. Reproductive biology and artificial propagation of *Acipenser sinensis* below Gezhouba Dam [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1397-1402.
- [5] 罗江,杜浩,危起伟,等. 濒危中华鲟人工群体的繁殖生物学[J]. 中国水产科学, 2020, 27(3): 269-276.
- LUO J, DU H, WEI Q W, et al. Reproductive biology of an artificial population of endangered Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(3): 269-276.
- [6] 田甜,张德志,杜合军. 中华鲟主要细菌性疾病及其临床诊断与防控[J]. 水产科学, 2018, 37(6): 800-805.
- TIAN T, ZHANG D Z, DU H J. Clinical diagnosis and treatment on main bacterial diseases in Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* [J]. Fisheries Science, 2018, 37(6): 800-805.
- [7] 庄平,张涛,赵峰,等. 论拯救中华鲟野生种群及其栖息生境[J]. 水生生物学报, 2024, 48(9): 1625-1632.
- ZHUANG P, ZHANG T, ZHAO F, et al. Conservation of the wild population of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and its habitats [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(9): 1625-1632.
- [8] 李敏讷,王妍,王新源,等. 鱼类行为生态水力学模型研究现状与发展趋势[J]. 湖泊科学, 2024, 36(5): 1323-1335.
- LI M N, WANG Y, WANG X Y, et al. Research status and trends of models integrating fish behavior and eco-hydraulic dynamics [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(5): 1323-1335.
- [9] 宋韵涛,曾令锋,谭细畅,等. 基于 PIT 技术的老口航运枢纽鱼道通行效率及鱼类行为分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 216-222.
- SONG Y T, ZENG L F, TAN X C, et al. Passage efficiency and fish behavior of Laokou navigation junction fishway using passive integrated transponder (PIT) telemetry [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(8): 216-222.
- [10] 魏天娇,胡祝华,范习禹. 水产养殖中水质与鱼类行为双向映射模型研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 290-299.
- WEI T J, HU Z H, FAN X Y. Construction of bidirectional mapping model between water quality and fish behavior in aquaculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 290-299.
- [11] SHIPLEY O N, NICOLL A, CERRATO R M, et al. Performance of a fine-scale acoustic positioning system for monitoring temperate fish behavior in relation to offshore marine developments [J]. Animal Biotelemetry, 2024, 12(1): 36.
- [12] YANG Y X, YU H, ZHANG X, et al. Fish behavior recognition based on an audio-visual multimodal interactive fusion network [J]. Aquacultural Engineering, 2024, 107: 102471.
- [13] SCHNÖRR S J, STEENBERGEN P J, RICHARDSON M K, et al. Measuring thigmotaxis in larval zebrafish

- [J]. Behavioural Brain Research, 2012, 228(2): 367-374.
- [14] 邱宁, 喻斌, 贾建娜, 等. 6种不同水层长江鱼类的趋触行为[J]. 四川动物, 2023, 42(4): 381-389.
- QIU N, YU Y, JIA J N, et al. Thigmotaxis of six species of fish in different water layers of the Yangtze River[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2023, 42(4): 381-389.
- [15] TREIT D, FUNDYTUS M. Thigmotaxis as a test for anxiolytic activity in rats[J]. Pharmacology Biochemistry and Behavior, 1988, 31(4): 959-962.
- [16] 朱庭耀, 李冬春, 向坤, 等. 流速对鱼类的影响及其在循环水养殖中的应用[J]. 水生生物学报, 2025, 49(1): 012517.
- ZHU T Y, LI D C, XIANG K, et al. Flow velocity on fish and its application in recirculating aquaculture system [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2025, 49(1): 012517.
- [17] GOODMAN B J, GUY C S, CAMP S L, et al. Shovelnose sturgeon spawning in relation to varying discharge treatments in a Missouri river tributary [J]. River Research and Applications, 2013, 29(8): 1004-1015.
- [18] BENSON R L, TURO S, MCCOVEY JR B W, et al. Migration and movement patterns of green sturgeon (*Acipenser medirostris*) in the Klamath and Trinity rivers, California, USA [J]. Environmental Biology of Fishes, 2007, 79(3): 269-279.
- [19] 王姝然, 范厚勇, 徐嘉楠, 等. 弗氏柠檬酸杆菌 RPA-LFD 快速检测方法的建立及应用[J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(2): 241-249.
- WANG S R, FAN H Y, XU J N, et al. Establishment and application of a method for rapid detection of *Citrobacter freundii* by recombinase polymerase amplification (RPA) combined with lateral flow strips (LFD)[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2024, 39(2): 241-249.
- [20] 陈兵, 李香林, MEEGASKUMBURA M. 不同眼型金线鲃洞穴鱼类趋触行为的对比研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(3): 128-134.
- CHEN B, LI X L, MEEGASKUMBURA M. Comparison of thigmotaxis of *Sinocyclocheilus cavefish* with different eye morphologies [J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(3): 128-134.
- [21] 钱振家, 徐金钺, 张成林, 等. 不同流速对豹纹鲤棘鲈摆尾频率和血液生理的影响[J]. 南方水产科学, 2023, 19(2): 89-97.
- QIAN Z J, XU J C, ZHANG C L, et al. Effect of different flow velocity on tail beat frequency and blood physiology of *Plectropomus leopardus* [J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(2): 89-97.
- [22] KE S F, TU Z Y, TAN J J, et al. Effects of obstacles and flow velocity on locomotory behavior in juvenile, silvercarp, *Hypophthalmichthys molitrix* [J]. River Research and Applications, 2021, 37(1): 91-99.
- [23] 钟金鑫, 张倩, 李小荣. 流速对云南华鲮幼鱼游泳行为的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(35): 17137-17139, 17153.
- ZHONG J X, ZHANG Q, LI X R. Effects of water velocities on swimming behavior of juvenile *Bangana yunnanensis* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(35): 17137-17139, 17153.
- [24] HVAS M, FOLKEDAL O, OPPEDAL F. What is the limit of sustained swimming in *Atlantic salmon* postsmolts? [J]. Aquaculture Environment Interactions, 2021, 13: 189-198.
- [25] 朱智文. 流速对花鲈行为、生长摄食和生理生化影响的研究[D]. 淮安: 淮阴工学院, 2024.
- ZHU Z W. Effects of flow velocity on behavior, growth, physiology and biochemistry of *Lateolabrax maculatus* [D]. Huai'an: Huaiyin Institute of Technology, 2024.
- [26] KIEFFER J D. Limits to exhaustive exercise in fish [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2000, 126(2): 161-179.
- [27] MILLIGAN C L. Metabolic recovery from exhaustive exercise in rainbow trout [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 1996, 113(1): 51-60.
- [28] 李想, 林小涛, 宋波澜, 等. 流速对红鳍银鲫幼鱼游泳状态的影响[J]. 动物学杂志, 2010, 45(2): 126-133.
- LI X, LIN X T, SONG B L, et al. Effects of water velocities on swimming performances of juvenile tin foil barb *Barbodes schwanenfeldi* [J]. Chinese Journal of Zoology, 2010, 45(2): 126-133.
- [29] 宋波澜, 林小涛, 王伟军, 等. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化[J]. 动物学报, 2008, 54(4): 686-694.
- SONG B L, LIN X T, WANG W J, et al. Effects of water velocities on rheotaxis behaviour and oxygen consumption rate of tin foil barbs *Barbodes schwanenfeldi* [J]. Acta Zoologica Sinica, 2008, 54(4): 686-694.
- [30] 李丹, 林小涛, 李想, 等. 水流对杂交鲟幼鱼游泳行为的影响[J]. 淡水渔业, 2008, 38(6): 46-51.
- LI D, LIN X T, LI X, et al. Effects of water current on swimming performance of juvenile hybrid sturgeon (*Husoduricus Georgi* ♂ × *Acipenser schrenckii* Brandt ♀) [J]. Freshwater Fisheries, 2008, 38(6): 46-51.
- [31] CAI L, HOU Y Q, KATOPODIS C, et al. Rheotaxis and swimming performance of Perch-barbel (*Percocypris pingi*, Tchang, 1930) and application to design of fishway entrances [J]. Ecological Engineering, 2019, 132: 102-108.
- [32] 李鹏程, 吴金明, 李君轶, 等. 天然水域产卵生境营造

下长江鲟自然繁殖行为特征及效果[J]. 中国科学: 生命科学, 2025, 55(2): 366-374.

LI P C, WU J M, LI J Y, et al. The characteristics and effect of natural reproductive behavior of Yangtze River sturgeon under the creation of spawning habitat in natural water body[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2025, 55(2): 366-

374.

[33] LIU H, LIN J Q, WANG D S, et al. Experimental study of the behavioral response of fish to changes in hydrodynamic indicators in a near-natural environment [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110813.

Velocity response characteristics of contact behavior of Chinese sturgeon in natural aquatic spawning environment

TU Faxian^{1,2}, HUANG Zhiyong^{2,3,4}, SHI Xiaotao^{1,2}, ZHANG Shenwei^{1,2}, ZHU Jiazhi⁵, LIANG Dongxin^{2,3,4}, YAO Boyuan^{3,4}, CHANG Jianbo⁶

(1. School of Water Resources and Environment, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Three Gorges University Hubei Province Fish Crossing Dam Technology International Science and Technology Cooperation Base, Yichang 443002, Hubei, China; 3. School of Computer and Information Science, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 4. Key Laboratory of Intelligent Visual Monitoring for Hydroelectric Engineering in Hubei Province, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 5. Chinese Sturgeon Research Institute of China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, Hubei, China; 6. School of water resources and hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: In order to investigate the response characteristics of the contact behavior of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) in the ovary during the early stage of reproduction to flow velocity in natural water bodies, this study set up ovaries in the Yangtze River estuary in November 2024. The flow velocity was regulated by a push flow pump to form different flow velocity environments, and the intensity of the contact behavior of Chinese sturgeon under different flow velocity conditions was statistically analyzed. The results showed that: (1) Under the condition of moderate flow velocity (0.12–0.20 m/s), the intensity of contact behavior of Chinese sturgeon was significantly higher than that of natural flow velocity (0.05–0.15 m/s) ($P < 0.01$), and the increase in contact behavior intensity of Chinese sturgeon in each region reached more than 50%. Among them, the contact behavior intensity in the low and medium flow velocity region B and the high flow velocity region A was the highest, reaching (50.10 ± 2.93) times/h and (47.80 ± 5.61) times/h, respectively. However, when the flow velocity was too high (> 1.0 m/s), the contact behavior intensity of Chinese sturgeon decreased slightly, with the highest decrease of 28.0% in the high flow velocity region. (2) The proportion of contact behavior in the low to medium flow velocity zone B is always the highest, gradually increasing from 29.1% at the initial flow velocity to 35.0% with the increase of flow velocity, and significantly higher than other zones under high flow velocity conditions ($P < 0.01$). Research has shown that flow velocity has a nonlinear regulatory effect on the contact behavior of Chinese sturgeons. Moderately increasing flow velocity can maximize the stimulation of their contact behavior. At the same time, during the early stages of reproduction, Chinese sturgeons have the ability to autonomously choose water flow, and their contact behavior is more inclined to occur in areas with low to medium flow velocities. This study provides a key theoretical basis for optimizing the velocity regulation of the spawning environment of *Acipenser sinensis* and repairing the habitat of the natural spawning ground.

Key words: Chinese sturgeon; natural waters; thigmotaxis behavior; flow rate preference; behavioral ecology