



论中华鲟抢救性保护的途径

董芳^{1,2,3} 危起伟^{1,2}

(1. 武汉长江中华鲟保护中心, 武汉 430223; 2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 武汉 430223; 3. 贵州大学生命科学学院, 高原山地动物遗传育种与繁殖教育部重点实验室, 贵阳550025)

ON THE APPROACH OF RESCUING CONSERVATION FOR CHINESE STURGEON (*ACIPENSER SINENSIS* GRAY)

DONG Fang^{1,2,3} and WEI Qi Wei^{1,2}

(1. Center for Chinese Sturgeon Conservation, Wuhan 430223, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 3. Laboratory of Animal Genetics, Breeding and Reproduction in the Plateau Mountainous Region (Ministry of Education), College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China)



危起伟, 中国水产科学研究院长江水产研究所研究员, 博士生导师。现任世界鲟鱼保护学会(WSCS)理事, 中国动物学会/中国海洋湖沼学会鱼类学分会副主任委员。2022年5月发起成立武汉长江中华鲟保护中心。围绕多种珍稀特有鱼类的物种保护技术开展了系统研究, 特别是潜心研究中华鲟40年, 推动建立了我国珍稀水生动物的宏观政策和保护技术体系, 将有关研究成果应用推广至产业领域, 极大地推动了我国鲟鱼养殖产业发展及世界鲟渔业发展方式转型, 为我国濒危水生动物保护和产业发展做出了杰出贡献。主持了农业财政专项“长江渔业资源与环境调查”、973课题、自然科学基金面上、公益性行业(农业)科研专项等各类科研项目等。发表学术论文400余篇, 其中在《Cell》《Molecular Biology and Evolution》《Fish and Fisheries》等国际期刊发表论文200余篇, 主编专著7部, 获国家发明专利40余项, 以第一完成人获国家科技进步二等奖1项、湖北省科技进步奖2项和中国水产科学研究院科技进步一等奖2项, 获首届全国创新争先奖状等荣誉。

中华鲟(*Acipenser sinensis*)为我国国家一级重点保护动物, 是一种大型江海洄游性鱼类, 其成体可达4 m, 体重超700 kg, 寿命40龄以上, 历史上在长江中的洄游距离超2800 km, 因其独特的洄游特性而具有重要的生态价值、社会价值、科研价值和巨大的经济潜力(图1)^[1]。我国历来高度重视中华鲟的保护工作, 陆续采取了禁止商业捕捞、增殖放流、列入国家重点保护动物名录、建设自然保护区等多项措施^[1-4]。但遗憾的是, 由于多种人类

活动干扰的叠加和累积影响, 中华鲟物种衰退趋势始终未得到遏制。更严峻的是, 2017—2023年已连续7年未发现中华鲟自然繁殖活动, 其自然种群延续已面临严重困难。有研究认为, 如果现状无法改变, 中华鲟自然种群将在10—20年内灭绝^[5], 中华鲟是长江的旗舰物种和伞护种, 开展中华鲟抢救性保护工作是贯彻落实习近平总书记“共抓长江大保护”等重要指示精神的关键之举。当前, 凝聚共识、汇聚力, 多措并举开展中华鲟抢救性保护工

基金项目: 湖北省自然科学基金“杰出青年”项目(2022CFA058); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金(2022YJ12) [Supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province of China for Distinguished Young Scholars (No:2022CFA058); the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund(2022YJ12)]

作十分必要且紧迫。本文系统回顾了中华鲟生物学特性和保护措施、当前的生存困境及保护共识与实现路径并对后续研究和保护重点提出解决思路,为进一步实现中华鲟抢救性保护目标提供支撑。

1 生物学特性与保护措施回顾

中华鲟具有独特的生物学特性,是长江的旗舰种和伞护种^[1](图 1)。其主要分布于我国东南沿海大陆架水域和长江干流,在大海中生长,性成熟的个体(雄鲟8龄以上体长153—285 cm,雌鲟14龄以上体长212—321 cm),每年7—8月进入长江口,并溯河而上,葛洲坝截流以来,在葛洲坝以下910 km江段栖息,并于次年10月之前到达葛洲坝下产卵场附近江段(距长江口1678 km)^[2]。产卵活动一般在10—11月份,目前已知的唯一一处产卵场位置就位于葛洲坝下(长度约4 km)^[6]。产卵活动完成后,产后亲体一般迅速作降海洄游进入大海。受精卵则在坝下产卵场江段进行孵化,约5d孵化出膜,鲟苗随水流向河口迁移并索饵生长,一般于次年4—10月在长江口即出现7—38 cm的中华鲟幼鲟陆续进入海洋,它们主要在我国东南沿海大陆架水域进行索饵生长,直至性成熟再返回长江进行繁殖^[7]。亲鱼产卵后也会立即返回海洋^[8]。中华鲟寿命40龄以上,性成熟个体的繁殖间隔一般2—4年,其一生可繁殖5—8次^[8,9]。

我国历来重视中华鲟的保护,相关保护工作至今已持续60余年。早在20世纪50年代动议修建长江第一坝葛洲坝初期,毛泽东主席1964年曾指示:“兴建水利要三救,即救鱼、救船、救木”,此处救鱼的主要对象即包括中华鲟^[2]。在1970年代,因长江干流第一坝葛洲坝工程的兴建,原国家水产总局组织实施了“长江鲟鱼专项调查”研究。1982年,水利部成立了三三零水产处(后更名为中华鲟研究所),是我国首个因大型水利工程兴建而设立的珍稀鱼类科研保护机构^[1]。1982—1985年,开展了4年捕获中华鲟亲鱼过坝放库工作,共过坝40尾。1983年,禁止对中华鲟的商业捕捞利用^[10],1989年中华鲟被列为国家一级重点保护动物,2009年停止科研捕捞^[1]。国际上,1997年中华鲟被列入濒危野



图 1 中华鲟外部形态

Fig. 1 External form of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*

生动植物种国际贸易公约(Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, CITES)附录 II 保护物种^[1],2010年世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)将其升级为极危级(Critically Endangered, CR)保护物种^[1]。在关键栖息地保护方面,先后成立了3个中华鲟自然保护区,即长江湖北宜昌省级保护区(1996年)、江苏东台省级保护区(2000年,目前已经被撤销),以及上海市长江口保护区(2002年)^[11]。从20世纪80年代开始,我国还持续开展中华鲟人工增殖放流,截至2023年底已放流中华鲟超过800万尾。2009年和2012年,有关科研单位先后突破子二代中华鲟全人工繁殖技术,为全人工环境下的物种延续奠定了基础^[12,13]。

自2013年中华鲟自然繁殖活动出现首次中断后,中华鲟的物种保护工作得到更为空前的重视。2015年9月,农业部(现农业农村部)印发《中华鲟拯救行动计划(2015—2030年)》,这是我国首次针对一种鱼类制定国家级的保护行动方案^[3]。2018年3月,生态环境部等三部委印发《重点流域水生生物多样性保护方案》,其中8次提及中华鲟保护问题,明确要强化中华鲟就地保护工作^[14]。2018年9月,国办印发《关于加强长江水生生物保护工作的意见》,其中6次提及中华鲟的保护问题,再次强调要实施中华鲟抢救性保护行动^[15]。2021年1月1日开始实施的长江“十年禁渔”,更是一项保护中华鲟的有力举措^[16]。2024年3月,国办印发的《关于坚定不移推进长江十年禁渔工作的意见》,再次明确要有效推动落实中华鲟等珍稀濒危水生生物拯救行动计划,推进葛洲坝下中华鲟产卵场修复工程,开展与其生活史相适应的生态调度,努力重建野外自然种群^[17]。

60多年来,社会各界为保护中华鲟付出了大量努力,期间随着对中华鲟物种认识的不断深入和形势发展的不断变化,各种保护措施也在不断进行调整和优化。由于中华鲟独特的生物学特性,以及其生存环境整体形势的变化,中华鲟自然种群延续仍然面临巨大挑战。

2 对当前生存困境的共识

2.1 自然种群繁殖困难

无法自然繁殖导致中华鲟自然种群延续(即种群自我维持)面临严重困难(图 2)。(1)自然繁殖活动中断。自1981年长江干流首座大坝——葛洲坝阻隔其繁殖洄游通道以来,其目前唯一已知的产卵场仅有葛洲坝下一处,虽然年际间产卵活动规模大小有波动,但产卵活动一直艰难延续至2012年(共

32年), 2013年其自然繁殖活动出现首次中断, 随后2015年再次中断, 2016年仅发生小规模繁殖活动, 2017—2023年更是连续7年中断^[18–20]。(2) 自然繁殖群体持续衰退。20世纪70年代长江中繁殖群体数量据推测大约在1万尾左右^[21, 22], 在葛洲坝下产卵场江段, 80年代约为1000—2500尾^[23], 90年代约为400—700尾^[24], 20世纪初为200—400尾, 2009—2013年, 资源量继续下降到约200尾^[25], 2014—2016年, 仅约50尾^[1], 2017—2023年, 进一步减少到仅20尾左右^[26, ①]。并且繁殖群体性比严重失调, 性物质质量下降, 据2008年左右的观察, 中华鲟雌雄性比高达7:1, 严重偏离正常值1:1^[27]。(3) 产卵场环境条件持续恶化。自2003年三峡水利枢纽工程蓄水运行以来, 葛洲坝下中华鲟产卵场水温和水文节律发生明显改变, 繁殖季节“滞温”效应导致产卵活动推迟, 并且随着金沙江梯级水利工程的运行, 不利影响愈发明显^[28–30]。

2.2 人工群体保种困难

人工增殖放流作为缓解葛洲坝对中华鲟不利影响的主要保护措施之一, 其实施进展很大程度上取决于人工群体的保有和扩增情况, 但目前建设健康可持续人工群体并对自然种群形成补充面临较多难题。(1) 投入不足导致保种困难。中华鲟个体

硕大、性成熟晚, 需要偏低温的养殖水体, 因此人工群体保种难度较大, 比如需要较大的养殖水体、长期的养殖投入等, 并且由于其为国家一级重点保护动物, 商业利用未解禁, 完全依靠政府和公益性投入, 由于资金来源受限, 相关硬件条件不足, 人工群体建设总体还比较薄弱^[31]。(2) 后备亲体数量质量受限, 繁育能力不足。据不完全统计(2020年农业农村部资助项目调查数据), 全国共有人工保种野生中华鲟和10龄以上大规格后代3672尾, 其中野生种群(F0)199尾、10龄以上子一代(F1) 3120尾, 10龄子二代(F2) (2009年繁殖群体)353尾。由于受养殖条件等方面的限制, 每年性腺发育成熟可进行产卵繁殖的数量较少, 并且怀卵量仅为自然种群的约1/3至1/5, 再加之性腺发育状况欠佳, 后备亲体繁育能力总体还不足。(3) 种种原因, 亲体海水养殖尚未规模化, 可能是制约中华鲟“长不大”和繁殖力低下的重要原因^[31]。(4) 子代数量质量均不足^[31–33]。可繁亲本数量少导致子代遗传结构难以优化, 养殖空间受限导致大规模开展子代培育存在困难, 放流前野化驯养欠缺导致放流个体对自然环境的适应性差, 成活率低。截止2021年, 由于人工保种群体能够产出的中华鲟子代数量不足, 较低的放流数量难以对自然种群形成有效补充(图3)。

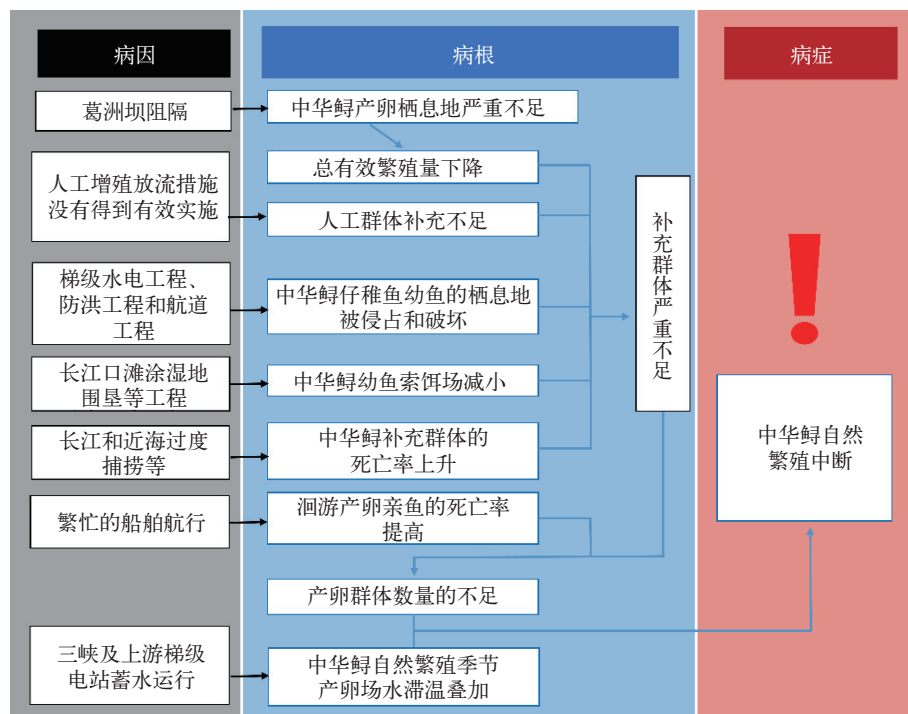


图2 中华鲟自然繁殖问题系统分析示意图

Fig. 2 Systematic analysis diagram of natural spawning problems of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*

① 中国水产科学研究院长江水产研究所未发表数据

3 保护共识与实现路径

在60多年的中华鲟保护实践和共抓长江大保护渐成共识的大背景下,各方对中华鲟物种保护工作的认识也不断深化,针对当前现状,主要形成三大保护策略,即扩增优化人工群体、提升增殖放流成效和改善栖息地环境。围绕这些共识,不同行业领域创新性地提出了多样化的实现途径。

3.1 扩增优化人工群体

中华鲟人工群体是中华鲟物种能够延续的物质基础,也是恢复其自然种群的希望所在。当前,尽最大努力实现人工群体规模的扩增是各界的普遍共识,2024年启动的中华鲟种源保护繁育基地认证工作,以及各级财政落实的中华鲟保种专项经费,将有力推动此项工作。在实现人工群体扩增的具体实施途径方面,有四点共识:一是对中华鲟人工群体遗传本底状况进行普查,查明现散布在25家相关机构中华鲟养殖群体的遗传谱系状况;二是基于遗传普查结果,充分利用现有人工群体资源开展家系繁育管理,增加遗传多样性;三是切实突破人工群体性物质数量质量瓶颈,据危起伟^[7]发现人工养殖中华鲟亲鱼怀卵量平均为13.43万粒,仅为原金沙江繁殖群体怀卵量64.5万粒的1/5,如需规模化开展育苗工作,提升亲本数量质量是有效途径;四是启动规模化中华鲟海水驯养,实现中华鲟“陆-海-陆”保种繁育,恢复中华鲟生物学特性,包括个体大小、性产物数量和质量,为中华鲟增殖放流提供足量优质种源。

3.2 提升增殖放流成效

目前普遍认同人工增殖放流是恢复中华鲟自

然种群的关键之所在。进一步提升增殖放流成效,核心在于增加放流数量、提高成活率,并且保留其能回归到产卵场繁殖的本能。为了实现这一目标,目前有以下五点普遍认同的共识:一是要尽可能扩大增殖放流规模至100—800万尾/年,并且主体放流60—180日龄的稚鱼或幼鱼(规格约20—40 cm),放流地点主要应在长江中游^[7,10];二是要基于中华鲟生活史特性开展人工增殖放流,放流个体应该与自然繁殖的苗种总体上同期入海,明确适宜的放流时间、地点、规格和数量;三是要系统开展标记放流效果评估,以PIT、CWT和分子标记相结合,研究推出中华鲟可追溯系统,实现放流中华鲟的全过程可追溯,并根据评估结果及时优化调整放流策略;四是要重视放流前的野化驯养工作,提高放流个体进入自然水域后的适应能力和存活率;五是可尝试开展性成熟中华鲟个体的规模化放流工作,如此既可以有望加速自然繁殖活动的恢复,还可以尽快查明性成熟个体对目前葛洲坝下产卵环境的适应性。

3.3 改善栖息地环境

在增加自然种群个体数量的同时,改善栖息地环境亦是当务之急。首要是改善葛洲坝下目前唯一已知产卵场的环境,要尽快研究通过三峡工程和金沙江梯级水利工程联合调度等措施,可将葛洲坝下江段水温水文节律,特别是自然繁殖期(10—12月)的水温,改善到何种程度,是否是中华鲟性腺发育和自然繁殖可接受的范围^[7,34]。二是要对长江口、中下游沿岸带生境条件进行修复,改善滞温效应等对饵料生物供给的影响,提高中华鲟子代存活率。中华鲟子代降河洄游在长江中虽然仅历时约

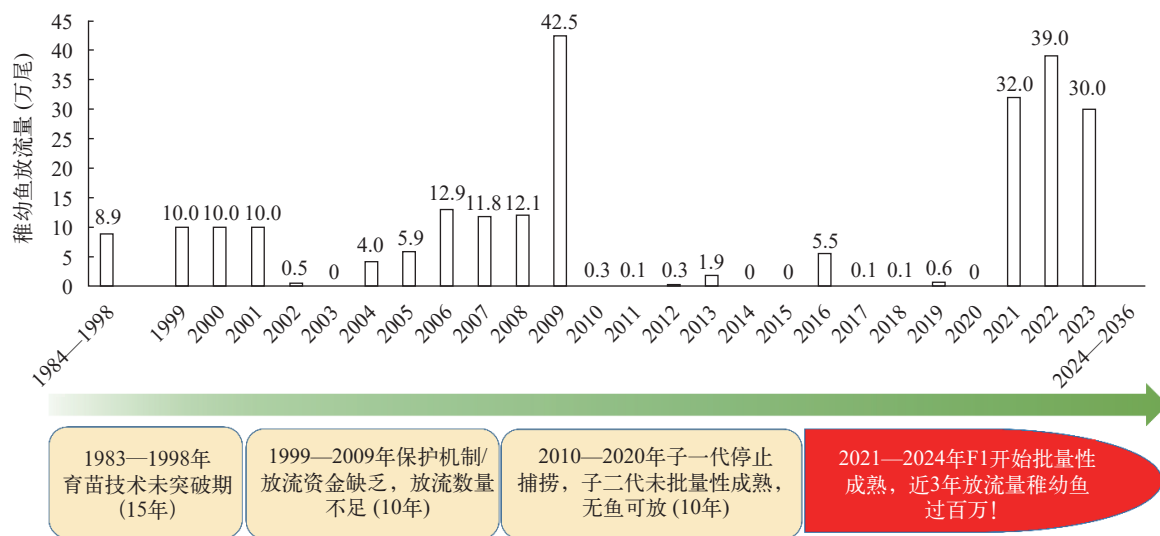


图3 中华鲟增殖放流历史

Fig. 3 Restocking program history of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*

6个月,但这却是保证其子代存活数量的关键时期。三是要改善近海中华鲟自然种群的生存条件,包括进一步降低捕捞等胁迫因素、丰富饵料生物资源等。

4 关键点与解决思路

4.1 创新人工群体扩繁机制

中华鲟性成熟晚,且具繁殖间隔,天然情况下其生活史各阶段成活率较低,如常剑波、黄真理等学者推算认为中华鲟从受精卵到能回归到产卵场进行繁殖亲体的比例约为三十万分之一^[10, 35]。因此想通过人工增殖放流恢复自然种群,所需放流数量巨大、并且持续时间长,如此则需要宏大的人财物等投入,仅依靠政府或公益性投入仍显不足。因此需做好政策设计,充分吸纳和调动民间资本参与中华鲟人工群体扩繁工作,研究中华鲟保护与利用机制,并研究开放商业化利用,形成各方都能有收益长期可持续的发展格局。

4.2 显著提升增殖放流的质与量

自然产卵群体数量过少和自然繁殖条件衰退是目前制约葛洲坝下中华鲟自然繁殖的主要瓶颈,恢复其自然繁殖的首要条件是恢复其自然种群数量。过去40年来,对给予高度期望的补偿中华鲟自然种群衰退的人工增殖放流措施没有得到科学有效的实施,存在的问题主要如下:首先,中华鲟初次性成熟时间晚是增殖放流难以短期见效的主要因素。中华鲟初次性成熟时间范围是8—26年(平均14.3年),意味着当年放流的幼鱼需要平均14年以后才加入到自然繁殖队伍中。其次是放流个体偏小和数量不足是前期放流效果不明显的原因。据危起伟^[7]介绍,1983—2018年实施人工增殖放流以来累计放流中华鲟712.81万尾,其中仔稚幼鱼总量712.49万尾,亚成体和成体3213尾。但在20世纪80年代初期没有突破苗种培育技术瓶颈,导致放流的主要是开口前后的仔鱼,总量达575.6尾,世界各地的放流实践证明由于其没有越过死亡高峰期,放流后的成活率极低,不推荐放流^[7, 36, 37]。而适宜放流规格的稚鱼和幼鱼的人工增殖放流数量仍然不足,36年间平均每年放3.51万尾,此数量相较于国外有效放流的同类规格低了1—3个数量级^[7, 38, 39]。最后是标记放流监测体系不健全是放流效果评价难以实施的主要原因。因此,在当前十年禁渔背景下,持续科学规范地加大中华鲟人工增殖放流数量,并建立全面系统的中华鲟人工增殖放流标记追溯体系来评估放流贡献,将成为中华鲟自然种群恢复和物种保护的关键措施。

4.3 营造适宜自然繁殖生境

恢复和维持中华鲟自然繁殖活动是延续中华鲟物种的根本。当前,除对葛洲坝下目前唯一已知产卵场进行修复和改良之外,寻找适宜可替代的产卵场也是当务之急,如危起伟提出以荆汉生态新水道工程为契机,利用虎渡河人工模拟建设中华鲟自然产卵场^[7],常剑波等在三峡大坝下开展中华鲟自然繁殖试验探索等(2023年9月23日武汉大学长江生态环境工程研究中心“受控条件下中华鲟自然产卵试验研究项目咨询会”会议材料,待发布)。当前,营造适宜自然繁殖生境应与人工增殖放流工作并行,或者放在更优先的位置,防止当前或后续出现有繁殖群体回归但无法自然繁殖的情况。

4.4 强化江海联动修复保护

在长江中下游干流和长江口水域,由于长江十年禁渔和长江大保护工作的持续推进,为中华鲟生存环境的改善创造了良好条件^[40]。但中华鲟一生约有90%的时间是在海洋中生活^[7],目前对其海洋生活史过程的了解却相对薄弱,如对中华鲟在海洋中生存、索饵、生长、栖息等状况还缺乏深入了解。要切实保护好中华鲟,改善其整个生活史过程所涉及空间范围内的生存条件都非常有必要,因此当前对其海洋生活史过程的研究要置于比较优先位置,以便为后续实施江海联动修复保护创造有利条件。

5 未来共同期盼

中华鲟的抢救性保护是一项宏大的系统工程,投入大且耗时长,需要多部门多行业和社会各界的共同参与。路虽远行则将至,事虽难做则必成。关于中华鲟的保护工作,不是一蹴而就,唯有坚定信心,凝心聚力,扎实推进,才能盼望未来中华鲟能重回长江母亲河。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Wei Q W, Du H, Zhang H, *et al.* Conservation biology of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [M]. Beijing: Science Press, 2019: 95-218. [危起伟, 杜浩, 张辉, 等. 中华鲟保护生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 95-218.]
- [2] Zhuang P, Zhao F, Zhang T, *et al.* New evidence may support the persistence and adaptability of the near-extinct Chinese sturgeon [J]. *Biological Conservation*, 2016(193): 66-69.
- [3] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The action plan for conservation of the Chinese sturgeon (2015-2030) [R]. http://www.cjyzbgs.moa.gov.cn/tzgg/201904/t20190428_6220349.htm. [农业部, 中华鲟拯救行动计划(2015-2030年), http://www.cjyzbgs.moa.gov.cn/tzgg/201904/t20190428_6220349.htm]

- cjyzbgs.moa.gov.cn/tzgg/201904/t20190428_6220349.htm.]
- [4] IUCN, 2022. The IUCN red list of threatened species. Version 2022-1[EB/OL]. <http://www.iucnredlist.org> (2022-09-25).
- [5] Huang Z L, Wang L H. Yangtze dams increasingly threaten the survival of the Chinese sturgeon [J]. *Current Biology*, 2018, **28**(22): 3640-3647.
- [6] Wang L H, Huang Z L. What is actually the main cause for the survival crisis of Chinese sturgeon? [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(4): 924-940. [王鲁海, 黄真理. 中华鲟(*Acipenser sinensis*)生存危机的主因到底是什么? [J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(4): 924-940.]
- [7] Wei Q W. Conservation of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) based on its life history: Dilemma and break through [J]. *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 [J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1297-1319.]
- [8] Chen X H. Biology and Resource Status of Acipenseriformes Fishes [M]. Beijing: Ocean Press. 2007: 95-102. [陈细华. 鲟形目鱼类生物学与资源现状 [M]. 北京: 海洋出版社. 2007: 95-102.]
- [9] The Yangtze Aquatic Resources Survey Group. The Biology of the Sturgeons and Paddlefish in the Yangtze River and Their Artificial Propagation [M]. Sichuan Scientific and Technical Publishing House, 1988. [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: 1-284 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1988: 1-284.]
- [10] Chang J B, Cao W X. History and prospect of conservation on Chinese Sturgeon in the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(6): 712-720. [常剑波, 曹文宣. 中华鲟物种保护的历史与前景 [J]. *水生生物学报*, 1999, **23**(6): 712-720.]
- [11] Xie P. Can we save the disappearing sturgeons in the Yangtze River? [J]. *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? [J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(4): 899-914.]
- [12] 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. [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.]
- [13] Wei Q W, Li L X, Du H, *et al.* Research on technology for controlled propagation of cultured Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, **20**(1): 1-11. [危起伟, 李罗新, 杜浩, 等. 中华鲟全人工繁殖技术研究 [J]. *中国水产科学*, 2013, **20**(1): 1-11.]
- [14] Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Water Resources, the People's Republic of China. Conservation Plan for Aquatic Biodiversity in Key River Basins [R]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5437798.htm. [生态环境部, 农业农村部, 水利部. 重点流域水生生物多样性保护方案 [R]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5437798.htm.]
- [15] General Office of the State Council, the People's Republic of China. Opinions on strengthening the protection of aquatic animals in the Yangtze River [R]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2018-10/15/content_5330882.htm. [国务院办公厅. 关于加强长江水生生物保护工作的意见 [R]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2018-10/15/content_5330882.htm.]
- [16] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Announcement on the scope and period of fishing ban in key waters of the Yangtze River Basin [R]. http://www.cjyzbgs.moa.gov.cn/tzgg/201912/t20191227_6334009.htm. [农业农村部. 农业农村部关于长江流域重点水域禁捕范围和时间的通告 [R]. http://www.cjyzbgs.moa.gov.cn/tzgg/201912/t20191227_6334009.htm.]
- [17] General Office of the State Council, the People's Republic of China. Opinions on unswervingly advancing the ten-year ban on fishing in the Yangtze River [R]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6940787.htm. [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 [R]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6940787.htm.]
- [18] Wu J M, Wang C Y, Zhang S H, *et al.* From continuous to occasional: small-scale natural reproduction of Chinese sturgeon occurred in the Gezhouba spawning ground, Yichang, China [J]. *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 [J]. *中国水产科学*, 2017, **24**(3): 425-431.]
- [19] Gao X, Lin P C, Li M Z, *et al.* Impact of the Three Gorges Dam on the spawning stock and natural reproduction of Chinese sturgeon in Changjiang River, China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, **34**: 894-901.
- [20] Gao X, Zhao Y H, Tian F, *et al.* Progress of monitoring and research of China Inland Sater Fish Biodiversity Observation Network [J]. *Biodiversity Science*, 2023, **31**: 23427. [高欣, 赵亚辉, 田菲, 等. 中国内陆水体鱼类多样性监测专项网的监测和研究进展 [J]. *生物多样性*, **31**: 23427.]
- [21] Huang Z L, Wang L H, Ren J Y. Study on the spawning population fluctuation of Chinese sturgeons around the closure of Gezhouba Dam [J]. *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 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2017, **47**(8): 871-881.]
- [22] Xu L X, Zhou L, Wei Q W. Stock status and conservation dilemma of species of Acipenseriformes in the Yangtze River and relevant suggestions [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(02): 62-72. [许兰馨, 周亮,

- 危起伟. 长江鲟类资源现状及保护 [J]. 水产学报, 2023, 47(02): 62-72.]
- [23] Ke F E, Wei Q W, Zhang G L, *et al.* Investigations on the structure of spawning population of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray) and the estimate of its stock [J]. *Freshwater Fisheries*, 1992, 4: 7-11. [柯福恩, 危起伟, 张国良, 等. 中华鲟产卵洄游群体结构和资源量估算的研究 [J]. 淡水渔业, 1992, 4: 7-11.]
- [24] Wei Q W. Reproductive behavioral ecology of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray) with its stock assessment [D]. Thesis for Doctor of Science. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. 2003: 12-56. [危起伟. 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估 [D]. 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 2003: 12-56.]
- [25] Tao J P, 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 [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 30(02): 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 [J]. 水生态学杂志, 2009, 30(02): 37-43.]
- [26] Yang H L, Shen L, He Y F, *et al.* Status of aquatic organisms resources and their environments in the Yangtze River system (2017-2021) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(2): 029301. [杨海乐, 沈丽, 何勇凤, 等. 长江水生生物资源与环境本底状况调查(2017—2021) [J]. 水产学报, 2023, 47(2): 029301.]
- [27] Wang H Z, Tao J P, Chang J B. Endangered levels and conservation options evaluations for Chinese Sturgeon, *Acipenser sinensis* Gary [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(09): 2100-2108. [王鸿泽, 陶江平, 常剑波. 中华鲟濒危状况与物种保护对策的评估分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(09): 2100-2108.]
- [28] Zhang H, Kang M, Wu J M, *et al.* Increasing river temperature shifts impact the Yangtze ecosystem: Evidence from the endangered Chinese sturgeon [J]. *Animals*, 2019, 9(8): 583.
- [29] Yu W G, Xia Z Q, Yu G R, *et al.* Water temperature variation in Three-Gorges Reservoir and its influences on procreation of Chinese sturgeons [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2007, 35(1): 92-95. [余文公, 夏自强, 于国荣, 等. 三峡水库水温变化及其对中华鲟繁殖的影响 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 92-95.]
- [30] Wu J M, Wang C Y, Zhang H, *et al.* Drastic decline in spawning activity of Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* Gray 1835 in the remaining spawning ground of the Yangtze River since the construction of hydrodams [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2015, 31(5): 839-842.
- [31] 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. [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.]
- [32] 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. [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.]
- [33] Liu J Y, Wei Q W, Du H, *et al.* Studies on promoted key technologies in artificial propagation of Chinese sturgeon [J]. *Journal of Economic Animal*, 2006, 10(2): 96-100. [刘鉴毅, 危起伟, 杜浩等. 中华鲟人工繁殖关键技术的改进效果研究 [J]. 经济动物学报, 2006, 10(2): 96-100.]
- [34] Zhang H. Abiotic environment for natural reproduction of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [D]. Thesis for Doctor of Sciences. Huazhong Agricultural University, Wuhan. 2009: 142-145. [张辉. 中华鲟自然繁殖的非生物环境. 博士学位论文, 华中农业大学, 武汉. 2009: 142-145.]
- [35] Huang Z L. Drifting with flow versus self-migrating—how do young anadromous fish move to the sea? [J]. *iScience*, 2019, 19(9): 772-785.
- [36] Khodorevskaya R P, Dovgopol G F, Zhuravleva O L, *et al.* Present status of commercial stocks of sturgeons in the Caspian Sea basin // Balon EK ed. Developments in Environmental Biology of Fishes [J]. *Berlin: Springer*, 1997, 17: 209-219.
- [37] Baker E A, Scribner K T. Cohort-specific estimates of first-year survival are positively associated with size at stocking for lake sturgeon *Acipenser fulvescens* (Rafinesque 1817) stocked in Black Lake, Michigan, USA [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2017, 33: 892-897.
- [38] Chebanov M S, Karnaukhov G I, Galich E V, *et al.* Hatchery stock enhancement and conservation of sturgeon, with an emphasis on the Azov Sea populations [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2002, 18: 463-469.
- [39] Ireland S C, Beamesderfer R C P, Paragamian V L, *et al.* Success of hatchery-reared juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) following release in the Kootenai River, Idaho, USA. *Journal of Applied Ichthyology*, 2002, 18: 642-650.
- [40] Zhao F, Zhuang P, Zhang T. Biology and Conservation of Chinese Sturgeon in the Yangtze Estuary [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 299-310. [赵峰, 庄平, 张涛. 长江口中华鲟生物学与保护 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 299-310.]