



论文

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

李鹏程¹, 吴金明¹, 李君轶¹, 仲嘉¹, 刁亚芹², 周波³, 周亮⁴, 禄盛超⁵, 王煜琦⁶,
杜浩^{1,5,6*}

1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 武汉 430223

2. 湖北理工学院电气与电子信息工程学院, 黄石 435003

3. 四川省农业科学院水产研究所, 成都 611731

4. 宜宾珍稀水生动物研究所, 宜宾 644000

5. 贵州大学动物科学学院, 贵阳 550025

6. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070

* 联系人, E-mail: duhao@yfi.ac.cn

收稿日期: 2024-07-07; 接受日期: 2024-10-21; 网络版发表日期: 2024-12-05

国家重点研发计划(批准号: 2021YFD1200304)、中国水产科学研究院基本科研业务费(批准号: 2023TD08)和国家自然科学基金(批准号: 32102799)资助

摘要 重塑长江鲟自然繁殖是恢复长江鲟(*Acipenser dabryanus*)自然种群的重点和难点. 2023年3月, 通过营造水流、底质等生境条件, 我们首次成功诱导长江鲟在天然水域繁殖. 记录和视频资料显示, 长江鲟对营造的生境具有典型的繁殖响应行为: 临近繁殖阶段, 长江鲟活跃加剧, 平均每小时跃出水面1.6次; 繁殖前, 长江鲟活跃频次最高的区域为产卵巢中流速较低的区域(0.04~0.36 m/s); 繁殖开始后, 长江鲟在产卵巢中等流速区域(0.32~0.60 m/s)活动频次大幅增加, 在高流速区域(0.1~1.34 m/s)出现的次数也显著增多. 雄鱼排精时伴随快速摆尾, 频率达到 232.71 ± 13.74 次/min. 雌鱼排卵有两种模式: 一种是类似雄鱼的快速摆尾, 但频率仅 140.38 ± 13.53 次/min; 另一种是侧向大幅度摆尾, 频率为 105.20 ± 22.25 次/min. 本次繁殖亲鱼参与率达75%, 繁殖受精率为54%. 这是首次在天然水域通过环境调控成功诱发长江鲟自发交配繁殖, 为长江鲟野外种群恢复重建奠定了基础.

关键词 长江鲟, 生境营造, 产卵场, 繁殖行为

研究鱼类行为有助于理解物种与环境及不同物种之间的生态关系和互作, 认识生态系统的功能和结构, 找到行为发生的环境局限性, 从而制定合适的资源养护和栖息地修复等保护策略^[1,2]; 减少人类活动对濒危物种的影响, 提高种群恢复能力, 维持生态系统平

衡^[3,4]. 自然繁殖是鱼类生活史的关键环节, 当产卵栖息地环境条件满足鱼类自然交配繁殖的需求时, 自然繁殖活动才可能发生, 因此对自然繁殖行为的研究有助于揭示鱼类自然繁殖的生态环境需求, 从而为产卵场的修复提供依据. 由于受大坝建设、航道疏浚、挖

引用格式: 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. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 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 waterbody (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2025, 55: 366–374, doi: 10.1360/SSV-2024-0121

沙采石等人类活动的影响, 体型大、寿命长、性成熟晚、对栖息生境要求高的鲟鱼类(*Acipenser* spp.)成为全球受威胁程度最高的鱼类, 超过70%的种类处于CR(极度濒危)等级及以上(<https://www.iucnredlist.org/en>)^[5], 由于野外资源量严重衰退、生活史周期长以及产卵栖息地丧失等因素, 导致对鲟鱼繁殖行为的研究较少, 甚至一些已经失去了研究的机会. 其中, 一些鲟鱼在自然产卵场中繁殖的观测报道, 表明水温、底质、水流、溶解氧和污染等环境因子与鲟鱼繁殖行为密切相关^[6-8], 水温不仅影响鲟鱼性腺发育, 还决定了受精卵孵化率和胚胎发育速度; 较高的流速则有助于保持底质无沉积物覆盖, 从而为受精卵提供一个干净的附着表面; 卵石或砾石底质为受精卵提供了附着点, 有助于防止受精卵被水流冲走. 多种鲟鱼的繁殖行为均展现出对环境因子的主动选择, 短吻鲟会优先选择卵石或砾石底质区域进行繁殖^[9], 水温是短吻鲟(*Acipenser brevirostrum*)繁殖行为发生的关键因素, 短吻鲟会随水温的变化进行迁徙^[10]; 湖鲟(*Acipenser fulvescens*)通常选择水流湍急、底质为砾石或卵石的区域作为产卵场^[11,12], 繁殖的最佳水温区间在11.5~16.0℃, 繁殖发生时, 会聚集到产卵场, 雌鱼在产卵场中排卵, 雄鱼同步排精; 海湾鲟(*Acipenser oxyrinchus desotoi*)偏好在污染程度较低、溶解氧较高的水域繁殖, 更倾向于选择卵石或砾石底质区域, 作为产卵场^[13,14]. 部分鲟鱼繁殖阶段具有长距离迁徙溯河, 寻找产卵场的行为, 中华鲟和海湾鲟均从海洋迁徙到淡水河流中进行繁殖, 其中, 中华鲟繁殖洄游距离达到数千公里, 整个过程包括繁殖洄游迁徙、繁殖前停留、繁殖前在产卵场数公里至数十公里往返运动、繁殖后迁徙^[15].

长江鲟(*Acipenser dabryanus*), 又名达氏鲟, 隶属硬骨鱼纲, 软骨硬鳞总目, 鲟形目, 鲟科, 鲟属鱼类, 是我国特有珍稀鱼类. 历史分布区为金沙江下游和长江中上游, 不进行远距离洄游, 为淡水定居性鱼类^[16]. 其历史产卵场主要位于冒水至合江之间的江段, 比较可靠且规模较大的产卵场位于宜宾附近的南广、安边、马家黑石包和泸县的观音沱等处, 产卵场一般位于主河道的石砾滩处, 对水体透明度要求较高, 水深5~13 m, 水温15~19℃, 流速1.2~1.5 m/s, 距离产卵场下游不远处有沙泥底质的湾沱^[17], 由于技术手段等因素的限制, 长江鲟产卵场分布是通过捕捞亲鱼和仔鱼的推断所得, 并未直接观测到长江鲟的繁殖行为, 因此, 对长江

鲟繁殖期间生境的选择和需求, 尚存在较大的不确定性. 过度捕捞、栖息地退化和水污染等影响, 长江鲟的自然种群在过去50年中急剧下降^[18], 自2000年起, 长江鲟未被观测到野外繁殖^[19], 2022年7月21日世界自然保护联盟(IUCN)宣布长江鲟野外灭绝(EW). 长江鲟自然繁殖行为和产卵场生境需求研究的缺乏, 严重制约了长江鲟野外种群恢复与重建的效果. 恢复自然繁殖之前, 无法再通过野外调查手段获得长江鲟繁殖期间环境选择和行为模式.

本研究在前期室内人工产卵场模拟技术诱导长江鲟繁殖基础上^[20,21], 2023年在长江夹江天然水域中, 通过研制具有产卵环境模拟调控的“产卵巢”成功诱导长江鲟在天然水域首次自然交配产卵成功, 为我们开展长江鲟繁殖行为提供了机会. 试验期间通过人工记录以及水下摄像机拍摄等方式, 详细观测记录了长江鲟自发繁殖期间的行为特征, 包括长江鲟的典型集群、追逐和繁殖互作行为, 统计分析了长江鲟活跃度以及对模拟环境的偏好性. 相关研究可为解答长江鲟自然繁殖生态环境需求、制定长江鲟产卵场栖息地修复对策、制定金沙江梯队调度策略提供重要参考价值, 为长江鲟野外种群恢复重建奠定基础.

1 研究方法

1.1 试验设计

长江宜宾段是历史上长江鲟重要的栖息和繁殖江段, 因而, 选择四川省宜宾市江安县竹岛夹江水域, 在长江鲟繁殖季节开展此次试验(图1). 试验江段在长江鲟繁殖季节3~5月份流速小于0.2 m/s, 且底质有大量泥沙沉积, 原始生境不适宜长江鲟自然繁殖, 所以, 我们通过人工营造合适的生境条件来诱导长江鲟自发繁殖. 为有效的观测长江鲟对营造环境的响应和开展繁殖效果的评估工作, 我们设计了长、宽、高分别为5、3、3 m大小的开放式产卵巢(图2), 产卵巢采用铜芯线网包裹, 以将试验长江鲟亲鱼限制在产卵巢内, 产卵巢周边布设可见光红外水下摄像机(海康威视200万像素1080P摄像头改造加装防水外壳), 记录试验期间亲鱼的行为特征, 总计布设8台水下相机进行行为观测, 水下相机位置如图2中a1~a8所示, 水下相机a6和a7下水后不久先后发生故障, a8为挂在产卵巢后的移动相机, 其位置不固定, 因此, 本研究中仅采用a1~a5

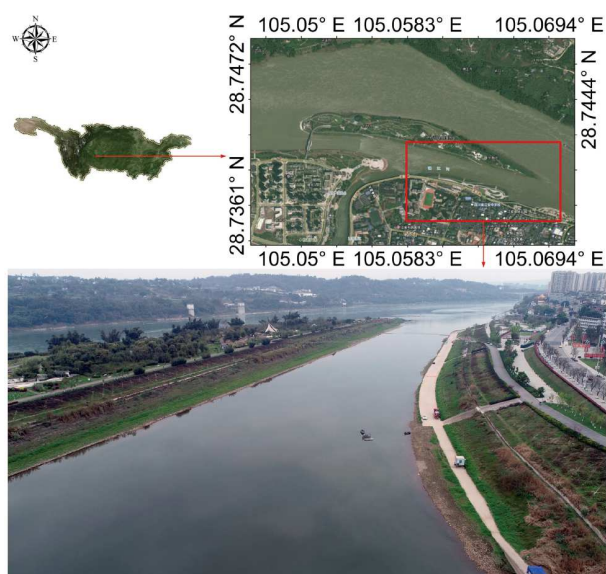


图1 开展试验水域

Figure 1 Water area where the test was carried out

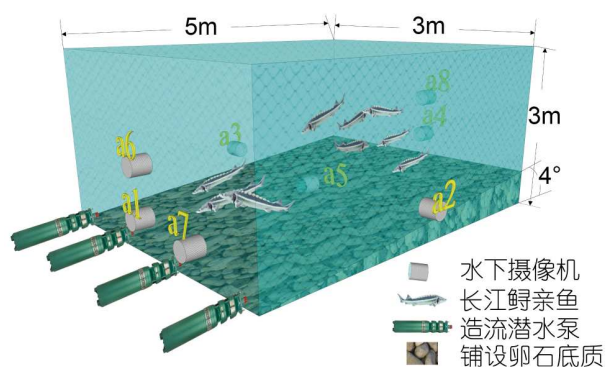


图2 长江鲟产卵巢示意图及水下摄像头分布

Figure 2 Yangtze sturgeon spawning nest and the distribution of underwater cameras

水下相机的数据进行分析,水下相机a3侧靠近深泓线,由于产卵巢轻微向深泓线一侧倾斜,该位置水深略深于a2侧。产卵巢采用了可组装拆卸的构造方式,运输至江边后,在试验现场完成组装后,由潜水员勘察好水下地形,选定放置位置后,采用大型吊车将产卵巢布置于距离岸边约10 m远处,并由吊车配合潜水员进行卵石铺设,产卵巢没入水中深度约2.5 m,产卵巢底部铺设10~20 cm粒径的卵石,铺设时自产卵巢前端至尾部形成约4°的负坡,产卵巢顶部可打开,并设计有可供站立的踏板,便于环境因子测量及设备维护,产

卵巢前端底部均匀布置4台5.5 kw三相潜水泵营造适宜长江鲟繁殖的流场,潜水泵与岸边的变频器相连,通过变频器可以独立调整每台潜水泵的流速大小。试验用亲鱼共计20尾,雌雄各10尾,于2023年3月19日早晨,由运鱼车和快艇运入产卵巢中。试验期间对产卵巢内水温每日进行监测,为分析繁殖期间流速对长江鲟繁殖的作用方式,实验结束后,我们将调节流速的变频器,调节到长江鲟繁殖时的频率,采用流速仪对产卵巢底部流速进行测量(总计测量了170个点),并通过插值获取底层流速分布。

1.2 繁殖行为观测与数据分析

为了获取长江鲟繁殖期间的行为模式,我们通过摄像机记录、岸边观测和潜水员水下作业等方式,进行了长江鲟繁殖期间的亲鱼活跃程度观测、交配行为观测,分析了长江鲟繁殖期间的生境偏好,并对繁殖效果进行了评估。

1.2.1 亲鱼活跃度

实验期间,由多名工作人员在监控室轮流值守,通过直接观测以及水面摄像机回放,手动记录繁殖前后,每2 h鲟鱼跃出水面的次数,以分析繁殖期间长江鲟跃出水面行为的变化。

$$AvgC_i = \frac{C_i}{t_i},$$

其中, i 为可选值繁殖前、繁殖中、繁殖后,分别表示繁殖前、繁殖中和繁殖后3个阶段; C_i 表示每个阶段长江鲟跃出水面的次数,次; t_i 表示每个阶段的总时间,h; $AvgC_i$ 表示每个阶段平均每小时跃出水面的次数,次/h。

1.2.2 繁殖行为

通过回放水下摄像机记录的画面,总结长江鲟繁殖期间的典型行为,还原长江鲟繁殖期间的活动模式,对记录的排精排卵视频进行慢放分析,获取长江鲟排精排卵时的摆尾频率,加深对长江鲟生物学特征的理解。

1.2.3 繁殖行为偏好

分繁殖前、繁殖中和繁殖后三个阶段,分别选取不同位置水下摄像头记录的视频片段,统计分析长江鲟停留区域偏好。

$$\text{AvgBstop}_{i,j} = \frac{B_{\text{total},i,j}}{t_{\text{total},i}},$$

其中, $\text{AvgBstop}_{i,j}$ 表示第 i 个阶段亲鱼在第 j 个摄像头前停留的时间比例, 无量纲; $B_{\text{total},i,j}$ 表示第 i 个阶段, 亲鱼在第 j 个摄像头前停留的时间, s; $t_{\text{total},i}$ 表示第 i 个阶段亲鱼在摄像头前停留的总时间, s.

1.2.4 繁殖效果统计

繁殖效果的评估包括亲鱼参与率和受精率统计. 潜水员随机采集部分卵粒, 置于孵化筐中, 待卵粒发育出神经胚后, 进行受精率统计. 在试验前和试验完成后, 对亲鱼进行B超检查, 通过试验前后B超结果, 判断亲鱼是否参与繁殖, 进而计算亲鱼繁殖参与率.

2 结果

2.1 试验期间的环境参数

试验期间, 水温在17.2~20.1℃之间(图3), 基本保持在适宜繁殖的范围. 流速在0.0~2.0 m/s范围内(图4), 仅靠近水泵极小的区域内存在超过1.5 m/s的流速, 试验期间, 未进行变频器频率调整, 以保持整个试验期间流场稳定.

2.2 亲鱼活跃程度

2022年3月19日早晨, 采用运鱼车和快艇, 将待产亲鱼转运入产卵巢中, 整个转运工作14:00时结束, 准备工作完成后, 开始调控产卵巢中水流. 19~20日早晨, 亲鱼活动相对较少, 20日6:00时开始, 亲鱼活动显著加剧, 在产卵巢中后部摆尾游动, 并开始频繁地跃出水面, 整个跃出水面过程大约持续1~2 s, 表现为头部向斜上方探出水面后, 向前方落入水中, 头部入水后, 可见尾部摆动, 21日8:00时, 确认亲鱼发生繁殖行为, 该阶段总计持续42 h, 繁殖不同阶段亲鱼跃出水面情况如图5所示, AvgC_{pre} 值达到1.60次/h; 21日8:00时, 亲鱼发生繁殖后, 亲鱼以小范围缓慢聚群活动为主, 结合水下摄像监控以及捞网网查看, 我们判断该阶段共持续22 h, 发生了两个批次的繁殖, 此阶段 $\text{AvgC}_{\text{during}}$ 值降至0.41次/h; 3月22日6:00时, 确认亲鱼完成繁殖后, 我们对亲鱼产后活动进行了持续观测, 产后亲鱼呈现出疲劳状态, 多数亲鱼仅在底层水流较缓区域停留或缓慢游动, 该过程持续数小时后, 亲鱼逐步恢复游动, 但活

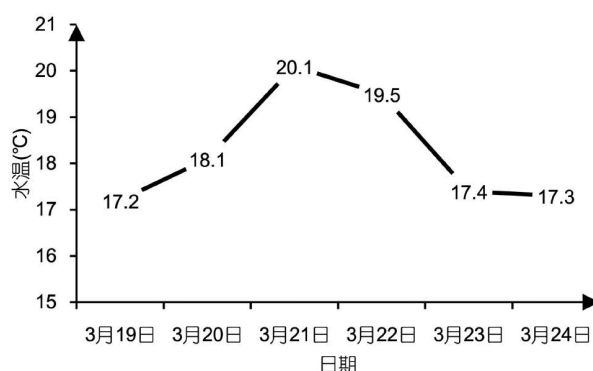


图3 试验期间水温变化

Figure 3 Water temperature changes during the experiments

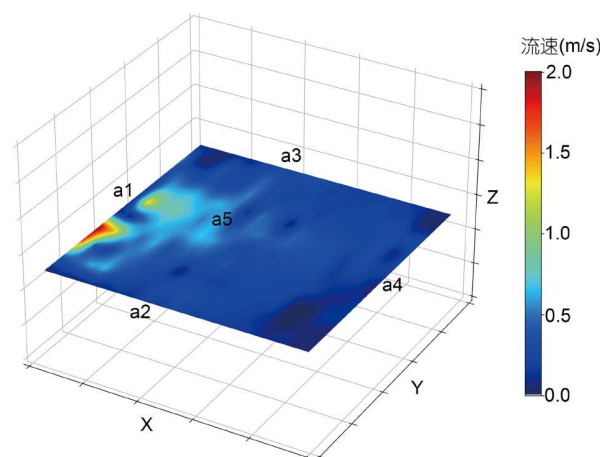


图4 流场分布情况

Figure 4 Distribution of flow field

动区域仍主要集中在流速较低的区域, 此阶段 $\text{AvgC}_{\text{post}}$ 值, 进一步降低至0.24次/h.

2.3 繁殖行为

亲鱼繁殖时, 会先在小范围内聚集(图6A), 雄鱼一般在雌鱼侧后方位置, 雌鱼排卵时, 雄鱼在雌鱼后方开始进行排精(图6B), 视频监控结果显示, 雄鱼排精时, 尾部快速作小幅度摆动, 摆动频率约 233 ± 13.74 次/min, 排精的同时, 加速向前游动, 雌鱼排卵具有两种行为模式, 一种是类似于雄鱼的原地摆尾(图6C), 卵粒快速飘向后方, 另外一种是在离地面约20~50 cm高的位置, 侧向摆尾游动, 播撒卵粒(图6D), 原地摆尾时, 摆动频率约 140 ± 13.53 次/min, 侧向游动摆尾时, 摆动频

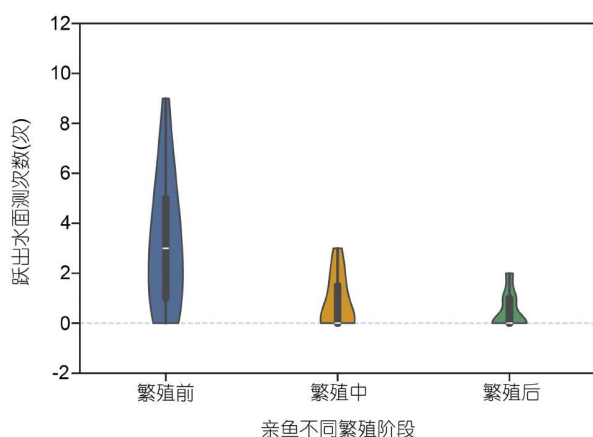


图5 不同繁殖阶段亲鱼跃出水面次数

Figure 5 The frequency of broodstock leaping out of the water at different reproductive stages

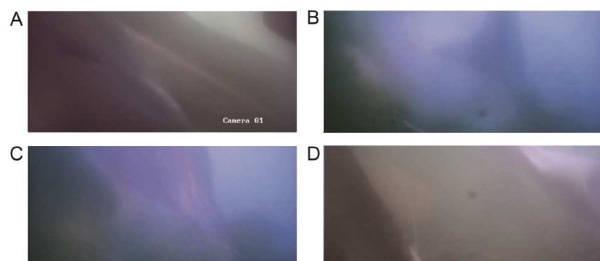


图6 亲鱼交配行为。A: 多尾亲鱼聚集; B: 卵粒飘过时雄鱼排精; C: 雌鱼原地摆尾排卵; D: 雌鱼侧身摆尾排卵

Figure 6 Broodstock mating behavior. A: The gathering of multiple broodstocks; B: male sturgeons release sperm as eggs drift by; C: female sturgeons release eggs while tail-beating in place; D: female sturgeons release eggs with lateral tail-beating

率约 105 ± 22.25 次/min, 摆动幅度较大。

2.4 产卵生境选择

提取不同摄像头前方 0.22 m^2 区域的底层流速, 如图7所示, a1附近的平均流速最高为 0.65 m/s , 由于水泵产生的水流柱在离水泵较近的区域存在间隙, 间隙处水流速度较低, 因此a1处流速分布范围较广, 在 $0.10 \sim 1.34 \text{ m/s}$ 之间; 其次是a5区域, 平均流速为 0.45 m/s , 流速分布范围为 $0.32 \sim 0.60 \text{ m/s}$; a3附近的流速在 $0.22 \sim 0.36 \text{ m/s}$ 之间, 平均流速为 0.29 m/s ; a2附近流速均值略小于a3, 流速在 $0.15 \sim 0.33 \text{ m/s}$ 之间, 平均流速为 0.25 m/s ; 流速最小的为a4附近, 平均流速仅 0.19 m/s , 流速分布区间为 $0.04 \sim 0.31 \text{ m/s}$ 。依据系统聚类结果, 可将5个位置处流速场分为3类, 第一类为a1

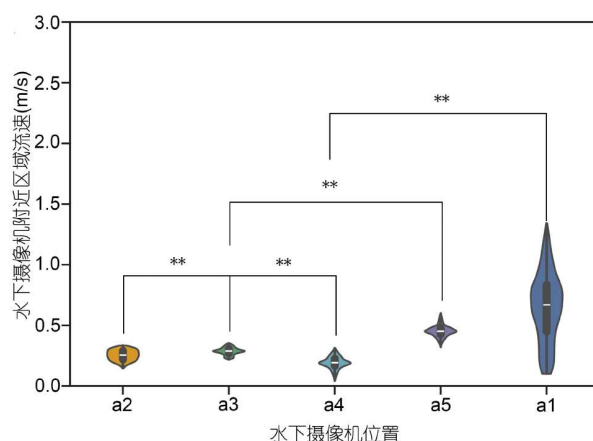


图7 不同区域流速统计结果

Figure 7 Statistical results of flow velocity in different areas

处, 其流速显著高于其他区域, 定义为高流速区, 第二类为a5处, 定义为中流速区, 第三类为a2、a3和a4处, 定义为低流速区。

在不同繁殖阶段, 长江鲟在各位置停留时间比例存在差异, 如图8所示, 在繁殖发生前, 长江鲟在a2区域的AvgBstop值, 显著高于在其他区域的AvgBstop值, a2区域流速较低, 适合长江鲟繁殖前栖息, a3、a4区域与a2相似, 流速较低, 繁殖前, 长江鲟在此停留的平均时间也较高; 而繁殖发生过程中, a5和a1处的AvgBstop值显著提升, a2处的AvgBstop值出现大幅度下降, 显然此阶段, 长江鲟在中高流速区域的活动强度有所增加; 繁殖发生后, 长江鲟在a2处的AvgBstop值出现大幅度的上升。按照流速分区来看, 各分区不同阶段AvgBstop值见表1, 繁殖发生前, 高流速区AvgBstop值为 0.01 , 中流速区AvgBstop值为 0.18 , 低流速区AvgBstop均值为 0.27 ; 繁殖发生过程中, 高流速区AvgBstop值为 0.11 , 中流速区AvgBstop值为 0.30 , 低流速区AvgBstop均值为 0.20 ; 繁殖完成后, 高流速区AvgBstop值为 0.10 , 中流速区AvgBstop值为 0.28 , 低流速区AvgBstop均值为 0.21 ; 由此可推断, 长江鲟繁殖前、中、后整个过程, 存在由低流速区域迁移至中高流速区域的行为, 适宜的流速对长江鲟的繁殖可能具有促进作用, 一个完整的产卵场应该具备适宜繁殖产卵的中流速区域, 和适宜栖息的低流速区域。从此次试验的结果来看, 高流速刺激有助于促进长江鲟繁殖, 但是长江鲟繁殖期间仅是增加了前往高流速区域的频率, 并非一直在高流速区域活动。

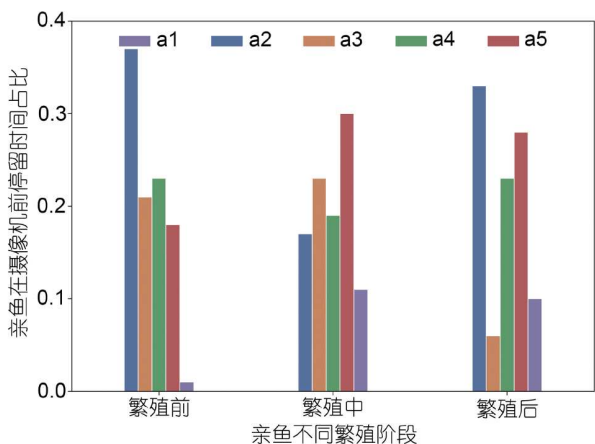


图8 亲鱼繁殖不同阶段在摄像机前停留时间占比分布
Figure 8 The percentage of time that broodstocks spend in front of the camera at different stages of reproduction

表1 不同繁殖阶段各区域AvgBstop值
Table 1 AvgBstop values for each area during different reproductive stages

繁殖阶段	低流速区	中流速区	高流速区
繁殖前	0.27	0.18	0.01
繁殖中	0.20	0.30	0.11
繁殖后	0.21	0.28	0.10

2.5 繁殖效果

亲鱼繁殖前后的B超检查对比, 如图9所示, 结果显示, 8条雌鱼和7条雄参与了繁殖, 繁殖参与率达到75%. 后续通过捞卵网收集卵粒, 如图10所示, 进行受精率统计, 此次繁殖受精率达到了54%, 总计孵化出约2000尾幼苗.

3 讨论

本研究通过产卵环境模拟调控, 成功诱导长江鲟在天然水域中自然繁殖, 并成功出苗, 表明人工保种长江鲟仍然具备自然繁殖的本能, 只要环境条件合适, 雌雄亲本达到一定的资源量, 就能够自然繁殖成功. 同时也揭示项目团队前期围绕长江鲟自然繁殖生态参量范围的准备是可行的^[20], 找到了破解长江鲟自然繁殖连续中断20余年的可能途径, 为长江鲟野外种群恢复重建奠定了坚实的理论和实践基础. 通过对长江鲟野外繁殖监控视频的分析, 我们发现长江鲟发生繁殖前存在跃出水面的现象, 这与Bruch和Binkowski^[11]的研

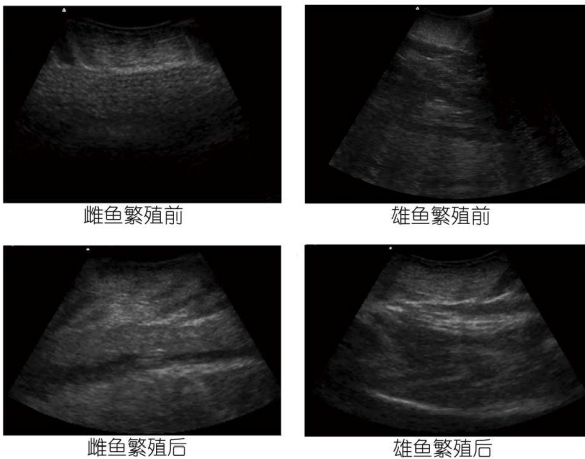


图9 长江鲟繁殖前后B超检查对比
Figure 9 Comparison of ultrasound examinations before and after Yangtze sturgeon reproduction

究相一致, 不同点在于, 文献中在繁殖前, 鲟鱼存在跃出水面的行为与水温升高有关, 而我们试验过程中水温均位于长江鲟适宜繁殖的水温区间, 由此推测跃出水面现象可能是长江鲟开始繁殖的信号之一. 试验中观测到长江鲟繁殖总时间约22 h, 相比于湖鲟8-12 h的持续产卵时间要长, 但也可能是由于试验中多条雌鱼产卵时间具有一定的间隔或批次所导致. 试验中观测到长江鲟偏好停留区域在繁殖前、繁殖中和繁殖完成后三个阶段具有显著的变化, Goodman等人^[22]对密苏里铲鲟的研究表明, 密苏里铲鲟在繁殖期会选择高流量的支流, 这与我们的研究结果一致, 说明鲟鱼繁殖期间具有主动选择水流的行为. 通过与其他鲟鱼繁殖行为的对比, 我们发现, 人工保种的长江鲟依然具有鲟鱼的基本繁殖特征, 能够自发完成繁殖, 这与一项对密苏里铲鲟的研究结果相一致^[23].

此次试验中, 我们观察到鲟鱼在繁殖期间在小范围内, 有自发选择水流的行为, 且在不同繁殖阶段, 对水流选择有所不同, 这意味着产卵场重建或生态调度可以在局部进行, 且仅改变局部水流, 一方面工程代价较小, 另一方面, 仅改变局部水流条件, 使得在小范围内可以塑造不同流速梯度的水流, 从而满足鲟鱼繁殖期的需求, 极端情况下, 可构建类似此研究中的长江鲟产卵巢的装置, 将底部卵石结构固定, 去除围网, 供野生鲟鱼繁殖. 此外, 试验中繁殖期间, 长江鲟偏好的高流速为0.32~0.60 m/s, 这与历史长江鲟产卵场1.0 m/s的流速^[24]有显著的差异, 可能来源于野生群体和人工保



图10 捞卵网收集卵粒及原位孵化

Figure 10 Egg collection with net and *in-situ* incubation

种群体本身的差异, 这可能是人工环境下长江鲟机能发生退化导致, 这意味着人工保种的群体需要进行强化训练或进一步改良养殖环境, 进行增殖放流时, 应该加强成体或亚成体的野化训练, 增强其游泳能力, 也可能是由于获取相关资料数据时, 测量手段不足或测量点位不足导致, 历史纪录数据偏高, 还可能是我们的产卵巢限制了长江鲟对更高流速的选择, 繁殖期间, 高流速a1处的AvgBstop值也出现了显著的增长, 但a1处流速分布区间较大, 还无法确认高流速是否具有决定性的影响, 这需要进一步开展相关试验进行验证。

长江鲟对人工营造的产卵生境表现出显著的响应行为, 这表明栖息地修复对长江鲟种群的恢复具有重要作用, 同时, 基于对产卵分布的调查显示, 卵粒在空间上分布离散, 而不是在广泛认为适合该鲟鱼的产卵场中均匀分布^[25], 这可能是适宜性假设不精确所造成的, 因此, 通过对长江鲟等珍稀鱼类建立水下观测系统, 观测其对环境的响应有助于更好地制定保护策略。通过控制水流速率和底质类型模拟自然产卵环境, 可以有效提升鲟鱼的繁殖成功率^[26], 此外, 生态调度在维持适宜的水温和流量方面也能发挥关键作用, 特别是在关键的繁殖阶段, 确保环境条件稳定有助于鲟鱼顺利完成繁殖^[27,28], 但一般研究中关注较多的是鲟鱼繁殖时的产卵场生境, 而较少关注鲟鱼产前栖息地的生境, 产前栖息地关系到鲟鱼聚集以及繁殖期间顶流后的休息, 正如我们观测所示, 长江鲟在每个繁殖阶段, 均不会仅停留在一种流速区域, 因此, 不仅维持高流速区域, 附近存在供栖息的低流速坑塘供其栖息^[29], 也应纳入栖息地修复和进行生态调度的考量中。

获取正常行为模式, 是界定异常反应的基础, 以往由于技术手段限制, 没有观测到长江鲟繁殖期间的行

为模式。鱼类异常行为通常是对环境改变的响应^[30,31], 此次, 繁殖期间长江鲟行为的观测, 可为长江鲟产卵场修复和重建等工作提供参考, 观测长江繁殖期间的异常反应, 以逐步改善长江鲟产卵场条件。

本次试验中, 通过产卵场营造, 成功诱导长江鲟发生繁殖, 并取得了良好的繁殖效果, 表明产卵场营造对长江鲟繁殖具有促进作用, 初步证明了产卵场修复工作在长江鲟恢复自然繁殖方面的潜力。同时, 产卵巢限制了长江鲟活动范围, 可能对长江鲟繁殖行为存在一定的影响, 造成观测与实际繁殖过程中存在一些差异, 下一步应在开阔水域开展长江鲟繁殖试验, 在确保长江鲟有足够的活动空间的情况下, 进一步观测长江鲟的繁殖阶段的行为。

4 结论

此次试验证实了人工保种的长江鲟依然具备鲟鱼基本繁殖行为特征, 长江鲟临近繁殖, 会伴随着频繁跃出水面的现象, 约1.6次/h。在繁殖期间, 长江鲟雄鱼排精时, 快速摆尾频率约为 233 ± 13.74 次/min, 雌鱼排卵时, 摆尾方式有原地摆尾和侧向游动摆尾两种方式, 原地摆尾频率约为 140 ± 13.53 次/min, 侧向游动摆尾频率约为 105 ± 22.25 次/min。长江鲟繁殖期间, 具有选择不同流速区域的行为, 繁殖前和繁殖发生后, 均偏好停留在低流速区, 繁殖发生时, 迁移至流速较高区域, 据流场统计结果, 对人工保种的长江鲟繁殖比较关键的流速区间为 $0.32 \sim 0.60$ m/s。此次试验, 亲鱼繁殖参与率75%, 受精率为54%, 试验的成功开展, 也表明在合适的水温条件下, 通过底质、流速、水下地形的调节, 长江鲟可以自发完成整个繁殖过程。

参考文献

- 1 Jacoby D M P, Freeman R. Emerging network-based tools in movement ecology. *Trends Ecol Evol*, 2016, 31: 301–314
- 2 Killen S S, Atkinson D, Glazier D S. The intraspecific scaling of metabolic rate with body mass in fishes depends on lifestyle and temperature. *Ecol Lett*, 2010, 13: 184–193
- 3 Lennox R J, Chapman J M, Souliere C M, et al. Conservation physiology of animal migration. *Conserv Physiol*, 2016, 4: cov072
- 4 Twardek W M, Gagne T O, Elmer L K, et al. Consequences of catch-and-release angling on the physiology, behaviour and survival of wild steelhead *Oncorhynchus mykiss* in the Bulkley River, British Columbia. *Fisheries Res*, 2018, 206: 235–246
- 5 Haxton T J, Cano T M. A global perspective of fragmentation on a declining taxon—the sturgeon (Acipenseriformes). *Endang Species Res*, 2016, 31: 203–210
- 6 Pikitch E K, Doukakis P, Lauck L, et al. Status, trends and management of sturgeon and paddlefish fisheries. *Fish Fisheries*, 2005, 6: 233–265
- 7 Hu J, Zhang Z, Wei Q, et al. Malformations of the endangered Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, and its causal agent. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 9339–9344
- 8 Heise R J, Slack W T, Ross S T, et al. Spawning and associated movement patterns of gulf sturgeon in the Pascagoula River Drainage, Mississippi. *Trans Am Fisheries Soc*, 2004, 133: 221–230
- 9 Kieffer M C, Kynard B. Spawning of the shortnose sturgeon in the Merrimack River, Massachusetts. *Trans Am Fisheries Soc*, 1996, 125: 179–186
- 10 Kynard B. Life history, latitudinal patterns, and status of the shortnose sturgeon, *Acipenser brevirostrum*. *Environ Biol Fishes*, 1997, 48: 319–334
- 11 Bruch R M, Binkowski F P. Spawning behavior of lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*). *J Appl Ichthyol*, 2002, 18: 570–579
- 12 Auer N A. Importance of habitat and migration to sturgeons with emphasis on lake sturgeon. *Can J Fish Aquat Sci*, 1996, 53: 152–160
- 13 Fox D A, Hightower J E, Parauka F M. Gulf sturgeon spawning migration and habitat in the Choctawhatchee River System, Alabama–Florida. *Trans Am Fisheries Soc*, 2000, 129: 811–826
- 14 Sulak K J, Clugston J P. Recent advances in life history of Gulf of Mexico sturgeon, *Acipenser oxyrinchus desotoi*, in the Suwannee river, Florida, USA: a synopsis. *J Appl Ichthyol*, 1999, 15: 116–128
- 15 Wang C Y, Wei Q W, Kynard B, et al. Migrations and movements of adult Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* in the Yangtze River, China. *J Fish Biol*, 2012, 81: 696–713
- 16 Xu L X, Zhou L, Wei Q W. Stock status and conservation dilemma of species of Acipenseriformes in the Yangtze River and relevant suggestions (in Chinese). *J Fish China*, 2023, 47: 60–70 [许兰馨, 周亮, 危起伟. 长江鲟类资源现状及保护. *水产学报*, 2023, 47: 60–70]
- 17 The Changjiang Aquatic Resources Survey Group, Sichuan Province. The Biology of The Sturgeons in Changjiang and Their Artificial Propagation (in Chinese). Chengdu: Sichuan Scientific and Technical Publishing House, 1988. 233–235 [四川省长江水产资源调查组. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究. 成都: 四川科学技术出版社, 1988. 233–235]
- 18 He B, Zhou B, Xie H, et al. Effect of feeding level on growth, digestive and metabolic enzymes and antioxidant capacity in juvenile Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*). *Aquaculture*, 2023, 567, 739265
- 19 Yang Y, Wu J P, Zhong J, et al. Exploring factors affecting the quality of *Acipenser dabryanus* eggs based on hatching rate (in Chinese). *Acta Hydrobiol Sin*, 2024, 48(10): 1697–1705 [杨宇, 吴金平, 仲嘉, 等. 基于孵化率探究长江鲟卵质差异因子. *水生生物学报*, 2024, 48(10): 1697–1705]
- 20 Ban C X, Li C P, Wu C J, et al. The silver lining in rewilding the vanished sturgeon in the Yangtze River. *TIL*, 2024, 2: 100070
- 21 Zhang P M, Du H, Luo J, et al. Bottom substrate preference of captive Dabry's Sturgeon Broodstock in a simulated spawning environment (in Chinese). *J Hydrol*, 2022, 43: 103–109 [张平梅, 杜浩, 罗江, 等. 长江鲟亲体对人工模拟产卵底质的偏好性. *水生态学杂志*, 2022, 43: 103–109]
- 22 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. *River Res Apps*, 2013, 29: 1004–1015
- 23 Holmquist L M, Guy C S, Tews A, et al. Reproductive ecology and movement of pallid sturgeon in the upper Missouri River, Montana. *J Appl Ichthyol*, 2019, 35: 1069–1083
- 24 Du H. Conservation aquaculture of Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*): fitness for survival of fingerlings and juveniles from enriched rearing environments (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 [杜浩. 达氏鲟的保护养

- 殖: 丰容环境中仔幼鱼的生存适应性. 博士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 2014]
- 25 Gillespie M A, McDougall C A, Nelson P A, et al. Observations regarding Lake Sturgeon spawning below a hydroelectric generating station on a large river based on egg deposition studies. *River Res Apps*, 2020, 36: 2024–2042
- 26 Hrenchuk, C L. Influences of water velocity and hydropower operations on spawning site choice and recruitment success of Lake sturgeon, *Acipenser fulvescens*, in the Winnipeg River. Ottawa: library and Archives Canada, 2013. 3–8
- 27 Paragamian V L, Wakkinen V D. White sturgeon spawning and discharge augmentation. *Fisheries Manage Eco*, 2011, 18: 314–321
- 28 Billard R, Lecointre G. Biology and conservation of sturgeon and paddlefish. *Rev Fish Biol Fisheries*, 2000, 10: 355–392
- 29 Benson R L, Turo S, Barry W, McCovey J. Migration and movement patterns of green sturgeon (*Acipenser medirostris*) in the Klamath and Trinity rivers, California, USA. *Environ Biol Fish*, 2007, 79: 269–279
- 30 Lv W Q, Yuan M Z. The literature review of temperature change effect on fish behavior (in Chinese). *J Shanghai Ocean Univ*, 2017, 26: 828–835 [吕为群, 袁明哲. 温度变化对鱼类行为影响的研究进展. 上海海洋大学学报, 2017, 26: 828–835]
- 31 Huang Y Q. Response model and application of fish individual motion behaviours with water quality changes based on Acoustic TAG Systems (ATS) (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanning: Guangxi University, 2019 [黄月群. 基于声学标签系统(ATS)鱼类个体运动行为对水质变化的响应模式与应用. 博士学位论文. 南宁: 广西大学, 2019]

The characteristics and effect of natural reproductive behavior of Yangtze River sturgeon under the creation of spawning habitat in natural waterbody

LI PengCheng¹, WU JinMing¹, LI JunYi¹, ZHONG Jia¹, DIAO YaQin², ZHOU Bo³, ZHOU Liang⁴, LU ShengChao⁵, WANG YuQi⁶ & DU Hao^{1,5,6*}

¹Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

²School of Electrical and Electronic Information Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China

³Fishery Institute of Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 611731, China

⁴Yibin Research Institute of Rare Aquatic Animals, Yibin 644000, China

⁵College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China

⁶College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

* Corresponding author, E-mail: duhao@yfi.ac.cn

Restoring the natural reproduction of Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*) is a key and challenging issue in rebuilding its wild population. In March 2023, through the creation of habitat conditions such as water flow and substrates, the Yangtze sturgeon was successfully induced to reproduce in the wild for the first time. Our results revealed that sturgeons exhibited typical reproductive responses to the constructed habitat. As the breeding phase approached, their activities increased, with an average of 1.6 leaps per hour. Before spawning, the sturgeon's activity was most frequent in the areas of the spawning nest with lower water flow (0.04–0.36 m/s). After spawning began, their activity frequency significantly increased in areas with moderate water flow (0.32–0.60 m/s) within the nest, and their presence in high-flow areas (0.1–1.34 m/s) also became more noticeable. During sperm release, males exhibited rapid tail beats, with a frequency of 232.71 ± 13.74 beats per minute. Females exhibited two types of oviposition movements: one resembling the males' rapid tail beats but with a lower frequency of 140.38 ± 13.53 beats per minute, and the other involving large and lateral tail movements at a frequency of 105.20 ± 22.25 beats per minute. The participation rate of broodstock in this spawning event reached 75%, with a fertilization rate of 54%. This is the first successful experiment to induce natural spawning behavior in Yangtze sturgeon through environmental regulation in a natural water body, laying the foundation for the restoration and reconstruction of the wild population.

Yangtze sturgeon, habitat creation, spawning ground, breeding behavior

doi: [10.1360/SSV-2024-0121](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0121)