

漂流性鱼卵的孵化特性及水动力需求研究进展

曾庆慧¹, 唐家璇¹, 胡鹏¹, 杨泽凡¹, 李硕², 侯佳明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. 内蒙古引绰济辽供水有限责任公司, 内蒙古 兴安盟 137400)

摘要:鱼卵运动规律研究是鱼类产卵场位置推算、水库生态调度和鱼类资源保护的基础。对于产漂流性卵鱼类, 当流水环境不足以维持鱼卵漂流时, 鱼卵便下沉死亡而无法孵化成幼鱼。通过对照中国内陆鱼类名录, 查阅国内重要流域及地方鱼类志中有关产漂流性卵鱼类的繁殖条件, 梳理了典型鱼类的产卵水温、产卵时间和孵化时长等相关信息。针对现有鱼类志中对于鱼卵基本物理性质及鱼卵孵化所需水动力条件信息缺失的情况, 补充查阅了国内外相关文献, 归纳总结了漂流性鱼卵安全漂流的水动力条件。一种观点认为鱼卵在水体中是否能安全漂流取决于水体的流速, 另一种观点认为控制漂流性鱼卵悬浮或下沉的关键参数是湍流状态或剪切速度, 而不是水流的线速度, 现有漂流性鱼卵孵化的关键水动力条件和阈值尚有争议, 仍需加强鱼卵运动规律的相关试验研究。目前国内外对鱼卵的漂流输移研究方法和手段, 主要采用野外监测、室内实验和模型模拟。已有研究大多只是针对鱼卵运动规律本身进行单一试验或模型验证, 如何通过水库调度最大程度保障漂流性鱼卵的漂流孵化条件是未来鱼类保护的重要方向。

关键词:漂流性卵; 孵化特性; 水动力条件; 生态调度

中图分类号:X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)05-0141-08

明晰鱼卵运动规律是鱼类产卵场位置推算、水库生态调度和鱼类资源保护等研究的基础, 尤其是对于产漂流性卵鱼类, 其受精卵比重略大于水, 产出后卵膜吸水膨胀, 需要适宜的水流外力作用才能悬浮在水层中随水流漂流而正常发育。当流量减少、流速降低、水流动能不足以维持鱼卵漂流时, 鱼卵便下沉而无法孵化成幼鱼(易雨君, 2008)。孵化出的早期仔鱼仍要顺水漂流一段时间, 待卵黄囊完全吸收后, 才能主动游到浅水或缓流处滞留(李翀, 2008; 李陈, 2012), 在此期间均需要维持一定的流水环境。

新中国成立以来, 我国建设了大量的水利水电工程, 特别是进入21世纪以后, 长江上游地区梯级水电开发步伐逐步加快。梯级电站建成后, 自然流淌的河流变成多个缓流的水库, 生境改变将对漂流性鱼卵的孵化产生重大影响(曹文宣, 2017)。一方面, 库区水流的

紊动强度远小于天然河道, 支撑鱼卵孵化的流水生境消失, 导致鱼卵下沉死亡; 另一方面, 水利工程的阻隔导致鱼卵在库区内没有足够的漂流距离或漂流时间, 鱼卵和游泳能力弱的仔鱼被水流带至坝前随下泄水流降落, 将会受到机械损伤和气体过饱和伤害(Simpson, 1949; 黄海涛, 2014)。如何通过合理的生态调度, 创造满足漂流性鱼卵孵化所需的流水环境, 同时在有限的漂程内尽可能增加鱼卵的漂流时间, 最大程度保障漂流性鱼卵孵化, 已成为开展水利工程生态调度、减缓其生态影响的重要技术问题。

要准确模拟和评估梯级电站联合调度条件下鱼卵的漂流轨迹及漂流时间, 探究梯级电站调度对其孵化的影响, 必须系统研究漂流性鱼卵在流水中的运动特性, 确定鱼卵运动方程及其漂浮主要决定因素的阈值。本文重点归纳了产漂流性卵鱼类繁殖孵化的基础信息, 介绍了国内外鱼卵安全漂流水动力条件及其运动特性的研究进展, 并展望了产漂流性卵鱼类保护有待进一步完善和深入的方向, 以期对鱼类资源保护提供技术支撑。

1 鱼类信息来源

1.1 资料收集

根据作者长期野外工作采集获得的大量样品和经验, 参照《中国内陆鱼类物种与分布》中记录的鱼

收稿日期: 2021-03-29 修回日期: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(52009146, 52122902); 水生态安全保障人才创新团队项目(WR0145B022021); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SK12022TS07, SK12022ZD01)。

作者简介: 曾庆慧, 1990年生, 女, 高级工程师, 主要从事水利工程生态环境影响研究。E-mail: qhzeng1990@126.com

通信作者: 胡鹏, 1985年生, 男, 正高级工程师, 主要从事生态水文学研究。E-mail: hp5426@126.com

类有效种 1 384 种(亚种),查阅了 1960–2017 年 56 本主要流域及地方鱼类志,其中具有重要参考价值的著作包括《东北地区淡水鱼类》(解玉浩, 2007)、《西藏鱼类及其资源》(西藏自治区水产局, 1995)、《长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区科学考察报告》(危起伟, 2012)、《黄河鱼类志》(李思忠, 2017)以及《中国条鳅志》(朱松泉, 1989), 1979–2021 年已发表的 265 篇期刊论文, 以及 4 个网站(1. Fishbase: <https://fishbase.org>; 2. GBIF: <https://www.gbif.org/>; 3. Freshwater Biodiversity Data Portal: <https://data.freshwaterbiodiversity.eu/>; 4. THE IUCN RED LIST OF THREATENED SPECIES: <https://www.iucnredlist.org/>), 系统梳理了产漂流性卵鱼类的繁殖孵化特性。

1.2 繁殖条件

共确定产漂流性卵鱼类 55 种, 占中国内陆鱼类总数的 4.0%; 其中, 有关繁殖条件、生境习性等有较详细研究记录的共 18 种(表 1)。在产卵阶段, 有关产卵水温和产卵月份的记载较详细, 但对于鱼类产卵所需水文条件信息普遍缺失。大部分资料都对流速要求进行定性描述, 但对于具体流速大小、洪峰持续时间等刺激产卵的定量结果较少。在孵化阶段, 几种常见产漂流性卵鱼类有具体孵化时长的记载, 但对于鱼卵漂流所需水流条件几乎没有记录。以上结论是基于有相对详细记载信息的鱼类分析得出, 而对于其他产漂流性卵鱼类, 产卵繁殖信息缺失更为严重。

2 鱼卵安全漂流水动力条件

2.1 水流速度

一些学者认为, 鱼卵在流水中是否能顺水漂流取决于水体的流速, 但不同研究方式得到的最小流速值不同。Stanley 等(1978)对欧洲和原苏联产卵区进行了文献综述和实地考察, 提出草鱼成功繁殖条件之一是需要 0.6 m/s 的最小流速来支撑鱼卵在水中漂流。然而, Leslie 等(1982)在佛罗里达州的小溪中进行野外试验后发现, 未受精的草鱼卵在水中输移所需的最小流速为 0.23 m/s, 远小于上述报道的 0.6 m/s; Abdusamadov(1986)总结得出最常用的鱼卵安全漂流流速阈值为 0.7 m/s; Kocovsky 等(2012)在随后的研究中认可并采纳了这一数值。近年来, Kolar 等(2007)总结了促使四大家鱼成功产卵孵化的河流流速为 0.3~3.0 m/s; 但以上文献关于最小流速阈值的确定是基于对产卵场流速观察的结果, 并不一定能反映维持鱼卵漂流输移的最小流速需求(Murphy & Jackson, 2013)。

唐明英等(1989)通过水槽试验提出了漂流性鱼卵漂流的下限流速阈值为 0.25 m/s, 满足该流速条件时, 四大家鱼鱼卵悬浮率均大于 80%; 唐会元等(1996)在进行四大家鱼产卵场调查时发现, 当流速等于 0.27 m/s 时, 鱼卵开始下沉, 0.18~0.25 m/s 时鱼卵陆续下沉, 0.15 m/s 时鱼卵基本下沉, 0.10 m/s 时鱼卵全部下沉; 李陈(2012)认为当流速小于 0.25 m/s, 受精卵开始下沉, 若小于 0.15 m/s 时, 受精卵沉入水底, 发育减缓直至停止; 曹文宣(2017)认为流速大于 0.20 m/s 时, 漂流性鱼卵可以悬浮在水中漂流, 当流速小于 0.20 m/s 时则会下沉, 被泥沙掩盖或缺氧死亡。

2.2 剪切速度

除此之外, 还有一些学者认为控制漂流性鱼卵悬浮或下沉的关键参数是湍流或剪切速度, 而不是水流的线速度(Yih & Liang, 1964; Bagnold, 1966)。当水流剪切速度等于鱼卵下沉速度时, 鱼卵开始悬浮(Rijn, 1984); 反之, 当水流剪切速度小于鱼卵的沉降速度时, 湍流不能再维持鱼卵的悬浮状态, 鱼卵将下沉到河床甚至死亡(Kolar et al, 2007; Murphy & Jackson, 2013)。基于上述理念, Murphy & Jackson(2013)通过比较各河段的剪切速度和鱼卵下沉速度, 确定了鱼卵下沉区和潜在产卵场。然而, 大多数河流系统通常难以获得剪切速度, 线速度更容易观测且其大小与剪切速度密切相关, 因此常使用线速度来估计鱼卵漂流的最低要求(Kocovsky et al, 2012); 此外, 漂流性鱼卵和孵化出的早期仔鱼仍需要随水被动漂流, 直至发育到鳔充气阶段, 一般需要 5~6 d, 这期间鱼卵和仔鱼往往随水漂流到了几百米甚至上千米的下游河段(姜伟等, 2010)。因此, 除了水动力条件之外, 漂流性卵的孵化发育还需要一定的漂流时间和漂程才能发育成有主动游泳能力的幼鱼, 河流长度至少需要 100 km(Kolar et al, 2007; George et al, 2017)。

目前, 有关漂流性鱼卵安全漂流水动力需求的研究多通过文献综述和野外产卵场流速观察得出, 考虑全面且具有一定参考价值。但野外环境影响因素众多、环境变量不可控, 研究成果多偏于定性, 缺乏定量化和机理性成果。

3 鱼卵运动特性研究方法

3.1 野外监测

3.1.1 收集天然鱼卵 高天珩等(2015)于 2011–2014 年在长江江津段通过圆锥网捕捞鱼卵, 对铜鱼鱼卵日均密度与水文环境因子进行了相关性分析, 并根据鱼卵发育时期和流速推测了铜鱼的主要产卵区

表1 产漂流性鱼卵类基本信息

Tab.1 Basic information on fish species with buoyant eggs

| 鱼名 | 物理性质 | | 繁殖条件 | | 孵化条件 | 分布范围 | 濒危等级 | 参考文献 |
|--------|----------|--------------|--------------------|---|---------------------------|-------------------|------|--|
| | 吸水膜直径/mm | 比重 | 产卵时间 | 产卵条件 | | | | |
| 青鱼 | 4.7~5.1 | 1.0014~1.003 | 5~7月 | 有回旋流、泡涌流处、江水上漲和流速加大可刺激发情产卵。 | 21~24°C/35h; 26°C/18h | 黑龙江至珠江各大水系 | 无危 | 王鸿媛, 1984; 唐明英等, 1989; 倪勇和伍汉霖, 2006; 闫洪山等, 2006; 解玉浩, 2007 |
| 草鱼 | 4.1~4.3 | 1.0015~1.003 | 5~7月, 盛期5月中下旬 | 干流河流汇合处、河曲一侧深槽水域、两岸紧缩江段产卵, 需0.33~1.50 m/s流速刺激 | 24~26°C/28h | 黑龙江至珠江各大水系 | 无危 | 唐明英等, 1989; 张觉民, 1995; 倪勇和伍汉霖, 2006; 解玉浩, 2007; 柏海霞等, 2014 |
| 鳊 | 4.4~5.3 | 1.0028 | 5~8月, 盛期6~7月 | 水位能涨汛期产卵, 流速平稳停止, 在回旋流或泡涌流处产卵 | 19.4~21.2°C/40h | 海河至珠江及海南岛江河、湖泊中。 | 无危 | 唐明英等, 1989; 倪勇和伍汉霖, 2006; 解玉浩, 2007; 倪星晨等, 2019 |
| 鲢 | 4.0~4.9 | 1.002~1.0031 | 4~7月, 盛期5~6月 | 水位上漲产卵, 产卵场位于中下游水流湍急、有回旋流或泡涌流处 | 24~26°C/48h | 黑龙江至珠江及海南岛江河、湖泊 | 无危 | 张觉民, 1995; 唐明英等, 1989; 倪勇和伍汉霖, 2006; 解玉浩, 2007 |
| 鳙 | | | 5~8月, 盛期6~7月 | 需要一定水流条件, 汛期涨水刺激时, 在江河及沿湖有水注入的港道中产卵 | 25°C/36h | 黑龙江至珠江各大水系 | 无危 | 中国水产科学研究院东海水产研究所, 1990; 张觉民, 1995; 倪勇和朱成德, 2005; 倪勇和伍汉霖, 2006; 解玉浩, 2007 |
| 鲮 | 2.3~3.1 | | 5~7月, 盛期6~7月 | 静流水中均能繁殖 | 20°C/30h | 除青藏高原和西北外, 中国均有分布 | 无危 | 郑葆珊和黄浩明, 1980; 张觉民, 1995; 倪勇和伍汉霖, 2006; 雷欢等, 2018 |
| 鲮 | 5.0~6.5 | | 4~6月, 盛期5月 | 江河水库中均能自然繁殖, 繁殖水温18~30°C, 最适水温22~28°C | 22~24°C/40~48h | 黑龙江至珠江沿海各水系 | 无危 | 王鸿媛, 1984; 倪勇和伍汉霖, 2006; 张君, 2016; 蒋小珍和黄金华, 2018; 雷欢等, 2018 |
| 鳊 | | | 5~7月 | 在一定流速的湖泊进水和有风浪拍击的岸滩产卵, 喜缓流水环境, 产卵场在近岸水深0.6~1.0 | 21~24°C/3d | 长江及其以北 | 无危 | 王鸿媛, 1984; 新乡师范学院生物系, 1984; 成庆泰和周才武, 1997; 倪勇和伍汉霖, 2006 |
| 翘嘴鲌 | | | 5~7月, 盛期5月中旬 | 夏汛到来开始繁殖, 产卵水温23°C左右, 在有微流水的石滩上产卵, 或有风浪拍打的浅水沙砾石处 | 26.8°C/22.5h | 黑龙江至珠江各大水系包括中国台湾 | 无危 | 辽宁省科学技术委员会, 1987; 陈马康等, 1990; 张觉民, 1995; 倪勇和伍汉霖, 2006; 刘丹阳等, 2012 |
| 北方铜鱼 | | | 4~7月, 盛期5月中旬 | 有一定流速的滩头、沙砾底质处产卵 | >18°C/2~3d | 黄河水系青海贵德至山东东段 | 极危 | 黄河水系渔业资源调查协作组, 1986 |
| 银鲌 | 2.5~3.8 | | 长江水系5~6月, 东北地区6~7月 | 产卵水温17.5~27°C | 17.5~27.0°C/63d | 除西部、西北部外的所有地区 | 无危 | 李修峰等, 2005; 解玉浩, 2007; 雷欢等, 2018 |
| 光唇蛇鮈 | | | 3~6月 | 河道流水中产卵 | | 长江中上游 | 无危 | 陈马康等, 1990; 倪勇和伍汉霖, 2006 |
| 河口孟加拉鮠 | | | 4~9月 | 产卵场多为上游有急滩、江心有平坦沙石河床; 在洪水骤发、水位上涨、流速增大、水温26~30°C产卵 | | 云南元江水系 | 易危 | 褚新洛, 1990 |
| 似鳊 | | | 6~7月, 盛期6月中旬 | 涨水时集群逆水到浅滩处产卵, 水深0.6~3.0m, 流速0.3m/s, 水温25°C | 21.0~23.4°C/35h | 海河、黄河、长江 | 无危 | 陈马康等, 1990; 解玉浩, 2007 |
| 鳊 | 6.6~8.2 | | 4月下旬至5月 | | 白天16~17°C, 夜间12~14°C/104h | 长江及其以南各大水系 | 极危 | 王鸿媛, 1984; 倪勇和朱成德, 2005; 倪勇和伍汉霖, 2006 |
| 拟赤梢鱼 | | | 6~7月 | | 20.5~22.5°C/48~62 h | 黑龙江水系 | 无危 | 张觉民, 1995; 于信勇和周长海, 2015 |
| 圆口铜鱼 | 5.1~7.8 | | | | | 长江及雅砻江干流下游 | 极危 | 石琼等, 2015; 董纯等, 2019 |
| 宽体沙鳅 | 1.6~1.9 | | | | (23.0±0.5)°C/27h | 长江水系上游 | 数据缺乏 | 岳兴建等, 2011 |

注: 分布区域来源自《中国内陆鱼类物种与分布》(张春光, 2016), 濒危等级来源自中国脊椎动物红色名录(蒋志刚等, 2016)。Note: Distribution area is originated from Species Diversity and Distribution of Inland Fishes in China (Zhang, 2016), and endangered category is originated from Red list of China's Vertebrates (Jiang et al., 2016).

域;徐薇等(2019)使用弼网对乌江下游漂流性鱼卵进行了阶段性调查,初步分析了银盘电站蓄水前后产漂流性卵鱼类的自然繁殖变化;雷欢等(2018)通过用弼网采集表层样品,用圆锥网采集中、底层样品的方式,对丹江口水库上游四大家鱼等产漂流性卵鱼类的早期资源量进行现状调查,探究了梯级水电开发后产漂流性卵鱼类早期资源量及其演变情况;Andrew 等(1982)在佛罗里达州进行了草鱼卵的野外观测试验,发现当河段足够长时,草鱼卵在流速大于 0.23 m/s 的情况下可以成功孵化;Murphy & Jackson(2013)认为当水流的剪切速度大于等于鱼卵的下沉速度时,可以保证鱼卵漂浮,并根据该理论调查评估了密歇根湖、伊利湖相关支流的水动力特征是否能满足四大家鱼的产卵繁殖需求。对天然鱼卵的观测能够反映自然河道中鱼卵漂流的真实状态,但真实鱼卵肉眼较难分辨观察且难获得,尤其是对于濒危鱼类,捕捞或采用真实鱼卵进行试验会进一步加剧鱼类的濒危程度。

3.1.2 投放标志物 姜伟等(2010)在长江上游重庆江津-珞璜江段使用标志物对自然条件下大流量河流中漂流性鱼卵的漂流方式进行了模拟实验,发现在流量稳定的情况下,在同一样点投放不同的标志物,其平均漂流速度具有显著差异,标志物在河流中的漂流密度以高峰值和低峰值相间的方式出现;Medley 等(2007)用模型鱼卵模拟了墨西哥 Pecos 河向支流排放灌溉水的过程中漂流性鱼卵的运输和保留率。标志物具有易获取、易保存、易观察的优点,但其直径、密度等物理属性相对固定,不具备真实鱼卵吸水膨胀的特性,与实际情况还是略有差别。实际操作时可根据鱼卵可获得性和试验目的进行选择。

野外观测获得的流速阈值能反映自然条件下维持鱼卵漂流的流速,然而该阈值是基于对产卵场整体流速的观察结果,不一定能代表维持鱼卵漂流的最小流速要求;此外,对不同种类鱼卵流速需求差异也没有进一步区分。

3.2 室内试验

3.2.1 断面收集法 唐明英等(1989)通过在水槽内固定断面上放置取卵器,定量分析了不同水流速度下鱼卵垂直分布情况及其安全漂流的下限流速,进而推算出三峡水库 175 m 调蓄方案时,鱼卵可安全漂流的时程为 200 h,安全漂流区间为 400~490 km;杨庆(2019)通过在仿真试验河道的不同断面放置取卵器,探究了在不同流速及水深下鲢受精卵的运动及断面分布状况,确定了鱼卵漂流的下限流速阈值,初

步得出水深越浅则一定程度上维持鱼卵漂流需要的流速阈值越高的结论。断面收集法简单易操作,对实验水槽的材质没有要求且适用范围广,但只能针对不同断面收集的数据进行点上的分析,无法获得鱼卵运动轨迹等连续的过程信息。

3.2.2 图像采集法 刘雪飞等(2018)应用 PTV 粒子图像测速技术,通过不同水深、流速工况的水槽试验,推导解析了四大家鱼鱼卵的运动方程,系统分析了恒定均匀流条件下鱼卵的运动特性、主要影响因素及其作用机理,同时也指出该研究中没有考虑紊流作用,可能导致推导的运动理论公式对鱼卵纵向速度、沉速和轨迹陡率都有所高估;罗佳等(2013)通过在长方形有机玻璃水槽上设置视频采集装置,研究了黏沉性匙吻鲟卵和达氏鳢卵的漂移规律,为研究中华鲟卵提供了间接的技术参考以及理论帮助。图像采集法可以详细记录鱼卵漂流输移的全过程,结合图像处理系统还可实现粒子运动速度、运动轨迹和轨迹特征的统计分析。由于相机拍摄需要,该方法仅适用于玻璃水槽,造价高昂,且水槽高度和深度都较小,观测范围有限。室内实验条件可控,能针对某种特定类型鱼卵定量测定,但其过程繁琐,设备与人工代价大,测定的阈值结果与天然河道情况仍略有差异。

3.3 模型模拟

部分学者将鱼卵和幼苗概化成随水漂流的粒子,通过数值模型的手段研究鱼卵的运动轨迹。Garcia 等(2013)建立了 FluEgg 模型,研究了流速、剪切弥散和湍流扩散对鲢鱼卵迁移扩散规律的影响;George 等(2017)测定了四大家鱼在发育和受精后不同时间段内卵的平均直径和最终沉降速度,并应用到 FluEgg 模型中,探讨了这些物理参数对提高常用的四大家鱼鱼卵漂流和分布模型模拟精度的意义;Andrés 等(2012)通过模型研究了漂流性鱼卵密度对鱼卵分布情况的影响,发现鱼卵密度在最初的几个小时会影响鱼卵的水平和垂直轨迹,从而影响鱼卵漂流路线和孵化区;Zeng 等(2019)构建了金沙江中游鲁地拉库区三维水动力学模型,并结合拉格朗日粒子示踪技术对不同调度方案下漂流性鱼卵的漂流轨迹进行了模拟;Barros & Rosman(2018)通过二阶拉格朗日耦合 SisBaHiA 水动力学模型,模拟预测了 Jirau 水电站库区卵苗的漂流行为;Pierre 等(2006)建立了一维垂向生物物理模型,该模型适用于潮流、风生环流和河流排放影响下的陆架海洋水文特征,为鱼卵垂向分布情况模拟提供了新的手段;Mariani 等(2010)

应用海洋环流模型(OPA)探究了影响蓝鳍金枪鱼鱼卵和幼苗空间分布的输移和滞留过程,模拟的空间分布结果与实地采样数据基本一致;George等(2011)利用MIKE 21模型构建了印度西海岸半封闭Kachchh海湾的二维水动力模型,并利用粒子分析(PA)模块模拟了潮汐作用下鱼卵和幼苗的漂流输移情况;王悦等(2012)结合三维水动力模型与粒子示踪技术,反演了中华鲟2009年自然繁殖卵苗沿河道的输移路线和扩散过程,发现卵苗输移受天然河道地形和流场变化的影响较大。

模型模拟能精确刻画鱼卵运动漂移的过程,但建模需要详细的地形和水文气象资料。一般不能通过模型获得鱼卵漂流的最小流速阈值,而是将已知阈值作为模型的输入参数。

4 研究展望

4.1 漂流性鱼卵的物理性质亟需补充完善

根据资料收集结果,漂流性卵的鱼类产卵孵化信息较少,有些甚至连鱼卵的基本物理性质(受精卵吸水膨胀膜径、比重等)都没有记载。从已有几组数据来看,四大家鱼鱼卵吸水膨胀膜径和比重都较接近,但其他产漂流性卵鱼类之间差异较大(或无参考资料)。现有鱼卵安全漂流水动力条件的研究对象主要是四大家鱼鱼卵,研究结果并不一定适用于其他鱼类,对北方铜鱼、圆口铜鱼等受威胁的产漂流性卵鱼类还需开展有针对性的研究,并及时公布相关数据;此外,一些学者尝试利用模型鱼卵来研究鱼卵安全漂流的流体力学条件,也亟需鱼卵的膜径、比重等基础信息为模型鱼卵的选择和定制提供依据,既节省了研究人员大量精力,也避免了对亲鱼的重复捕捞和伤害。

4.2 鱼卵安全漂流的流体力学条件有待明确

目前,对于鱼卵漂浮主要决定因素和机理的理解仍未形成共识,一种观点认为鱼卵是否能安全漂流取决于水体的流速,国内外学者通过不同研究手段提出了鱼卵安全漂浮的流速阈值,区间在0.2~0.7 m/s;另一种观点认为控制漂流性鱼卵悬浮或下沉的关键参数是水流的剪切速度,但暂未提出鱼卵安全漂流的剪切速度或雷诺数等相关指标的阈值,这部分观点主要来自国外文献,国内尚未有学者开展相关研究。因此,通过室内实验系统探究漂流性鱼卵运动特性,同时考虑紊流作用,明晰控制鱼卵漂浮的主要因素及其阈值,将是未来鱼卵运动特性研究的一个重点方向。

4.3 漂流性鱼卵的轨迹模拟准确性有待提高

对于漂流性鱼卵而言,其特殊性在于需要一定的水力学条件才能随水漂流,否则鱼卵将下沉死亡。传统的轨迹模拟是将鱼卵看做基于水流被动漂流的粒子,极少考虑到鱼卵垂向上下沉到河底后无法继续随水漂流的情况,这将导致鱼卵实际已经下沉到河床死亡而在模型中粒子水平方向轨迹仍继续漂流的现象,从而无法判断鱼卵最终下沉区域与漂流时长。因此,如何在数值模型中通过鱼卵运动规律准确定义粒子的三维运动方程,当粒子下沉到河床时,运动轨迹随即终止,是提高鱼卵轨迹模拟准确性的重要研究内容。

4.4 保障鱼卵漂流的梯级电站联合调度有待加强

已有研究大多是通过单一的试验揭示鱼卵运动规律,或运用模型模拟鱼卵运动轨迹,研究结果独立且分散,而联系鱼卵运动规律与梯级电站调度方案以解决梯级电站开发背景下产漂流性卵鱼类保护这一实际问题的综合研究较少。如何将鱼卵运动机理研究与模型模拟有机结合起来,并辅以野外试验验证,系统解答梯级水库调度对鱼卵漂流的影响,以及如何通过水库调度最大程度地保障漂流性鱼卵的孵化问题,是未来鱼类资源保护研究的重要方向。

参考文献

- 柏海霞,彭期冬,李翀,等,2014. 长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水动力条件研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 12(3):249-257.
- 曹文宣, 2017. 长江上游水电梯级开发的水域生态保护问题[J]. 长江技术经济, (1):25-30.
- 陈马康,童合一,俞泰济, 1990. 钱塘江鱼类资源[M]. 上海:上海科学技术文献出版社.
- 成庆泰,周才武, 1997. 山东鱼类志[M]. 青岛:山东科学技术出版社.
- 褚新洛, 1990. 云南鱼类志[M]. 北京:科学出版社.
- 董纯,陈小娟,万成炎,等,2019. 圆口铜鱼人工繁殖及胚胎发育研究[J]. 水生生态学杂志, 40(3):115-119.
- 高天珩,田辉伍,王涵,等,2015. 长江上游江津断面铜鱼鱼卵时空分布特征及影响因子分析[J]. 水产学报, 39(8): 1099-1106.
- 郜星晨,姜伟,张琪,等,2019. 长江宜昌段鳊的繁殖生物学初步研究[J]. 水生生态学杂志, 40(6):92-98.
- 黄海涛,2014. 水电开发中的生态风险评价与管理研究[D]. 北京:华北电力大学.
- 黄河水系渔业资源调查协作组, 1986. 黄河水系渔业资源[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社.
- 姜伟,刘焕章,段中华,等,2010. 以标志物对长江上游漂流性鱼

- 卵漂流方式的研究[J]. 水生生物学报, 34(6):1172-1178.
- 蒋小珍, 黄金华, 2018. 鳙鱼的人工繁育技术和营养需求研究进展[J]. 中国饲料, (21):53-56.
- 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等, 2016. 中国脊椎动物红色名录[J]. 生物多样性, 24(5):501-551, 615.
- 解玉浩, 2007. 东北地区淡水鱼类[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社.
- 雷欢, 谢文星, 黄道明, 等, 2018. 丹江口水库上游梯级开发后产漂流性卵鱼类早期资源及其演变[J]. 湖泊科学, 30(5):1319-1331.
- 李陈, 2012. 长江上游梯级水电开发对鱼类生物多样性影响的初探[D]. 武汉:华中科技大学.
- 李翀, 廖文根, 陈大庆, 等, 2008. 三峡水库不同运用情景对四大家鱼繁殖水动力学影响[J]. 科技导报, (17):55-61.
- 李思忠, 2017. 黄河鱼类志[M]. 青岛:中国海洋大学出版社.
- 李修峰, 黄道明, 谢文星, 等, 2005. 汉江中游银鮡的繁殖生物学[J]. 水利渔业, 25(2):23-24, 60.
- 辽宁省科学技术委员会, 1987. 辽宁动物志:鱼类[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社.
- 刘丹阳, 司力娜, 张晓光, 等, 2012. 兴凯湖翘嘴鲌胚胎和仔鱼发育的研究[J]. 东北农业大学学报, 43(3):110-116.
- 刘雪飞, 林俊强, 彭期冬, 等, 2018. 应用 PTV 粒子追踪测速技术的鱼卵运动试验研究[J]. 水利学报, 49(4): 501-511.
- 罗佳, 石小涛, 刘德富, 等, 2013. 两种鲟鱼卵在均匀流场中的漂移特性研究[J]. 水生生物学报, 37(5): 978-981.
- 倪勇, 伍汉霖, 2006. 江苏鱼类志[M]. 北京:中国农业出版社.
- 倪勇, 朱成德, 2005. 太湖鱼类志[M]. 上海:上海科学技术出版社.
- 石琼, 范明君, 张勇, 2015. 中国经济鱼类志[M]. 武汉:华中科技大学出版社.
- 唐会元, 余志堂, 梁秩乐, 等, 1996. 丹江口水库漂流性鱼卵的下沉速度与损失率初探[J]. 水利渔业, (4):26-30.
- 唐明英, 黄德林, 黄立章, 等, 1989. 草、青、鲢、鳙鱼卵水力学特性试验及其在三峡库区孵化条件初步预测[J]. 水利渔业, (4):26-30.
- 王鸿媛, 1984. 北京鱼类志[M]. 北京:北京出版社.
- 王悦, 杨宇, 高勇, 等, 2012. 葛洲坝下中华鲟产卵场卵苗输移过程的数值模拟[J]. 水生态学杂志, 33(1):1-4.
- 危起伟, 2012. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区科学考察报告[M]. 北京:科学出版社.
- 西藏自治区水产局, 1995. 西藏鱼类及其资源[M]. 北京:中国农业出版社.
- 新乡师范学院生物系, 1984. 河南鱼类志[M]. 郑州:河南科学技术出版社.
- 徐薇, 杨志, 万力, 等, 2019. 银盘电站蓄水前后乌江下游产漂流性卵鱼类自然繁殖变化[J]. 水生态学杂志, 40(6):8-15.
- 闫洪山, 杜瑜, 赵德树, 2006. 辽南地区青鱼人工繁殖试验[J]. 水利渔业, 26(2):51, 109.
- 杨庆, 2019. 典型鱼类生存繁衍适宜水文条件与适应阈值实验研究[D]. 郑州:华北水利水电大学.
- 易雨君, 2008. 长江水沙环境变化对鱼类的影响及栖息地数值模拟[D]. 北京:清华大学.
- 于信勇, 周长海, 2015. 拟赤梢鱼人工繁殖的初步研究[J]. 中国水产, (7):79-81.
- 岳兴建, 王芳, 谢碧文, 等, 2011. 沱江流域宽体沙鳅的胚胎发育[J]. 四川动物, 30(3):390-393.
- 张春光, 2016. 中国内陆鱼类物种与分布[M]. 北京:科学出版社.
- 张觉民, 1995. 黑龙江省鱼类志[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社.
- 张君, 2016. 鳙鱼的亲鱼驯养及人工繁育技术[J]. 河北渔业, (1):47-48.
- 郑葆珊, 黄浩明, 1980. 图们江鱼类[M]. 长春:吉林人民出版社.
- 中国水产科学研究院东海水产研究所, 1990. 上海鱼类志[M]. 上海:上海科学技术出版社.
- 朱松泉, 1989. 中国条鳅志[M]. 南京:江苏科学技术出版社.
- Abdusamadov A S, 1986. Biology of white amur, *Ctenopharyngodon idella*, silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*, and bighead, *Aristichthys nobilis*, acclimated in the Tersek region of the Caspian basin[J]. Journal of Ichthyology, 26(4):41-49.
- Andrés Ospina-álvarez, Palomera I, Parada C, 2012. Changes in egg buoyancy during development and its effects on the vertical distribution of anchovy eggs[J]. Fisheries Research, 117/118:86-95.
- Bagnold R A, 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics[R]. Washington D C: Geological Survey Professional Paper.
- Barros M D L C, Rosman P C C, 2018. A study on fish eggs and larvae drifting in the Jirau reservoir, Brazilian Amazon[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 40(2):1-16.
- Garcia T, Jackson P R, Murphy E A, et al, 2013. Development of a Fluvial Egg Drift Simulator to evaluate the transport and dispersion of Asian carp eggs in rivers[J]. Ecological Modelling, 263(5):211-222.
- George A E, Garcia T, Chapman D C, 2017. Comparison of Size, Terminal Fall Velocity, and Density of Bighead Carp, Silver Carp, and Grass Carp Eggs for Use in Drift Modeling[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 146(5):834-843.
- George G, Vethamony P, Sudheesh K, et al, 2011. Fish larval transport in a macro-tidal regime: Gulf of Kachchh, west coast of India[J]. Fisheries Research, 110(1): 160-169.
- Kocovsky P M, Chapman D C, McKenna J E, 2012. Thermal

- and hydrologic suitability of Lake Erie and its major tributaries for spawning of Asian carps[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 38(1):159–166.
- Kolar C S, Chapman D C, Courtenay Jr W R, et al, 2007. Big-headed Carps: A Biological Synopsis and Environmental Risk Assessment[M]. American Fisheries Society, Special Publication 33. Bethesda, Md. 226.
- Leslie Jr A J, Van Dyke J M, Nall L E, et al, 1982. Current Velocity for Transport of Grass Carp Eggs[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 111:99–101.
- Mariani P, MacKenzie B R, Iudicone D, et al, 2010. Modelling retention and dispersion mechanisms of bluefin tuna eggs and larvae in the northwest Mediterranean Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 86(1/2):45–58.
- Medley C N, Kehmeier J W, Myers O B, et al, 2007. Simulated Transport and Retention of Pelagic Fish Eggs during an Irrigation Release in the Pecos River, New Mexico[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 22(3):499–513.
- Murphy E A, Jackson P R, 2013. Hydraulic and water-quality data collection for the investigation of great lakes tributaries for Asian carp spawning and egg-transport suitability [R]. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Pierre P, Stephanie M H, Pascal L, 2006. One-dimensional bio-physical modelling of fish egg vertical distributions in shelf seas[J]. *Fisheries Oceanography*, 15(5):413–428.
- Rijn L C, 1984. Sediment transport, part II: suspended load transport[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11): 1613–1641.
- Simpson E H, 1949. Measurement of Diversity[J]. *Nature*, 163: 688.
- Stanley J G, Miley W W, Sutton D L, 1978. Reproductive Requirements and Likelihood for Naturalization of Escaped Grass Carp in the United States[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 107:119–128.
- Yih P, Liang T, et al, 1964. Natural conditions of the spawning grounds of the domestic fishes in Yangtze River and essential external factor for spawning[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 5(1):1–15.
- Zeng Q H, Hu P, Wang H, et al, 2019. The influence of cascade hydropower development on the hydrodynamic conditions impacting the reproductive process of fish with semi-buoyant eggs[J]. *Science of The Total Environment*, 689:865–874.

(责任编辑 万月华)

Review of Research on the Hydrodynamic Requirements for Sustained Drifting and Hatching of Buoyant Fish Eggs

ZENG Qing-hui¹, TANG Jia-xuan¹, HU Peng¹, YANG Ze-fan¹, LI Shuo², HOU Jia-ming¹

- (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R. China;
2. Inner Mongolia Chuo'er-to-Xiliao River Water Supply Limited Liability Company, Inner Mongolia Autonomous Region, Hinggan League 137400, P.R. China)

Abstract : Ascertaining the principles of fish egg movement in rivers is the basis for calculating the position of spawning grounds, managing the ecology of reservoirs and protecting fish resources. However, for species that release buoyant (drifting) eggs, the eggs will sink and perish if the hydrodynamic conditions are not sufficient to keep the eggs drifting. In this paper, we described the hatching and hydrodynamic requirements of fish species with buoyant eggs. First, relevant information on hatching characteristics such as spawning water temperature, spawning month and hatching duration of typical fish with buoyant eggs were obtained from the list of inland fish in China and ichthyology books covering major river basins in China. Then, we consulted relevant national and international literature and summarized research advances on the hydrodynamic conditions that are appropriate for drifting eggs. One view holds that sustained drifting of buoyant eggs depends on a minimum flow velocity, while the other holds that the key parameters controlling floating or sinking of buoyant eggs are turbulence or shear velocity. The key hydrodynamic conditions and threshold for hatching of buoyant eggs remain controversial, and the principles of buoyant egg motion needs further study. Finally, the current research methods for discerning the principles of buoyant egg motion in water were summarized and include mainly field observation, laboratory experiments and model simulation. Previous research added greatly to our understanding of the mechanisms of fish egg movement, but most studies focused on a single problem of egg motion using one experimental approach or model. The creation of hydrological conditions needed for egg hatching through ecological operation of water conservancy projects is a key research field for the future.

Key words : buoyant eggs; hatching characteristics; hydrological condition; ecological operation