

人工繁育中华鲟成体在长江口放流后可以进行溯河洄游*

郑跃平, 杨海乐**, 徐嘉楠, 范厚勇, 倪春华, 彭树才

(上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092)

摘要: 作为长江旗舰物种, 中华鲟自葛洲坝截流以来种群锐减, 目前其自然繁殖已中断多年, 洄游繁殖群体规模不足 20 尾, 野外种群存续岌岌可危。开展中华鲟人工繁育放流是目前维持中华鲟野外种群的关键措施, 也可修复中华鲟关键生境功能、推动中华鲟野外可持续种群重建创造时间窗口。在当前的放流实践中, 放流对象包括稚幼鱼、亚成体和成体, 放流地点包括了从葛洲坝下的长江中游一直到长江口的众多点位, 而根据洄游物种洄游导航的相关理论假设, 放流应该规范为在产卵场放流仔稚鱼, 该实践与理论的冲突是当前中华鲟放流中的重要争议点之一。针对该问题——未在仔稚鱼时期经历从产卵场到海洋的降河洄游过程的中华鲟, 在其性成熟后是否能够进行溯河洄游找到产卵场? 本研究分析了在长江口开展的中华鲟放流实验, 及其中用卫星标记 (PAT) 监测的人工繁育中华鲟成体及亚成体放流后的迁移状况。结果显示, 2004—2021 年在长江口共放流中华鲟 13204 尾, 其中人工繁育中华鲟成体、亚成体 (3 龄以上) 665 尾, 有 PAT 标志的 71 尾, 监测回收 PAT 标志信息 42 份, 分析发现获得有效监测信息的 21 尾 10 龄及以上放流中华鲟中, 有 3 尾出现了沿长江溯河洄游的行为。该结果或可说明仔稚鱼时期经历从产卵场到海洋的降河洄游过程并非中华鲟性成熟后进行溯河洄游的必要条件。为了进一步确认该结论、弄清放流后的溯河洄游过程, 还需要开展更精细的实验研究。

关键词: 中华鲟; 种群重建; 长江口; 人工放流; 溯河洄游

Artificially bred adult Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) can migrate upstream along the Yangtze River after being released into the Yangtze River Estuary

Zheng Yueping, Yang Haile **, Xu Jianan, Fan Houyong, Ni Chunhua, Peng Shucai

(Shanghai Aquatic Wildlife Conservation and Research Center, Shanghai 200092, P.R.China)

Abstract: The Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*), a flagship species of the Yangtze River, has suffered a dramatic population decline after the construction of the Gezhouba Dam. Currently, its natural reproduction has been disrupted for several years, with the migratory breeding group less than 20 individuals, placing the survival of the natural population in jeopardy. The release of artificially bred individuals has become a crucial measure to sustain the Chinese sturgeon population and facilitate its sustainable population recovery in the wild. However, the current approach to selecting release candidates and locations remains somewhat arbitrary. A fundamental question remains unresolved: Can Chinese sturgeons that have not undergone the downstream migration process from spawning grounds to the ocean during their larval and juvenile stages successfully initiate reproductive migration and navigate back to the spawning grounds on reaching sexual maturity? To investigate this, the current study analyzed release experiments involving Chinese sturgeons in the Yangtze River Estuary. In these experiments, we employed satellite tagging (Pop-up Archival Tags, PAT) to track the artificially bred adult and sub-adult Chinese sturgeons' migration patterns. The findings indicate that, from 2004 to 2021, a total of 13204 Chinese sturgeons (including natural individuals and artificially bred individuals) were released into the Yangtze River Estuary, in which there were 665 artificially bred adult and sub-adult Chinese sturgeons (aged over three years). Of these, 71 were equipped with PAT tags, and data from 42 of these tags were successfully retrieved. Crucially, among the 21 individuals older than 10 years with valid PAT monitoring data, three exhibited upstream

** 2024-10-15 收稿; 2025-01-07 收修改稿。

通信作者; E-mail: haileyang10@fudan.edu.cn。

migration behavior along the Yangtze River. These findings suggest that the downstream migration experience during early life stages may not be a prerequisite for upstream migration in sexually mature Chinese sturgeons. To further validate this conclusion and gain a deeper understanding of the breeding migration process following release, more rigorous and detailed experimental research is urgently needed.

Keywords: *Acipenser sinensis*; population reconstruction; Yangtze River Estuary; artificial release; anadromous migration

中华鲟是长江土著的三种鲟形目鱼类之一^[1, 2], 是大型江海洄游性鱼类^[3, 4], 是长江水坝救鱼的主要对象^[5, 6], 是国家一级保护野生动物^[7], 是长江水生生物旗舰种、伞护种^[3], 也是长江水生态系统健康的标志性指示物种之一^[8]。中华鲟曾是长江中上游的重要经济鱼类^[7], 而后在人类活动的影响下种群螺旋衰退^[9-11], 2013 年首次出现自然繁殖中断^[12], 虽然 2014 年有新的适应迹象^[13], 但其自然繁殖还是连续中断多年, 洄游繁殖群体降至不足 20 尾^[14], 野外种群岌岌可危^[4, 15]。

增殖放流是目前唯一能够直接对中华鲟自然种群进行维持和补充的手段^[3, 14]。用增殖放流保证中华鲟在野外存在一定规模的种群, 可以给中华鲟洄游繁殖群体适应葛洲坝截流、生殖洄游距离缩短的机会, 为中华鲟产卵场修复、水温调控等工程和技术难题的解决提供时间窗口^[16], 尽管有学者质疑放流的成效^[5], 提出了放流可能造成的问题^[17], 以及当前执行放流所面临的问题^[18]。2024 年国务院办公厅发布《国务院办公厅关于坚定不移推进长江十年禁渔工作的意见》, 要求“持续扩大中华鲟等珍稀濒危物种人工保种和增殖放流规模”, “努力重建野外自然种群”。在其政策例行吹风会上, 农业农村部副部长表示从 2024 年起农业农村部计划每年安排 5000 万元专项资金放流中华鲟 4~6 月龄规格苗 100 万尾, 争取未来三到五年放流规模逐渐增加到 500 万尾¹。

近年, 在长江中下游从湖北宜昌葛洲坝下到上海长江入海口的各地, 积极开展中华鲟放流活动, 出现了各种规模、各种规格和各种形式的中华鲟放流活动。从 2020 年至今, 中华鲟年放流规模逐渐从约 1.1 万尾、1.3 万尾快速增加到约 30 万尾、45 万尾和 100 万尾。但当前学术界对中华鲟放流的地点和规格还存在一定的争议和质疑^[3, 14, 17]。参考其它鱼类洄游行为的研究结果^[19, 20], 有学者认为中华鲟自然洄游到产卵场的特性和能力也应该依赖于中华鲟在仔稚鱼时期在产卵场的生活史经历^[3], 因而建议主要在长江中游放流 60—180 日龄的稚鱼或幼鱼^[14, 21], 对在长江河口或者下游江段放流的中华鲟是否具有自然洄游到产卵场的特性和能力持怀疑态度^[17], 对人工繁育放流的中华鲟成体亚成体是否完全具备主动洄游到海洋中正常索饵肥育的能力, 以及是否具备再洄游到产卵场的能力持怀疑态度^[17]。

已有的人工繁育中华鲟成体亚成体放流监测研究结果显示, 中华鲟成体亚成体放流后在河口进行生理调节的时间非常短 (1 个月内, 甚至 10 天左右即进入海洋)^[22, 23], 进入海洋后在其海洋历史分布区内寻找合适的栖息生境^[22-24], 并可以正常摄食和生长^[24, 25]。目前, 尚未有研究尝试回答或检验“未在仔稚鱼时期经历从产卵场到海洋的降河洄游过程的中华鲟是否能够进行溯河洄游找到产卵场”的问题。针对该问题, 可以按照主流的观点, 假设未在仔稚鱼时期经历从产卵场到海洋的降河洄游过程的中华鲟无法进行溯河洄游找到产卵场。该假设可以推导出 2 个推论: 1) 放流的成体亚成体中华鲟无法进行溯河洄游找到产卵场, 2) 在长江口放流的中华鲟无法进行溯河洄游找到产卵场。为了检验这 2 个推论, 本文分析了 2004 年以来长江口开展的中华鲟放流情况, 着重分析了在长江口放流的人工繁育中华鲟成体亚成体数据及其放流监测数据, 发现有 3 尾人工繁育中华鲟成体在长江口放流后进行了溯河洄游。

1 材料与方法

1.1 长江口中华鲟放流信息

2004—2021 年, 上海市水生野生动植物保护研究中心及原上海市长江口中华鲟自然保护区管理处在长江口水域累计放流中华鲟 13227 尾 (表 1)。放流的中华鲟包括长江口被误捕经抢救成活并暂养恢复健康的个体, 和在上海崇明中华鲟保护基地内蓄养的来自湖北等地中华鲟保护科研机构人工繁育的子一代、子二代个体。放流的中华鲟年龄结构, 野生个体主要是近 1 龄的去年新生幼鱼, 和高龄的洄游繁殖亲鱼; 子一代、子二代个体则涵盖了从近 1 龄到 14 龄的幼鱼亚成体成体各种规格。

¹ 国务院政策例行吹风会 (2024 年 4 月 2 日) <https://www.gov.cn/xinwen/2024zccfh/11/>

表 1 长江口中华鲟放流统计

Tab.1 Summary for Chinese sturgeon released in Yangtze estuary
by Shanghai Aquatic Wildlife Conservation and Research Center from 2004 to 2021

时间 (年)	年龄-野生	数量-野生	年龄-子一/二代	数量-子一/二代
2004	1	119	/	/
2005	1	150	1,5	1362
2006	1	600	1,2,6	2751
2007	23	1	1,3,8	2156
2008	/	/	1,9	2550
2009	/	/	1,2,6	2654
2010	/	/	2,3,11	53
2011	/	/	5,12	42
2012	/	/	6	33
2013	23	2	6,14	127
2014	23	1	6,11	70
2015	/	/	/	/
2016	/	/	9,10,11	85
2017	/	/	10,11	30
2018	/	/	10,11	72
2019	/	/	2,3,11,12	304
2020	/	/	3,6	35
2021	/	/	3,12	30

1.2 长江口中华鲟放流标志

放流前,对放流中华鲟进行射频综合标志(passive integrated transponder tags, PIT),部分进行外挂银质标志牌(silver brand tag, SBT)、骨板标志(plastic bone armor tag, PBT)、飘带(plastic streamer tag, PST)和锚标(plastic tipped dart tag, PDT)、脱落式卫星数据回收标志(POP-UP satellite archival tag, PAT)^[23]。PIT 标志作为中华鲟蓄养管理的身份编码,其他标志为放流标志以便开展放流后的监测。其中 PAT 标志于放流现场悬挂并激活,对中华鲟放流后所经过水域环境数据(包括水温、水深等)以及标志释放点的坐标进行记录和上传,进而实现放流后监测^[22-24,26]。而 SBT、PBT、PST、PDT 标志则是通过误捕后,渔民对相关信息进行报告来实现放流后监测^[23,24]。

2004—2021 年,放流中华鲟使用的 PAT 标记的型号包括 MK10-PAT、MiniPAT、sPAT、MrPAT,均由美国 Wildlife Computers 生产。PAT 的安装方法,前期有用预埋式标志法,即在中华鲟背部肌肉里埋置预埋体,然后将 PAT 连接在预埋体上;后期均用骨板固定法,即在中华鲟 2 个相邻的背骨板上打孔,用锚绳穿过孔打成封闭环,然后将 PAT 连接在 2 个封闭环上。PAT 的脱落方法, MK10-PAT、MiniPAT 预设脱落时间,到达预设时间就脱离鱼体后上浮至水面; sPAT、MrPAT 可以预设脱落时间,到达预设时间就脱离鱼体后上浮至水面,也可以设置有条件释放,条件被激活后就脱离鱼体后上浮至水面。数据传输方法, PAT 标志在脱离鱼体并上浮至水面后,就将存档的数据汇总上传到 Argos 卫星上。早期数据是由标志生产厂商通过 E-mail 发送的,后期数据是存在 Wildlife Computers 网站的个人账户内的,可自行查看和下载。水温数据精度为 0.1℃,水深数据精度为 0.5m。

1.3 数据整理与分析

为了检验推论 1)放流的成体亚成体中华鲟无法进行溯河洄游找到产卵场、推论 2)在长江口放流的中华鲟无法进行溯河洄游找到产卵场,对长江口放流的人工繁育中华鲟成体亚成体(3 龄以上个体)放流数据和监测结果进行统计分析。考虑到人工繁育子一代中华鲟在蓄养条件下雄鱼最小性成熟年龄为 10 龄,平均

为（14.96±1.93）龄，雌鱼最小成熟年龄为 12 龄，平均为（17.84±1.80）龄^[27]，对长江口放流的人工繁育中华鲟成体亚成体放流数据和监测结果的统计分析，主要关注 10 龄及以上的放流个体。数据的统计分析，包括对中华鲟放流情况进行分类统计计数，对各放流个体被监测记录到的出现水域、迁移经过水域的各日内最高最低水温、各日内最大最小游泳水深、放流前后放流个体的体长体重情况进行对比分析。

2 结果

2.1 人工繁育中华鲟成体亚成体长江口放流后的迁移状况

2004—2021 年，上海市水生野生动植物保护研究中心及原上海市长江口中华鲟自然保护区管理处在长江口水域放流的 13227 尾中华鲟中，人工繁育中华鲟成体亚成体（3 龄以上）671 尾，其中做了 PAT 标志的有 71 尾，监测回收 PAT 标志信息 42 份，在获得有效监测信息（放流至 PAT 弹出的时间大于 10 天）的 21 尾 10 龄及以上放流中华鲟中，有 3 尾的 PAT 弹出地点在长江中下游（安徽芜湖陈桥洲、安徽安庆铁板洲、湖北武汉天兴洲）水域（表 2），即这 3 尾个体放流后出现了逆流沿长江溯河迁移的行为。其他 PAT 标志放流的中华鲟成体亚成体个体，其 PAT 弹出地点均在长江口水域或大陆架海域（表 2）。

表 2 在长江口放流并获得 PAT 监测结果的 10 龄及以上的人工繁育中华鲟子一代、子二代个体
Tab.2 The F1 & F2 artificially bred Chinese sturgeon (older than 10 ages) individuals released in the Yangtze River estuary with PAT monitoring data

PAT ID	年龄/龄	体长/cm	体重/kg	放流时间	放流地点	PAT 弹出时间	弹出地点
49904	11	150	39.36	2010/7/24	奚家港码头	2010/11/4	长江口外正东东海海域
49905	11	140	41.94	2010/7/24	奚家港码头	2010/8/19	长江口外正东近岸水域
108576	12	139	51.00	2011/6/16	奚家港码头	2011/7/16	威海市文登区近岸海域
108580	12	143	53.00	2011/6/16	奚家港码头	2011/7/3	长江口外正东东海海域
108578	12	160	65.00	2011/6/16	奚家港码头	2011/7/10	嵊泗县黄龙乡-枸杞乡海域
49960	14	179	61.10	2013/12/8	奚家港码头	2014/1/14	舟山市东极镇东南海域
17P1119	10	157	47.70	2018/6/6	横沙渔港	2018/6/20	长江口嵊泗县白节山海域
17P1146	10	151	46.31	2018/6/6	横沙渔港	2018/8/1	长江口南汇东海域
19P0025	11	182	37.10	2019/6/6	横沙渔港	2019/7/19	长江口东外海域
19P1893	11	152	55.50	2019/12/7	奚家港码头	2020/3/6	盐城市东部海域
19P1890	12	170	62.56	2019/12/7	奚家港码头	2020/1/6	上海崇明岛东北部海域
19P1891	11	160	57.55	2019/12/7	奚家港码头	2020/2/22	韩国的东南部海域
19U1897	12	145	36.20	2020/6/6	奚家港码头	2020/7/6	长江口嵊泗岛正北海域
19U1899	12	140	35.65	2020/6/6	奚家港码头	2020/8/6	杭州湾岱山岛西北
20U1050	12	164	51.00	2021/6/5	奚家港码头	2021/7/5	湖北武汉天兴洲
20P1910	12	179	72.95	2021/6/6	奚家港码头	2021/7/7	长江口外
20P2022	12	164	50.65	2021/6/6	奚家港码头	2021/7/10	长江口横沙东滩
20P2023	12	170	51.50	2021/6/6	奚家港码头	2021/7/21	安徽安庆铁板洲
20P2024	12	169	42.65	2021/6/6	奚家港码头	2021/7/22	长江口横沙东滩近北支
20P2025	12	154	39.40	2021/6/6	奚家港码头	2021/7/17	长江口横沙近北支
20P2153	12	158	45.95	2021/6/6	奚家港码头	2021/7/21	安徽芜湖陈桥洲

2.2 人工繁育中华鲟成体亚成体长江口放流后的游泳水深情况

获得有效监测信息的 21 尾 10 龄及以上子一代子二代放流中华鲟中，有 9 尾有水深记录数据，数据来自 2021/6/6 放流个体 6 尾、2019/6/6 放流个体 1 尾、2018/6/6 放流个体 2 尾，数据包括日内最大最小水深和 PAT 标志释放前 5 天记录的以 10 min 间隔记录的水深序列数据（图 1）。这 9 尾 10 龄及以上子一代子二代中华鲟放流后各日最浅水深均在 0~2m（±0.5~1.75m），即每天都会游泳上浮至水面上。2021/6/6 放流的 6 尾个体中在长江口及往海域方向迁移的个体各日内最深水深总体维持在 7~36m（±0.5~1.75m），而溯江而

上迁移的个体各日内最深水深则在 17~69m ($\pm 0.5\sim 1.75\text{m}$), 均存在日际波动。2019/6/6 放流的 1 尾个体往海域方向迁移, 其各日内最深水深先波动增大, 然后在 2019/7/5 出现反转快速减小, 又在 2019/7/14 再次反转快速增大。2018/6/6 放流的 2 尾个体各日内最深水深总体维持在 20m ($\pm 0.5\sim 1.75\text{m}$) 以下, 其中 1 尾早先几天的最深水深为 1m ($\pm 0.5\sim 1.75\text{m}$), 另外 1 尾的最深水深总体维持在 5~20m ($\pm 0.5\sim 1.75\text{m}$)。

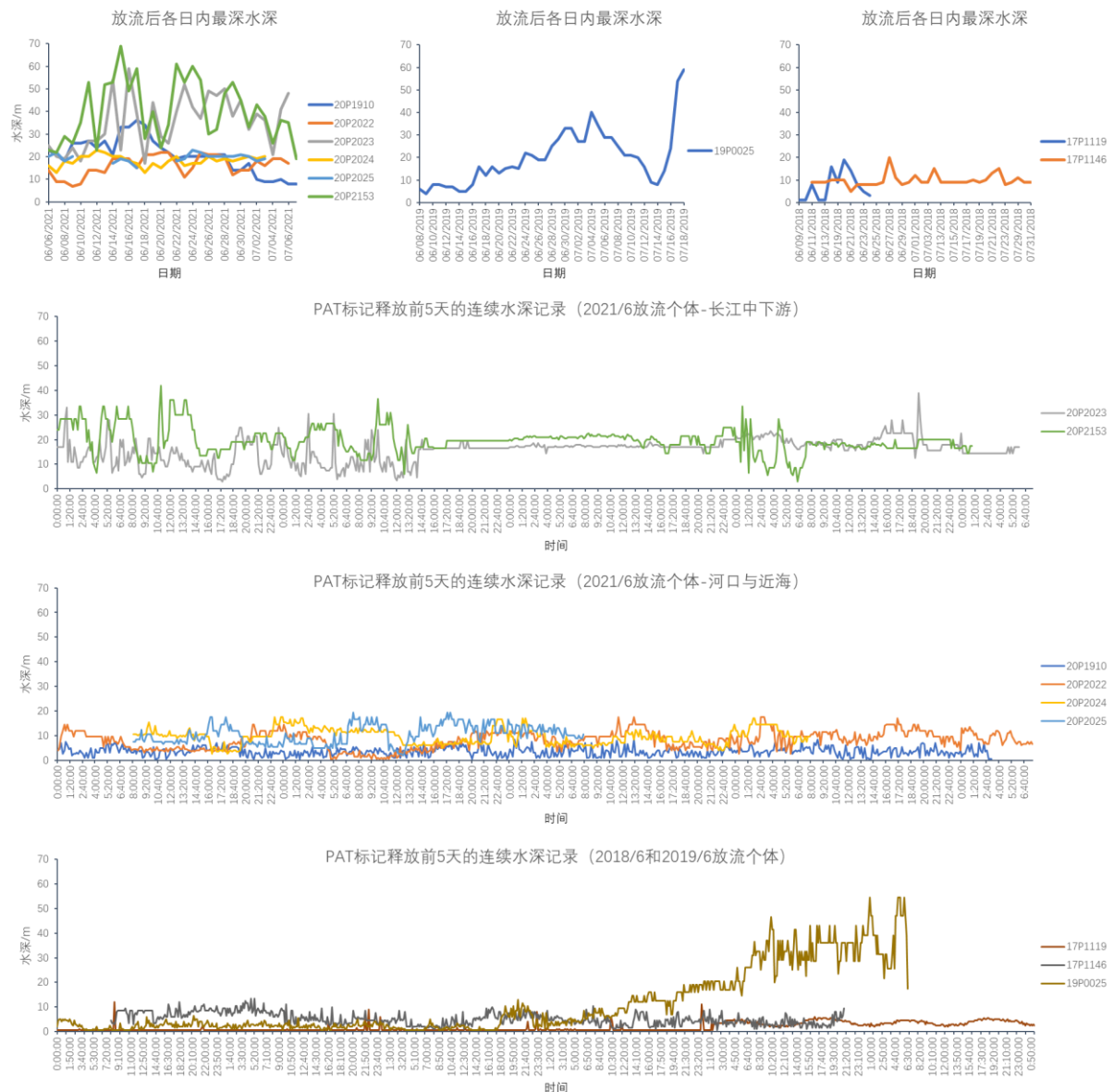


图 1 PAT 监测记录的人工繁育成体中华鲟放流后游泳水深状况

Fig.1 The swimming depth of the released artificially bred adult Chinese sturgeon monitored & recorded by PAT

从 PAT 标志释放前 5 天记录的以 10min 间隔记录的水深序列数据来看, 放流个体存在序列性上浮下潜的游泳行为 (图 1)。2021/6/6 放流后溯江而上迁移的 2 个个体上浮下潜行为周期为 2~8h, 主要为 2~4.5h, 但在 2021/7/3 的 15:30 后均存在一个长达 1d 多的中等深度稳定期。2021/6/6 放流后在长江口及往海域方向迁移且游泳水深最深超过 10m 的 3 个个体上浮下潜行为周期为 3~24h, 主要为 7~20h, 游泳水深最深不超过 10m 的 1 个个体上浮下潜行为周期为 1.5~20h, 主要为 2~7h。2019/6/6 放流的 1 尾往海域方向迁移的个体上浮下潜行为周期为 4.5~20h, 主要为 4.5~13h, 并且从 2019/7/13 到 2019/7/18 呈现出明显的游泳水深增加的突变性趋势。2018/6/6 放流的 2 尾个体的游泳数据中, 1 尾的上浮下潜行为周期为 6~26h, 主要为 6~9h 和 24~26h; 另 1 尾存在长时间的 0m 水深数据点, 非 0m 水深数据点的数据则多呈尖峰形式, 只有最后 2

天的数据在水深 2~6m 区间呈正弦曲线式的周期性波动。

2.3 人工繁育中华鲟成体亚成体长江口放流后的迁移经历的水温情况

获得有效监测信息的 21 尾 10 龄及以上子一代子二代放流中华鲟中，有 14 尾有温度记录数据，包括 2021/6/6 放流个体 7 尾、2020/6/6 放流个体 2 尾、2019/6/6 放流个体 1 尾、2018/6/6 放流个体 2 尾、2019/12/7 放流个体 2 尾（图 2）。2021/6/6 放流的 7 尾个体记录到的最高（24~28℃）和最低（20~28℃）水温在放流后均呈持续上升的趋势，其中在长江口及往海域方向迁移的个体记录到的最高水温呈稳定上升态势，最低水温存在明显日际波动，日内最高最低水温差存在较高的值（>2℃），而溯江而上迁移的个体记录到的最高水温除了 1 个个体出现过 1 个异常高值（29.8℃）外也呈稳定上升态势，最低水温也没有明显日际波动，日内最高最低水温差除了 1 个个体存在 1 个高值外均稳定较小（<2℃）。2020/6/6 放流的 2 尾个体记录到的最高（20~33℃）和最低（19~27℃）水温在放流后呈相对稳定态势，其中有 1 尾记录到了 2020/7/20 前后水温的突然上升，最高水温上升幅度比最低水温的大，日内最高最低水温差也随之突然上升然后逐渐回落。2019/6/6 放流的 1 尾个体记录到的最高（22~28℃）和最低（13~24℃）水温在放流后呈波动稳定，最低水温在 2019/6/29~2019/7/7 存在显著偏低情况，日内最高最低水温差总体较高（>2℃），并且存在相应高值区（>6℃）。2018/6/6 放流的 2 尾个体记录到的最高（22~30℃）和最低（20~26℃）水温在放流后呈缓慢上升态势，其中 1 尾个体记录到了稳定较高的日内最高最低水温差（>2℃）。2019/12/7 放流的 2 尾个体记录到的最高（8~17℃）和最低（8~16℃）水温在放流后呈波动下降趋势，日内最高最低水温差总体较小（<2℃）。

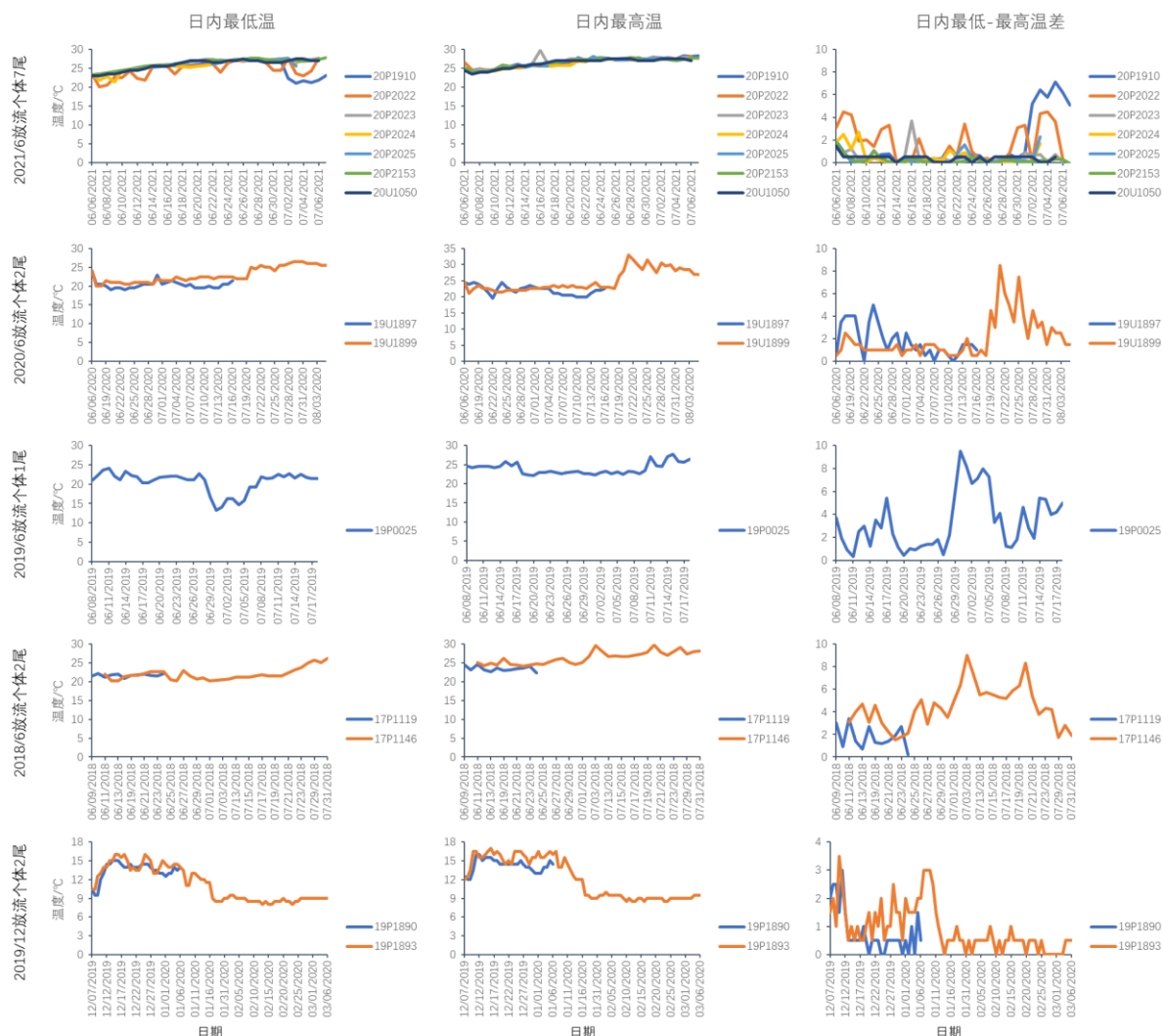


图 2 人工繁育成体中华鲟放流后监测所得水温数据

Fig.2 Water temperature data monitored by the PAT tagged on the released artificially bred adult Chinese sturgeon

2.4 人工繁育中华鲟成体亚成体长江口放流后的生长状况

2004—2021 年，上海市水生野生动植物保护研究中心及原上海市长江口中华鲟自然保护区管理处在长江口水域放流的人工繁育中华鲟成体亚成体，有误捕记录的共 13 尾，其中放流-误捕时间间隔大于 10 天的有 9 尾，这其中有误捕后体长体重数据的有 7 尾（表 3）。与放流前体长体重数据比较，放流后体长有增长的个体共 5 尾，有减小的个体共 2 尾，放流后体重有增长的个体共 3 尾，有减小的个体共 4 尾。

表 3 长江口水域放流的人工繁育中华鲟成体亚成体误捕记录

Tab.3 Records of the captured artificially bred adult and subadult Chinese sturgeon released in the Yangtze River estuary

PIT	年 龄	放流时间	误捕 间隔	误捕地点	放流前 体长/cm	放流前 体重/kg	误捕时 体长/cm	误捕时 体重/kg
8110131	9	2008/11/1	64	浙江温州海域	140	27.50	147	35.00
8110129	9	2008/11/1	130	浙江舟山群岛海域	148	33.45	157	37.05
2016175	6	2013/12/8	93	日本长崎五岛列岛海域	140	35.48	150	26.70
1834536	6	2013/12/8	115	浙江宁波奉化象山港海域	129	27.84	118	18.34
0191263	6	2013/12/8	124	浙江舟山嵊山镇海域	139	32.54	129	21.14
0199519	6	2013/12/8	198	青草沙水库北侧水域	142	35.12	145	31.92
1827569	10	2016/11/18	141	佘山附近海域	145	32.53	153	41.82

3 讨论

3.1 人工繁育中华鲟成体长江口放流后进行溯河洄游的可能性

人工繁育中华鲟成体在长江口放流后可以进行溯河洄游（anadromous migration）。溯河洄游是指一些水生动物在海洋中生长、性成熟时到淡水水域产卵繁殖的洄游。本研究中，人工繁育中华鲟成体（10 龄及以上）长江口放流后，监测获得有效迁移信息的 21 尾中有 3 尾出现了逆流沿长江溯河迁移的行为，其 PAT 弹出地点在长江中下游（安徽芜湖陈桥洲、安徽安庆铁板洲、湖北武汉天兴洲）水域（表 2）。考虑到中华鲟为溯河洄游性鱼类，其长江种群在长江里出生，然后降河到近海大陆架海区生长，性成熟后溯河洄游到长江里进行产卵繁殖，其它时间不进行溯河^[3]，所以可以认为这 3 尾人工繁育中华鲟成体在长江口放流后逆流沿长江溯河洄游迁移的行为属于溯河洄游。虽然 PAT 弹出的地方不是产卵场水域（当然也并非相关个体溯河迁移的终点），也没有具体的监测证据说明其最终是否到了当前已知的葛洲坝下产卵场水域，但倾向于认为其最终洄游到了产卵场江段或者它自以为的产卵场江段，因为没有比这个更合理的解释了。也就说该发现或可证伪推论 1）放流的成体亚成体中华鲟无法进行溯河洄游找到产卵场，和推论 2）在长江口放流的中华鲟无法进行溯河洄游找到产卵场。更进一步来讲，该初步结果或可预示仔稚鱼时期经历从产卵场到海洋的降河洄游过程并非中华鲟性成熟后进行溯河洄游的必要条件。

人工繁育中华鲟性成熟个体在长江口放流后或许大多都会进行溯河洄游。从中华鲟的生活史习性来讲^[3]，逆流沿长江溯河洄游的 3 尾大概率是性腺发育到一定阶段，比如Ⅲ期的个体。按照长江所统计的人工繁育子一代中华鲟在蓄养条件下雄鱼最小性成熟年龄为 10 龄，成熟比例 3%，11 龄成熟比例 8%，12 龄成熟比例 13%，雌鱼最小成熟年龄为 12 龄，成熟比例 3%^[27]，因而不分性别的个体成熟（可进行溯河洄游）整体比例或概率，10 龄的 1.5%，11 龄的 4%，12 龄的 8%。本研究中，放流的 21 尾 10 龄及以上中华鲟中，10 龄的 2 尾中 0 尾进行溯河洄游，符合预期（<<1 尾），11 龄的 5 尾中 0 尾进行溯河洄游，符合预期（<<1 尾），12 龄的 13 尾中 3 尾进行溯河洄游，超出预期（≈1 尾）。这一方面说明长江口放流个体的选择比较成功地遴选出了性腺发育比较好的个体，或者长江口培育的人工繁育中华鲟成体性成熟比例可能较长江所的略高，另一方面也说明人工繁育中华鲟性成熟个体在长江口放流后可能大多都会进行溯河洄游。人工繁育中华鲟成体亚成体长江口放流后，未性成熟个体在长江口水域休憩调整后向海区迁移，性成熟个体则溯江而上向产卵场江段溯河洄游，这符合预期。

3.2 人工繁育中华鲟成体长江口放流后游泳迁移的特征

人工繁育中华鲟成体长江口放流后,溯河洄游的个体主要沿长江深泓线迁移,在长江口和向海区迁移的个体则在近海大陆架上漫游。中华鲟作为底层鱼类,其游泳最深水深主要受所在水域水深限制。本研究中,在长江口和向海区迁移的个体游泳最大水深普遍较浅(图1),其主要沿近海大陆架行动,这与前人研究结果一致^[24],也符合关于中华鲟成体亚成体在海洋生活史阶段栖息特征的经验;溯江而上迁移的个体游泳最大水深普遍较深(图1),可以判断其主要沿深泓线行动,这符合关于中华鲟亲本溯河产卵洄游时游泳习性的预期。

长江口放流的人工繁育中华鲟成体存在周期性上浮下潜的游泳行为(图1)。先前有针对水库网箱中中华鲟游泳行为的研究指出,中华鲟存在序列性的上浮下潜游泳行为特征,平均每小时要游到水面上 0.35 ± 0.24 次^[28]。本研究中,在长江口和向海区迁移的个体,其上浮下潜行为周期为3~26h,主要为4.5~20h,较前人的研究结果要长;溯江而上迁移的个体,其上浮下潜行为周期为2~8h,主要为2~4.5h,和前人的研究结果类似^[28]。需要说明的是,上浮下潜游泳行为是指中华鲟在游泳过程中突然向上游动并靠近水面或跃出水面然后快速调转姿态向下潜入深水区的特定游泳行为^[28],并非所有游泳过程中的深度变化都是上浮下潜游泳行为。另外,溯江而上迁移的个体在游泳过程中存在一个长达1d多的中等深度稳定期(图1),可能指示了中华鲟在溯江过程中在某个缓流区的休憩行为,这也符合关于中华鲟亲本溯河产卵洄游时游泳习性的预期。

长江口放流的人工繁育中华鲟成体迁移所经历水域的水温特征符合长江口-近海、长江干流的水温特征。本研究中,人工繁育中华鲟成体长江口放流后,在长江口和向海区迁移的个体记录了较为明显的日内最低最高水温差异(图2),这与长江口及近海水体垂向交换较弱、水温存在分层现象相关,溯江而上迁移的个体没有较为明显的日内最低最高水温差异(图2),这与长江干流因为径流扰动垂向交换明显、水温不分层相关,符合预期。本研究中,6月份放流的个体记录到的最高水温总体呈上升趋势,12月份放流的个体记录到的最高水温总体呈下降趋势(图2),符合预期。其中1尾2019年6月放流的个体在放流后向海区迁移的过程中记录到了最低温的异常降低(但相应的最高温没有明显变化,导致最低最高水温差也显著增大)(图2),与之相应的是游泳最深水深的不断增大(图1),说明该个体在迁移过程中可能误入了东海大陆架的近岸寒流(闽浙沿岸流),随后快速避开。

3.3 人工繁育中华鲟成体长江口放流后的生存状态

人工繁育中华鲟成体放流后有少数出现了状态较差的问题。本研究中,2018/6/6放流的中华鲟成体中有1个个体放流后前几天最深水深维持在1m($\pm 0.5\sim 1.75$ m)左右,后续游泳水深呈正弦曲线波动(图1),均不是正常个体游泳行为所具有的深度变化特征,大概可以判断其是放流后生理状况较差、不适应野外水体理化条件的个体^[21]。基于当前已知的监测数据,从游泳行为来看,长江口放流的人工繁育中华鲟成体亚成体在放流后只有少数(11%)个体状况不佳,比先前针对长江中游放流中华鲟成体亚成体的研究结果明显要低^[21]。放流后状态不好个体的出现,暗示在放流前需要进一步加强对放流个体的选择和野化训练。

人工繁育中华鲟成体亚成体长江口放流后,有一定比例的生长状况不佳。本研究中,有误捕后体长体重数据的7尾长江口放流中华鲟成体亚成体,与放流前体长体重数据比较,放流后体长有增长的个体共5尾,有减小的个体共2尾(约30%),放流后体重有增长的个体共3尾,有减小的个体共4尾(约60%),并且体重减小最严重的2尾是体长也有减小的那2尾(表3)。对比体重有增长的3尾和有减小的4尾,存在年龄差异(9龄/10龄 vs 6龄)、放流年份差异(2008年/2016年 vs 2013年)、放流季节差异(前后差20~37天)、误捕季节差异、放流-误捕时间间隔差异(表3),这些差异均可能给中华鲟放流后的生长状况产生影响,但这些可能的影响并没有一个确定的负面或正面的方向。如果不考虑这些差异带来的差异性影响,将当前监测到的生长状况差异均归为放流个体对自然生境的适应能力差异的反映,那么从生长状况来看,人工繁育中华鲟成体亚成体长江口放流后大概有约一多半个体无法在半年内很好适应自然生境。该结果支持先前研究给出的人工增殖放流中华鲟能够适应海洋环境并在海洋中生存和生长的结论^[24],同时也初步给出了适应自然生境的比例40%,考虑到必然存在的幸存者偏差,该比例应该是偏高的,但具体偏高度有待进一步研究。

3.4 关于人工繁育中华鲟长江口放流后溯河洄游的进一步研究设想

人工繁育中华鲟成体在长江口放流后可以进行溯河洄游应该是可以确定的,但后续需要进一步开展相关研究来确认更多的细节。第一,通过人工繁育中华鲟性成熟(性腺发育至Ⅲ期)个体长江口标记放流并进行游泳轨迹监测(超声波标记+固定站监测、流动跟踪监测),来确认这些个体放流后是直接启动溯河洄游?还是在长江口及近海游荡逗留之后启动溯河洄游?两类启动溯河洄游的个体占比分别是多少?溯河洄游是否确实都以产卵场江段为最终目标?溯河洄游到产卵场江段的个体占总放流个体的比例是多少?第二,考虑到有研究显示红鲑(Sockeye Salmon)从孵化到入海一直在形成印痕,味觉暴露时间越长,印痕越强,但入海转换阶段,印痕形成更敏感^[29],结合本研究所确认的人工繁育中华鲟成体长江口放流后进行溯河洄游的现象,可以对传统的中华鲟生殖洄游定位方法的假设进行更新,即中华鲟在入海转换阶段形成决定性的印痕,在性成熟之后根据入海时的印痕寻找到河口,然后根据水流的指引逆流上溯并刺激配子发育,在配子发育成熟时就近找合适的产卵场进行产卵。为检验该假设,可以对长江口标记放流的人工繁育中华鲟成体亚成体进行多年跟踪研究(产卵场江段误捕监测和分子标记监测),来确认放流后入海的中华鲟成体亚成体后续是否会洄游到产卵场江段?并评估洄游到产卵场江段的个体占比是多少?第三,考虑到中华鲟放流后对自然生境的适应能力差异,可以协调多方力量、整合多方数据,评估不同江段放流的人工繁育中华鲟成体亚成体在海洋中分别有怎样的生存状况(生存率的相对比值、生长率的对比)?评估放流前野化对放流个体适应自然生境能力有怎样的影响?确认在长江口进行野化放流是否能让人工繁育中华鲟成体亚成体放流后有更高的对自然生境的适应性能力?估算长江口人工繁育中华鲟成体亚成体野化放流对溯河洄游群体的贡献效率、贡献能力是多少?

4 结论

增殖放流是目前唯一能够直接对中华鲟自然种群进行维持和补充的手段,为了推动更好更有效地开展增殖放流,亟需回答未在仔稚鱼时期经历从产卵场到海洋的降河洄游过程的中华鲟性成熟后是否能够进行溯河洄游找到产卵场的问题。通过分析长江口中华鲟放流及监测数据,本研究发现人工繁育中华鲟成体在长江口放流后可以进行溯河洄游,并且监测到的相关游泳行为和生境环境数据均符合进行溯河洄游的预期,但具体细节还需要后续研究来确认。同时,本研究也发现了长江口放流的人工繁育中华鲟成体在长江干流的游泳行为(上浮下潜周期)和在长江口和近海的有一定差异。本研究也确认了人工繁育中华鲟成体亚成体在长江口放流后短期内能适应自然生境,但比例可能不超过 40%。

5 参考文献

- [1] Xu LX, Zhou L, Wei QW. Stock status and conservation dilemma of species of Acipenseriformes in the Yangtze River and relevant suggestions. *Journal of Fisheries of China*, 2023,47(2):62-72. [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(2):62-72.]
- [2] Wei QW, Ke FE, Zhang JM, et al. Biology, fisheries, and conservation of sturgeons and paddlefish in China. *Environmental Biology of Fishes*, 1997,48(1):241-255.
- [3] Wei QW. Conservation of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) based on its life history: Dilemma and breakthrough. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1297-1319. [危起伟. 从中华鲟(*Acipenser sinensis*)生活史剖析其物种保护:困境与突围. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1297-1319.]
- [4] Huang ZL, Wang LH. Yangtze Dams increasingly threaten the survival of the Chinese sturgeon. *Current Biology*, 2018,28(22):3640-3647.
- [5] Huang ZL, Wang LH. The Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) conservation -- Introspection, reform and innovation. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1320-1332. [黄真理, 王鲁海. 长江中华鲟(*Acipenser sinensis*)保护——反思、改革和创新. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1320-1332.]
- [6] Cao WX, Deng, ZL, Yu ZT, et al. The fish rescue of the Gezhou Dam. *Resource Development and Protection*, 1989, 5(3):8-12. [曹文宣, 邓中彝, 余志堂等. 葛洲坝水利枢纽工程的救鱼问题. 资源开发与保护, 1989, 5(3):8-12.]
- [7] Ke FE. Discussion on the conservation and development of Chinese sturgeon. *Freshwater Fisheries*, 1999,29(9):4-7. [柯福恩. 论中

华鲟的保护与开发. 淡水渔业, 1999,29(9):4-7.]

- [8] Gao X, Chang T, Lin PC, *et al.* Ecological and environmental assessment index in the middle-lower reaches of the Yangtze River based on the spawning population size of Chinese sturgeon. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(6): 1396-1399. [高欣, 林鹏程, 常涛, 等. 基于中华鲟繁殖群体数量的长江中、下游生态环境考核指标. 水生生物学报, 2021,45(6):1396-1399.]
- [9] Tao JP, Qiao Y, Yang Z, *et al.* Estimation on the spawning population and spawning sizes of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and trend analysis of their change in recent years. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(2): 37-43. [陶江平, 乔晔, 杨志等. 葛洲坝产卵场中华鲟繁殖群体数量与繁殖规模估算及其变动趋势分析. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 37-43.]
- [10] Huang ZL. A new method of estimation on populations of Chinese sturgeon in the Yangtze River by using existing fishing data. *Science & Technology Review*, 2013, 31(13): 18-22. [黄真理. 利用捕捞数据估算长江中华鲟资源量的新方法. 科技导报, 2013, 31(13): 18-22.]
- [11] Huang ZL, Wang LH, Ren JY. Study on the spawning population fluctuation of Chinese sturgeons around the closure of Gezhouba Dam. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47(8): 871-881. [黄真理, 王鲁海, 任家盈. 葛洲坝截流前后长江中华鲟繁殖群体数量变动研究. 中国科学:技术科学, 2017, 47(8): 871-881.]
- [12] Wu JM, Wang CY, Zhang SH *et al.* From continuous to occasional: small-scale natural reproduction of Chinese sturgeon occurred in the Gezhouba spawning ground, Yichang, China. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 425-431. [吴金明, 王成友, 张书环等. 从连续到偶发:中华鲟在葛洲坝下发生小规模自然繁殖. 中国水产科学, 2017, 24(3): 425-431.]
- [13] Zhuang P, Zhao F, Zhang T, *et al.* New evidence may support the persistence and adaptability of the near-extinct Chinese sturgeon. *Biological Conservation*, 2016,193:66-69.
- [14] Dong F, Wei QW. On the approach of rescuing conservation for Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* gray). *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(9): 1610-1616. [董芳, 危起伟. 论中华鲟抢救性保护的途径. 水生生物学报, 2024,48(9):1610-1616.]
- [15] Xie P. Can we save the disappearing sturgeons in the Yangtze River? *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 899-914. [谢平. 我们能拯救长江中正在消逝的鲟鱼吗? 湖泊科学, 2020, 32(4): 899-914.]
- [16] Yang HL, Wei QW. Suppressive and active protective actions in aquatic wildlife conservation? *Journal of Lake Sciences*. 2021, 33(1): 1-10. [杨海乐, 危起伟. 论水生野生动物的主动保护与被动保护. 湖泊科学. 2021, 33(1): 1-10.]
- [17] Zhuang P, Zhang T, Zhao F, *et al.* Conservation of the wild population of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and its habitats. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(9): 1625-1632. [庄平, 张涛, 赵峰, 等. 论拯救中华鲟野生种群及其栖息生境. 水生生物学报, 2024,48(9):1625-1632.]
- [18] Jiang W, Du HJ, Chen P, *et al.* Process, difficulties, and directions of species conservation of Chinese sturgeon. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(9): 1617-1624. [姜伟, 杜合军, 陈沛, 等. 中华鲟物种保护的历程、难点和方向. 水生生物学报, 2024,48(9):1617-1624.]
- [19] Zhuang P, Kynard B, Zhang L, *et al.* Ontogenetic behavior and migration of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*. *Environmental Biology of Fishes*, 2002,65(1):83-97.
- [20] Kimmel JG, Buchinger TJ, Larson DL, *et al.* Behavioral evidence of olfactory imprinting during embryonic and larval stages in lake sturgeon. *Conservation Physiology*, 2023,11(1):coad045.
- [21] Wang LH, Huang ZL. Passive drifting and high mortality rate of released subadult Chinese sturgeons in the Yangtze River. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2024,34(1):201-219.
- [22] Chen JH, Zhuang P, Wu JH, *et al.* Migration and distribution of released *Acipenser sinensis* in the sea based on Pop-up Archival Tag technique. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011,18(2):437-442. [陈锦辉, 庄平, 吴建辉, 等. 应用弹式卫星数据回收标志技术研究放流中华鲟幼鱼在海洋中的迁移与分布. 中国水产科学, 2011,18(2):437-442.]
- [23] Wu JH, Chen JH, Gao CX. Research on the downstream migration and distribution characteristics of Chinese sturgeon in the Yangtze Estuary based on tagging and releasing information. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021,28(12):1559-1567. [吴建辉, 陈锦辉, 高春霞. 基于标志放流信息的长江口中华鲟降海洄游和分布特征. 中国水产科学, 2021,28(12):1559-1567.]
- [24] Wang CY, Du H, Liu M, *et al.* Migrations and distributions of Chinese sturgeon released in the sea of Xiamen. *Scientia Sinica Vitae*, 2016(3):294-303. [王成友, 杜浩, 刘猛, 等. 厦门海域放流中华鲟的迁移和分布. 中国科学:生命科学, 2016(3):294-303.]

- [25] Lin JZ, Wang J, Su YQ. Tagged ranching of *Acipenser sinensis* in the Minjiang River. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1999(4):378-381. [林金忠, 王军, 苏永全. 中华鲟于闽江的人工放流试验. 台湾海峡, 1999(4):378-381.]
- [26] Wu C, Zhu JZ, Su W, *et al.* Application of Pop-up Satellite Archival Tags in research of distribution and migration of marine animals: A review. *Chinese Journal of Fisheries*, 2022,35(2):108-116. [吴川, 朱佳志, 苏巍, 等. 弹出式卫星标记在海洋动物分布与迁移研究中的应用. 水产学杂志, 2022,35(2):108-116.]
- [27] Luo J, Du H, Wei QW, *et al.* Reproductive biology of an artificial population of endangered Chinese sturgeon (*Acipenser Sinensis*). *Journal of Fishery Sciences of China*. 2020, **27**(3):269-276. [罗江, 杜浩, 危起伟等. 濒危中华鲟人工群体的繁殖生物学. 中国水产科学, 2020,**27**(3):269-276.]
- [28] Watanabe YY, Wei QW, Du H, *et al.* Swimming behavior of Chinese sturgeon in natural habitat as compared to that in a deep reservoir: preliminary evidence for anthropogenic impacts. *Environmental Biology of Fishes*, 2013,96(1):123-130.
- [29] Havey MA, Dittman AH, Quinn TP, *et al.* Experimental evidence for olfactory imprinting by Sockeye salmon at embryonic and smolt stages. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2017,146(1):74-83.