

中华鲟种质资源保护策略的思考

杜合军 王彬忠 刘娟娟 姜伟 李志远

REFLECTIONS ON THE CONSERVATION STRATEGIES FOR GERMPLASM RESOURCES OF CHINESE STURGEON (*ACIPENSER SINENSIS*)

DU He-Jun, WANG Bin-Zhong, LIU Juan-Juan, JIANG Wei, LI Zhi-Yuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2025.2024.0413>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

白龙岛海洋牧场放养中华鲟幼鱼的潜在饵料资源及承载力估算

ESTIMATION OF POTENTIAL BAIT RESOURCES AND CARRYING CAPACITY OF JUVENILE CHINESE STURGEON (*ACIPENSER SINENSIS*) IN BAILONG ISLAND MARINE RANCH

水生生物学报. 2023, 47(9): 1488–1496 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0329>

中华鲟的性腺发育与退化问题研究

DISCUSSION ON THE GONADAL DEVELOPMENT AND DEGENERATION OF CHINESE STURGEON, *ACIPENSER SINENSIS*

水生生物学报. 2020, 44(6): 1369–1378 <https://doi.org/10.7541/2020.157>

不同饵料对子一代中华鲟产后亲鱼康复效果的影响

DIFFERENT DIETS ON THE POSTPARTUM RECOVERY OF THE OFFSPRING CHINESE STURGEON (*ACIPENSER SINENSIS*)

水生生物学报. 2024, 48(10): 1680–1687 <https://doi.org/10.7541/2024.2024.0050>

中华鲟精巢细胞系的建立和鉴定

ESTABLISHMENT AND CHARACTERIZATION OF A TESTICULAR CELL LINE FROM CHINESE STURGEON (*ACIPENSER SINENSIS*)

水生生物学报. 2023, 47(8): 1261–1268 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0139>

长江流域鱼类资源现状与保护对策

SITUATIONS AND CONSERVATION STRATEGIES OF FISH RESOURCES IN THE YANGTZE RIVER BASIN

水生生物学报. 2019, 43(S1): 144–156 <https://doi.org/10.7541/2019.177>

海淡水养殖中华鲟免疫特性的比较

COMPARISON OF IMMUNE CHARACTERISTICS OF CHINESE STURGEON CULTURED IN SEA AND FRESH WATER

水生生物学报. 2023, 47(8): 1335–1341 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0129>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

综述

doi: 10.7541/2025.2024.0413

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0413

## 中华鲟种质资源保护策略的思考

杜合军<sup>1,2</sup> 王彬忠<sup>1,2</sup> 刘娟娟<sup>1,2</sup> 姜伟<sup>1,2</sup> 李志远<sup>1,2</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 宜昌 443100; 2. 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 宜昌 443100)

**摘要:** 全球正经历着由人类活动导致的第六次生物大灭绝, 鱼类多样性也正面临严重威胁。中华鲟是我国特有的大型海河洄游性鱼类, 已极度濒危, 正面临野外灭绝的风险。生物多样性保护的本质是种质资源的保护, 如何保护中华鲟现有的种质资源, 已经成为当前一个重大挑战。文章系统概述了中华鲟种质资源保护的历程和现状, 围绕野外就地保护、活体养殖保护和离体种质资源保护三个方面, 阐述了系统的保护策略与行动方案, 并探讨了当前迫切的行动需求及未来保护的发展方向。

**关键词:** 种质资源; 生物多样性; 保护策略; 行动方案; 中华鲟

**中图分类号:** S937 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)01-012509-12



种质(Germplasm)是决定遗传性状并将遗传信息传给后代的遗传物质, 是生物多样性构成的最基本组分。种质资源(Germplasm resources)又称遗传资源(Genetic resources)或基因资源(Gene resources)是遗传物质的总和, 可以是群体、个体、器官、组织、细胞或基因片段<sup>[1]</sup>, 一个物种就是一个遗传资源库或叫基因库。种质资源是支撑国民生产、人民生活和社会科技活动的重要基础, 已作为国家的重要战略资源, 其拥有量和研发利用程度现已成为衡量一个国家可持续发展能力和综合国力的重要指标<sup>[2, 3]</sup>。鱼类种质资源不仅是生态系统结构和功能的关键组成部分, 也是水产种业和养殖业的遗传材料。

中华鲟(*Acipenser sinensis*)是一种大型海河洄游性鱼类, 分布于我国沿海大陆架及入海河流。它在江河上游产卵, 在大海中育肥, 对海河之间的物质和能量交换具有重要作用。鲟形目鱼类是一种较为古老的类群, 它们曾与恐龙共存于同一时代。鲟形目鱼类的身体特征包括五列骨板、软骨和歪尾, 它们保留了许多原始特征, 因此成为了物种演化和地质变迁研究的重要模型物种。中华鲟曾经是一种重要的渔业资源, 民间有“千斤腊子, 万斤

象”的说法, 其中“千斤腊子”指的就是中华鲟, 它们最大可以长到4—5 m, 体重近500 kg。它们的肉质鲜美, 鱼籽可用于制作鱼籽酱, 骨骼富含软骨素, 具有药用价值; 鱼膘可用于制作明胶; 鱼皮可用于制革。因此, 中华鲟是一种集生态、科研、食用、药用及文化等价值于一身的重要物种<sup>[4, 5]</sup>。20世纪80年代前, 中华鲟资源量丰富, 长期作为长江沿岸渔民的重要捕捞对象。然而, 在过去40年中, 华鲟种群数量急剧下降, 已极度濒危。1988年被列为国家一级保护动物, 2010年被世界自然保护联盟(IUCN)评估为极度濒危物种(CR)<sup>[6]</sup>。

在当前全球背景下, 我们正面临第六次生物大灭绝的威胁, 生物多样性遭遇了前所未有的危机<sup>[7, 8]</sup>。在地球历史上, 虽有五次大规模的物种短期内灭绝事件, 但这些灭绝事件之后往往伴随着新物种的大量分化与形成。但目前正在发生的第六次大灭绝呈现出新的趋势: 物种灭绝的速度远远超过了新物种形成的速度, 这一现象主要是由人类活动引起的, 且这种趋势仍在加速<sup>[9]</sup>。与陆生动物相比, 水生生物的多样性更容易遭受威胁。在全球约30000种鱼类中, 大约10%已经处于濒危灭绝状态, 尤其是淡水鱼类, 它们面临的威胁比海洋鱼类更为严重<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2024-10-20; 修订日期: 2024-12-27

基金项目: 湖北省自然科学基金创新群体项目(2024AFA036); 湖北省中央引导地方科技发展专项(2024CSA072)资助 [Supported by the Hubei Provincial Natural Science Foundation Innovation Group Project (2024AFA036); Hubei Province Central Guidance for Local Science and Technology Development Special Fund(2024CSA072)]

通信作者: 杜合军(1973—), 男, 博士, 正高级工程师; 主要从长江珍稀濒危鱼类种质资源保护研究。E-mail: duhejun21@126.com

我国生物多样性极为丰富, 同样水产种质资源丰富且分布广泛。但是, 在过去几十年里, 由于全球气候变化、社会经济发展、生态环境破坏、水质污染和过度捕捞等多种因素的共同影响, 许多物种濒临灭绝, 天然水域的鱼类种质资源急剧减少, 这进而影响了鱼类种质资源库的完整性和多样性<sup>[10]</sup>。长江曾经是3种鲟的栖息地, 但在2019年白鲟被宣布功能性灭绝<sup>[11]</sup>, 2022年长江鲟被评估为野外灭绝<sup>[12]</sup>, 而中华鲟也正面临着严峻的生存挑战<sup>[13-15]</sup>。

本文全面系统回顾了中华鲟保护的历史, 并针对目前中华鲟保护面临的新挑战, 提出了相应的保护策略和思考, 以期对未来中华鲟的保护工作提供参考。

## 1 中华鲟分布范围及其资源量变动

### 1.1 中华鲟分布范围的变动

中华鲟主要分布在海洋中沿海岸线的大陆架区域, 它们生活在水深不及200 m的水域。其分布范围从黄海的朝鲜半岛西部开始, 向东延伸至日本九州岛附近海域, 向南横跨台湾海峡, 最南可至海南的万宁海域<sup>[14]</sup>。相较于长江中的活动规律研究, 科学家们对中华鲟在海洋中的迁徙行为和生活习性的解析还不够深入, 其迁徙路线和行为模式仍然是待解之谜。历史上的记录显示, 中华鲟曾在黄河、长江、钱塘江、闽江及珠江的西江等江河中留下踪迹<sup>[5, 14]</sup>。然而, 除了已知的珠江和长江产卵场之外, 其他河流内中华鲟是否拥有产卵场或是独立的地理种群, 目前尚缺乏确凿的证据支持。此外, 学术界对秋季繁殖的长江中华鲟群体与春季繁殖的珠江中华鲟群体是否构成独立的生态类群或种独立种群仍存在争议。不幸的是, 自20世纪末以来, 分布于珠江水系西江的中华鲟群体已经消失, 这使得对这一问题进行深入研究变得更加困难。中华鲟在长江中的产卵场原本分布于长江中上游600多公里范围内19处, 但现在已经减少到仅剩葛洲坝下1处, 产卵场面积也缩减至葛洲坝截流前的不到1%<sup>[14]</sup>。

从历史的角度来看, 中华鲟的分布范围呈现出明显的缩减趋势。这种缩减不仅意味着适应不同繁殖条件的群体数量减少, 也伴随着遗传多样性的降低, 进而影响到中华鲟种群的长期生存和适应性潜力。

### 1.2 近50年长江中华鲟洄游繁殖群体的资源状况

作为长江生态系统的旗舰物种, 中华鲟的种群数量持续下降, 已成为长江生态保护面临的严峻挑战之一。在20世纪70、80年代, 每年洄游到长江中

繁殖的中华鲟数量大约在10000尾左右, 年捕捞量则大约在400—500尾, 捕捞重量约为60—75 t<sup>[5, 16]</sup>。自1981年葛洲坝截流以来, 中华鲟洄游繁殖群体数量从2176尾急剧下降, 到20世纪末已不足400尾<sup>[16, 17]</sup>。到2013年以后, 数量进一步降至100尾以下<sup>[18, 19]</sup>。在过去的5年中, 葛洲坝下游的中华鲟洄游群体已不足20尾, 且自2017年至2023年, 已经连续7年未监测到中华鲟的自然繁殖活动<sup>[15, 20, 21]</sup>。野外中华鲟洄游繁殖群体遗传多样性已降低至极低水平, 导致野生群体难以自我维持<sup>[20, 22, 23]</sup>。

### 1.3 人工养殖中华鲟群体资源状况

目前, 我国人工保种的子一代和野生中华鲟共计3319尾, 主要分布于全国25家养殖机构。然而, 与人工繁殖群体相比, 野生中华鲟资源显得尤为稀缺, 仅统计到199尾<sup>[15]</sup>。在这些野生个体中, 有97尾是通过采集江底的受精卵并经人工孵化获得的; 其余则是在长江口附近捕获的幼鱼。当前, 中华鲟人工养殖面临的挑战主要包括养殖环境的限制、频繁的疾病、个体体型普遍偏小及性成熟比例低等问题<sup>[14, 15, 24-28]</sup>。此外, 中华鲟养殖群体的遗传背景相对单一, 由于缺乏有效的遗传管理, 导致在中华鲟传代过程中遗传多样性严重丧失, 同时, 苗种的畸形率也有所增加<sup>[15, 18, 21, 28-31]</sup>。如果不加强中华鲟遗传多样性的科学管理, 将会无形中增加其近交衰退(Inbreeding depression)的风险, 最终将导致人工保种群体的崩溃。

## 2 中华鲟保护的重要事件与关注点

中华鲟保护工作引起重视起始于长江上葛洲坝的修建, 该工程截断了中华鲟的生殖洄游路线, 导致其产卵场规模急剧缩小, 对其生存造成了严重威胁。为了应对这一挑战, 政府、科研机构、社会团体和公众等多方迅速采取行动, 实施了一系列保护措施。重要事件见图1。

自葛洲坝建成以来, 对中华鲟的保护工作从未间断, 但这一物种的保护仍然面临诸多挑战。自1984年以来, 人工增殖放流工作已经持续了40余年, 累计放流的中华鲟数量超过800万尾<sup>[4, 15, 20, 28]</sup>, 这在一定程度上补充了中华鲟自然资源。然而, 野外中华鲟种群的快速衰退趋势仍未得到扭转。这意味着中华鲟的遗传多样性资源也随之迅速减少, 这是一个极其危险的信号! 针对当前的严峻保护形势, 确实需要对中华鲟保护的思路、策略和行动实践进行全面审视和调整。在此背景下, 关于中华鲟保护方面产生了较多的思考和讨论。主要关注点集中在以下方面:

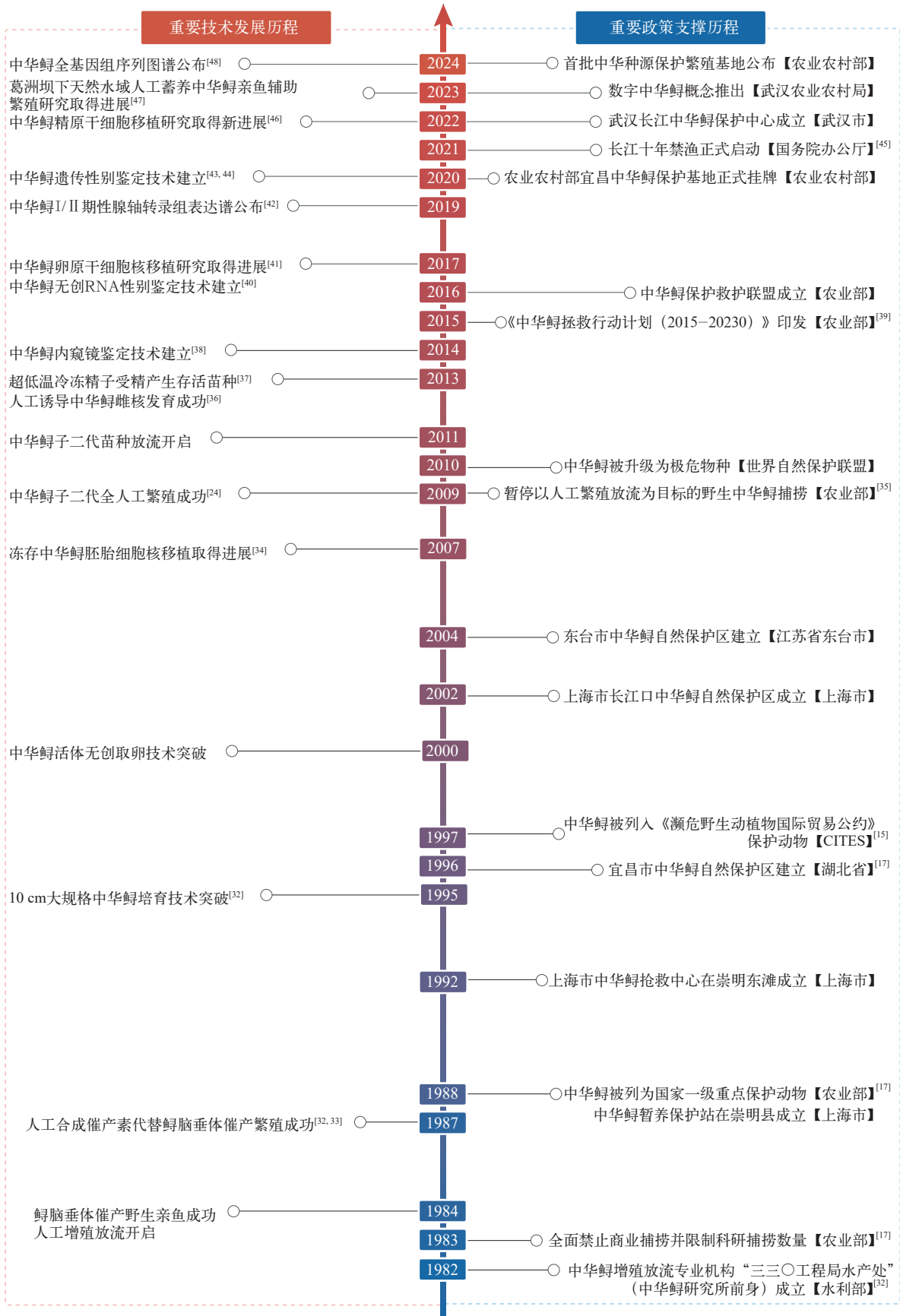


图 1 中华鲟保护技术研究和保护政策的重要事件

Fig. 1 The events of Chinese sturgeon technology research and conservation policy

(1)水利工程的影响: 葛洲坝和三峡大坝的建设和运营对中华鲟的自然繁殖和洄游路径产生了显著影响。具体来说, 葛洲坝的截流导致了中华鲟传统产卵场的丧失, 并且新形成的产卵场面积较小。同时, 梯级水电站的开发带来了一定程度的滞温效应, 也对中华鲟的繁殖周期造成了干扰<sup>[14, 17, 49, 50-52]</sup>。

(2)河床环境的变化: 三峡大坝蓄水导致水体含沙量减少, 河床冲刷加剧, 产卵场的细砂和粗砂区域面积减少, 河床卵石缝隙的堵塞度增加, 这些变化都不利于中华鲟的自然产卵<sup>[14, 52]</sup>。

(3)其他人类活动的影响: 捕捞及航道疏浚、航运、水质污染和城市景观建设等活动破坏侵占了中华鲟仔稚鱼的栖息地。长江口滩涂湿地的围垦导致幼鱼索饵场减小, 增加了中华鲟补充群体和繁殖群体的死亡率<sup>[4, 14, 17, 53-56]</sup>。

(4)人工增殖放流面临的挑战: 尽管人工增殖放流被认为是补偿自然种群下降的重要手段, 但其放流效果存在争议。因此, 需要科学且有效的实施方法, 以确保放流的中华鲟能够适应自然环境并提高成活率<sup>[4, 14, 17, 18, 20, 54]</sup>。

(5)中华鲟生活史的特殊性: 中华鲟的生命周期长, 从受精卵孵化到性成熟需要十多年时间, 这给种群恢复带来了更大的挑战<sup>[17]</sup>。

(6)中华鲟的生活史中海洋阶段研究不足: 除了繁殖期和幼鱼早期阶段在淡水中生活外, 中华鲟的其他时间都在海洋中度过。然而, 目前对中华鲟在海洋中生活史的研究还远远不够, 需要进一步加强这一阶段的研究和保护工作<sup>[14, 15, 21]</sup>。

(7)社会合力的缺乏: 中华鲟的保护需要政府、科研机构、社会团体及公众的共同努力。目前社会各方面的协同合力尚显不足, 需要进一步加大社会参与的力度<sup>[14]</sup>。

(8)保护策略系统性和科学性有待加强: 为了恢复中华鲟人工群体的自然生物学特征、增强人工增殖放流的科学性和效果、改善产卵场环境、新建旁通道和模拟自然产卵场环境, 以及修复索饵场等关键栖息地, 必须采取一系列综合且科学的措施, 这将有助于破解中华鲟保护的难题<sup>[14, 20, 52]</sup>。

这些关注点不仅展现了中华鲟保护工作的复杂性和紧迫性, 更是突显了野外种群保护任务的艰巨性。目前, 保护工作依然是聚焦于种群数量的增加, 而对于遗传多样性保护的关注不够<sup>[18]</sup>。此外, 保护行动方向也存在一定的不确定性<sup>[21]</sup>。中华鲟种群正面临数量急剧下降和遗传多样性快速丢失的双重威胁, 迫切需要明确的保护与增殖策略以及清晰的行动计划来确保其生存。基于此, 笔者对中

华鲟的保护策略及其实施路径进行了深入思考和系统梳理。

### 3 中华鲟种质资源保护策略及行动路径

种质资源保护包括种质的搜集、整理、鉴定、保护、保存及合理利用等环节, 涵盖了水产种质资源保护的全过程。遗传多样性指的是个体、种群内和种群间的遗传变异。种群是客观存在的生命群体, 而物种则是这些种群的集合, 共同构成了一个基因组库。遗传资源丰富度随着遗传多样性的增加而增加, 反之亦然。生物多样性包含三个层面: 物种水平以下的遗传多样性、物种水平的物种多样性, 以及物种水平以上的生态系统多样性<sup>[57]</sup>。这些层面的多样性最终依赖于遗传多样性。

种质资源保护的核心在于维护遗传多样性, 其目的是保持物种内的遗传变异水平和遗传结构, 以维持物种的自然繁殖能力和进化潜力。同时, 保护物种和种群的自然繁殖场所也是其重要组成部分。保护策略主要包括两种方式: 就地保护(*in-situ conservation*)和迁地保护(*ex-situ conservation*)。就地保护是指在生物的原始栖息地内实施生态系统和栖息环境的保护措施, 以此来保护生物群体和群落。这种保护方式属于群体层面的、动态的遗传保护, 也是保护工作追求的终极目标。迁地保护则是指在物种(种群)原栖息地之外的环境条件下, 对生物多样性的某些组成部分(如群体、家系、个体、器官或组织等)进行保护和保存<sup>[1, 57, 58]</sup>。迁地保护策略主要包括动态和静态两种方式: 动态保护是通过养殖或异地放养群体、家系或个体来实现; 静态保护则是通过冻存生物体部分(如细胞、组织或器官)来进行。迁地保护策略旨在为濒危动物提供适宜的栖息地和繁殖条件, 以野外种群为种源基础, 为保护工作提供扩繁所需的遗传资源。离体保护则确保种源的延续, 并为迁地动态保护和就地保护提供了备份的遗传资源(图2)<sup>[59, 60]</sup>。这些策略的实施在有效保护濒危动物、恢复种群及长期维持生物多样性方面发挥了重要作用, 对生态保护工作产生了积极的影响。

基于保护生物学的核心理念, 笔者对中华鲟的保护策略及其实施路径进行了梳理(图3)。

#### 3.1 中华鲟就地保护策略及措施

自葛洲坝修建之初, 就地保护策略就长期成为中华鲟保护工作的焦点, 并逐渐形成了一个较为全面的就地保护体系。总体来讲, 中华鲟的就地保护策略主要围绕以下7个方面展开:

(1)实施种群动态监测和评估: 不断提升监测技

术手段,对中华鲟的资源量、种群结构、生态环境以及外来物种干扰进行监测和评估。

(2)建设自然保护区:依据中华鲟自然生活史的关键阶段来确定保护区的规模和级别,并相应调整管理措施与执法力度,以减少人类活动的干扰(图 1)。

(3)修复关键栖息地:研究并应用生态修复技术,以改善中华鲟的产卵场和索饵场生态环境,包

括地形改良、实施生态调度和建设旁通道等措施,旨在提升自然繁育的规模和效果。

(4)实施人工增殖放流:通过利用野生及人工养殖的中华鲟亲鱼资源,优化人工繁育技术,扩大增殖放流的规模,并实施野化训练以提高放流中华鲟的野外生存能力,旨在恢复和增加野外种群数量(图 1)。

(5)建设保护联盟和救护网络:由行业主管部门牵头,联合相关机构和组织建立保护联盟,形成长江流域的联合保护机制。同时,建立高效的救护网络,以便于及时救治受伤的中华鲟(图 1)。

(6)实行政治和立法保护:国家及地方政府制定并实施相关法律法规,以确保大坝建设和运营中的中华鲟保护措施得到有效执行。这包括禁止商业捕捞和提升保护级别等措施(图 1)。

(7)开展公众科普教育与参与:提高公众对中华鲟保护的意识,鼓励社会各界参与保护工作。

中华鲟的就地保护策略已在先前的文献中得到了不同程度的讨论<sup>[4, 14, 17, 18, 20, 21, 35, 54, 56]</sup>,故此处不再赘述。

### 3.2 中华鲟活体养殖保护

由于目前尚未寻找到适合中华鲟这种海河洄游性鱼类的野外迁地生境,迁地保护策略主要依赖于人工养殖和繁殖保护(Conservation breeding)。

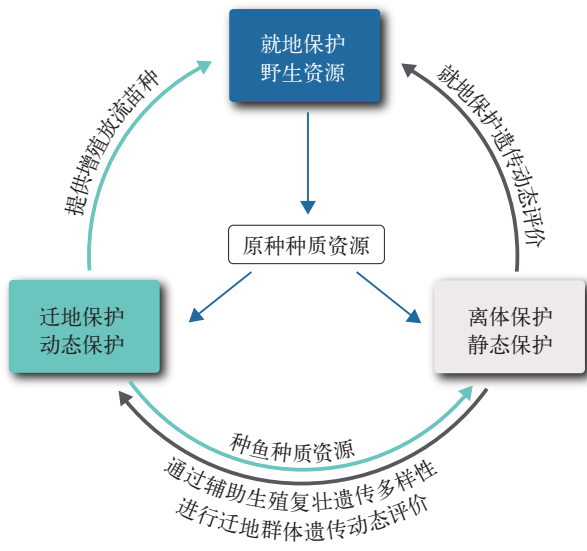


图 2 三种保护策略之间的关系

Fig. 2 The inter-relationship in the three conservation strategies

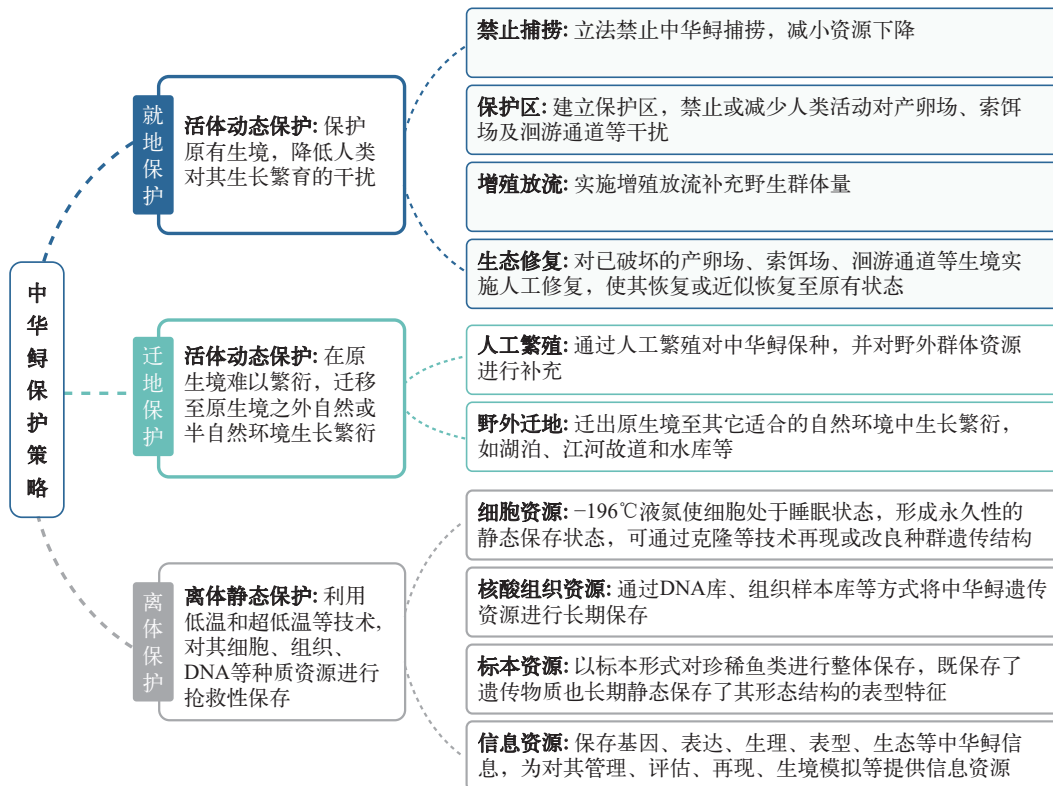


图 3 中华鲟保护主要策略及措施

Fig. 3 Strategies and measures for the conservation of Chinese sturgeon

繁殖保护,作为迁地保护的核心,旨在通过维持足够的群体数量来实现有效繁殖,确保动物能在数个世纪内健康生长发育。这一过程需要最大限度地保护动物的天然遗传多样性和进化潜力,以期它们最终能够重返自然生态系统<sup>[57]</sup>。繁殖保护的目的是在接下来200年内,维持现存群体至少90%的遗传多样性<sup>[63]</sup>。中华鲟具有很强的繁殖能力,每对亲鱼能产生数万甚至数十万的后代,这意味着养殖种群数量可以在一两代内迅速扩大到惊人的规模。然而,其遗传上的有效群体可能非常小,更容易发生近交衰退,因此,特别需要加强种群的遗传管理<sup>[64, 65]</sup>。

基于此,笔者提出以下行动策略,期望更加有效地管理中华鲟人工种群的种质资源:

(1)对中华鲟群体进行遗传学和种群统计学分析,以评估其当前状况和未来发展趋势。通过在形态、细胞、生理生化和分子等多个水平进行遗传多样性检测,建立遗传背景档案和详细的谱系记录,包括创始个体(Founders)对现有基因库的贡献<sup>[66]</sup>、遗传漂变导致的等位基因丢失<sup>[68]</sup>,以及群体内个体间的亲缘关系等<sup>[67-69]</sup>。基于这些数据,选择亲缘关系较远且具有繁殖能力的个体,以构建中华鲟的核心保护群体。

(2)在核心种群的构建和传代维持过程中,需要平衡家系群体的大小,控制群体的性别比例,并制定快速繁殖计划以增大种群规模<sup>[70]</sup>。同时,应科学安排每个个体的交配角色,以最大化保持群体的遗传多样性水平<sup>[71]</sup>。若有机会从野外引入种群,应尽快引入无亲缘关系的个体,以提升人工群体的遗传多样性,并促进不同养殖单位间的遗传资源交换,从而最大程度降低近亲繁殖的风险。

(3)科学规划保种群体的代时(Generation time)。代时,即指完成一代繁殖所需的时间跨度。在繁殖传代过程中,会丢失一些遗传多样性。当代与代之间的时间间隔最大化时,遗传多样性丢失的速率最低。考虑到中华鲟体型庞大,加之养殖场地和资源的限制,迁地保护难以维持较大的繁育群体。小群体更容易受到遗传瓶颈效应的影响,增加遗传漂变(Genetic drift)的风险,从而影响种群的遗传多样性和遗传结构的稳定性。通过延长中华鲟保种群体的繁殖代时,即增加繁殖时间间隔以降低繁殖传代频次,有助于维持遗传多样性<sup>[72]</sup>。因此,科学管理中华鲟核心保种群体的代时对于维持其遗传多样性具有重要意义。

(4)减少家养化(Domestication)对中华鲟保种群体的影响。家养化,是指动物在人工饲养条件下,

由于环境和选择压力的变化,导致其遗传和行为特征与野生种群产生差异的过程。家养化可能会影响物种的遗传多样性和适应性,因此,在迁地保护和人工养殖管理中,减轻家养化影响是一个需要重点考虑的方面。目前,中华鲟迁地保护群体主要依赖于人工养殖的方式。然而,人工养殖环境与自然环境在多个方面存在显著差异,这些差异包括水温、盐度、水流、光照等物理条件,以及天敌、食物、病害、配偶选择等生物因素。这些差异可能会导致后代在遗传多样性和适应性方面出现变化。因此,我们必须采取科学的管理措施,包括优化繁殖策略、控制养殖密度,以及模拟生活史各阶段的自然生态环境等,从而减轻家养化对中华鲟保护群体的不利影响。

此外,鉴于鲟形目鱼类均为多倍体,易于进行种间杂交,并且杂交后代具有繁育能力<sup>[73]</sup>,因此,必须制定一套全面而精细的种质评价标准,并建立严格的种质管控体系,以确保中华鲟保种群体的种质纯正性。

通过实施这些保护措施,可以在较大程度上维持中华鲟养殖群体的遗传多样性,为增殖放流和种群恢复提供坚实的种源基础。

### 3.3 中华鲟离体种质资源保存

活体养殖保护是一种直接保护物种免受灭绝威胁的有效方法,它为物种提供了在自然环境中放归、继续生存和繁衍的备份种源。然而,活体养殖保护难以完全避免家养化及小规模或隔离养殖群体所带来的问题,这些问题容易导致近亲繁殖和遗传漂变<sup>[58]</sup>,从而在传代过程中不可避免造成遗传多样性的丢失。针对中华鲟这种性成熟周期长、体型大、养殖周期长、养殖成本高的鱼类,以及它们经常会面临疾病暴发、养殖设施事故、自然灾害等多种风险,研发种质资源保存和物种保护的新技术显得尤为重要<sup>[74]</sup>。

离体种质资源保存是迁地保护的另一种形式,与传统的活体养殖保种方式不同,它属于静态保存方法,依赖于超低温冻存技术和现代生物技术来实现遗传资源的长期保护。在-196℃的超低温条件下,生物的细胞、组织、器官、胚胎乃至整个个体的代谢活动可以完全停止,从而实现遗传多样性的长期保存,这种保存可以跨越数个世纪甚至更长时间<sup>[34]</sup>。这一技术对于鱼类种质资源的保护、遗传多样性的维持及遗传改良具有重要意义。建立精子库、细胞库或胚胎库可以有效避免濒危鱼类因过度捕捞、生态破坏或环境污染而面临的物种灭绝或种质退化的风险<sup>[60, 75, 76]</sup>。随着基因组测序技

术的进步, 保存基因组信息的方法越来越受到重视。有学者提出了“数字诺亚方舟”倡议, 即通过构建濒危动物基因组的完整图谱, 保藏其完整的遗传信息, 借助合成生物学、基因编辑和克隆技术的发展, 为未来灭绝物种复活提供最后的契机<sup>[8]</sup>。

目前, 活体养殖保种仍然是遗传资源保护的主要方法。然而, 生物技术保种在维护原种遗传完整性方面展示出显著优势, 已经成为活体保种的有效补充和备份<sup>[59]</sup>。结合细胞冻存、克隆技术(图 4A)和借腹生殖技术(图 4B), 我们不仅增强了遗传资源保护的安全性和效率, 还为珍稀濒危鱼类种群的保护、遗传多样性的恢复, 以及水生生态系统的健康发展和可持续性提供了新的途径和手段<sup>[34, 76-79]</sup>。

鉴于有核细胞具有发育全能性, 保存一个细胞就等同于保存了整个个体的完整基因组<sup>[60, 77]</sup>。目前, 超低温冻存技术在保存中华鲟的精子、体细胞、原始生殖干细胞(Primordial germ cells, PGCs)和胚胎干细胞(Embryonic stem cells)方面已日益成熟<sup>[34, 79, 80]</sup>。利用这种技术构建中华鲟核心繁育群体的细胞库, 对于中华鲟遗传多样性保护及科学研究极为重要。

建立中华鲟的组织样本库、核酸库、标本库及生物信息数据库对于该物种的保护和研究具有重要意义。这些资源库在评估保种群体的遗传变异、实施家系遗传管理、监测野生种群的遗传动态, 以及评估增殖放流对野外群体的影响等方面都至关重要。同时, 这些资源库还能够保存不同群体的表型特征、遗传信息和环境数据, 为种质资源鉴定、遗传多样性评估及恢复提供支撑。此外, 这些

资源库也为利用合成生物学技术进行物种和种群恢复提供了可能。

农业部发布的《中华鲟拯救行动计划(2015—2030年)》明确指出了保护中华鲟的紧迫性和重要性, 并提出了包括建立遗传资源库在内的保护措施。虽然该计划强调了遗传资源保护的重要性, 但在离体种质资源库的建设及利用方面, 尚缺乏具体的行动方案。然而, 在“十四五”期间, 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所加快了珍稀特有鱼类种质资源库建设步伐, 建设成了包括标本库、组织样本库、精子库、细胞库和基因库等多种资源库。特别是在细胞库建设方面, 科研人员高度重视, 并已经成功分离并保存了中华鲟和长江鲟等多种濒危鱼类的胚胎细胞<sup>[81-83]</sup>。与此同时, 科研人员也完成了首个中华鲟全基因组测序工作<sup>[48]</sup>, 为推动中华鲟“数字诺亚方舟”计划迈出了坚实的一步。这些成果不仅有助于保护中华鲟的遗传多样性, 也为其他濒危物种的保护提供了重要的参考和借鉴。

#### 4 中华鲟保护面临的挑战与紧迫需求

尽管已经采取了多项保护措施, 但野外中华鲟的繁殖群体数量仍在持续减少, 目前已经达到濒临灭绝的边缘<sup>[14]</sup>。预计该物种可能在不久的将来面临野外灭绝的风险<sup>[14, 52]</sup>。因此, 迫切需要采取抢救性保护措施, 对仍具备繁殖能力的野生中华鲟实施人工繁殖和保护, 并优化及提升现有人工繁育保种群体的遗传多样性。目前, 我们面临的抢救性保护窗口期非常有限, 每延迟一年采取行动, 都将错失保护和保存现有资源遗传多样性的宝贵机会。

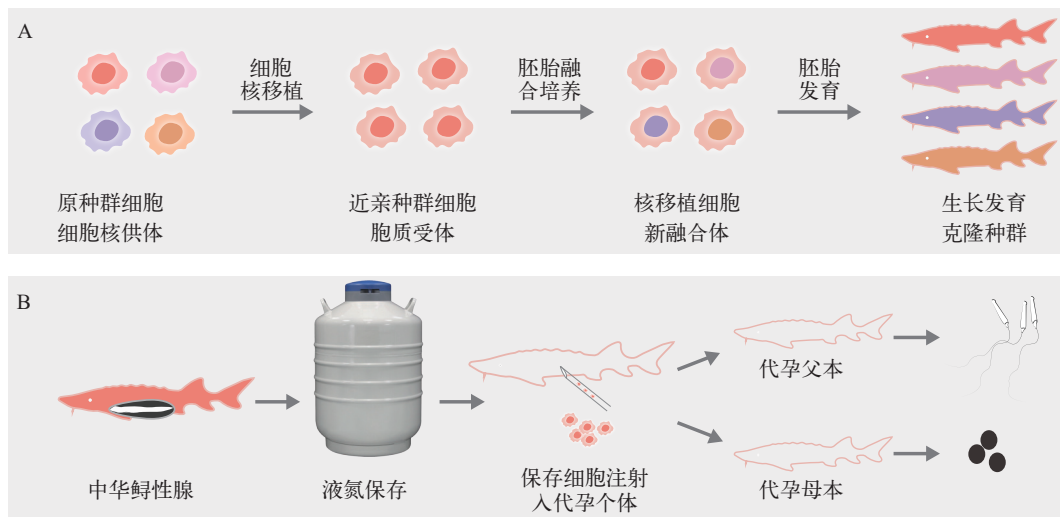


图 4 克隆技术和借腹生殖技术原理示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of cloning and surrogate reproduction technologies

A. 显示克隆生物技术示意图; B. 显示借腹生殖示意图

A. a schematic diagram of cloning technology; B. a schematic diagram of surrogate reproduction



活体养殖作为一种保护措施,对于濒危物种在短期内即可见效。目前中华鲟活体养殖主要在淡水人工环境中进行的。然而,有限的养殖空间和长期的淡水驯养可能会破坏动物避免近亲繁殖的自然选择机制,并可能导致家养化特征的出现,进而影响遗传多样性的维持。维持迁地种群遗传多样性并减少家养化的影响,是中华鲟保护工作中面临的一个重大挑战。为了有效保护中华鲟的养殖群体,迫切需要尽快建立统一的种质资源评估标准,并对养殖群体进行全面的调查,以明确家系并建立种群的管理档案。在此基础上,应基于核心种群制定繁育策略,平衡性别比例,平衡家系对后代的贡献率,控制繁殖代时间间隔,并维持等位基因和基因型频率<sup>[58]</sup>。在增殖放流苗种生产过程中,则可以采用混合交配制度以增加后代苗种的遗传多样性。未来的研究需要重视家养化产生的机理及其对中华鲟的影响,并探索减轻家养化影响的策略,例如通过模拟自然生活条件进行野化训练和淘汰,以提高增殖放流苗种的适应性。

离体种质资源的保存对于维持鱼类种质遗传多样性至关重要,它能够保持基因频率和基因型频率的稳定,以及遗传结构的完整性。然而,中华鲟离体种质资源的保存和利用面临多重挑战,其中包括冷冻和解冻过程中可能导致的细胞损伤,以及精子冻存后的复苏率低问题。此外,原始生殖细胞(PGCs)的保存技术要求较高,且目前分离得到的细胞数量有限,这些因素均增加了保存工作的难度。尽管八倍体物种中华鲟的全基因组测序取得了显著进展,但在T2T(Telomere to Telomere)基因组测序组装方面仍然面临巨大的挑战。有效保护中华鲟的遗传多样性关键在于强化核心亲本群体的细胞资源保存,尤其是对那些携带独特等位基因、基因型和表型的个体需要重点保护。需要加快对PGCs的分离、扩增及低温保存技术的研究。同时,需要推进体细胞培养和保存技术的发展,以及体细胞重编程的研究,为细胞资源在保护上的利用奠定技术基础。此外,还需攻关辅助生殖技术,如借腹生殖、不孕受体鱼制备和克隆技术的研究,并进行高精度的全基因组测序和组装(T2T),以获得更加完整和精准的基因组信息,支撑遗传管理和基因合成等保护技术的发展。

## 5 结论

中华鲟的种质资源保护是一项复杂和艰巨的任务,需要综合运用就地保护、活体养殖和离体种质资源保存等多种保护策略。就地保护的最终目

标是实现中华鲟种群自我维持,这一目标极具挑战性,因为它涉及的因素众多且野外条件难以控制。相比之下,通过传统养殖方法活体养殖保护,具有更强的操作性,更易产生直观的效果,但同时也面临需要解决遗传多样性的保持问题及家养化可能带来的不利影响。离体种质资源保存具有维持遗传多样性的完整性和实现长期保存的优势,但这也对现代生物技术的发展提出了更高的要求。这些策略的联合应用将为中华鲟保护工作提供一套较为系统的技术方案、行动计划及明确的实施路径。通过实施这些策略,我们有望有效保护现存的中华鲟群体种质资源,实现具有较高遗传多样性的苗种的可持续生产,并为野外种群的恢复奠定坚实的基础。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

## 参考文献:

- [1] Li S F. China's Freshwater Fish Germplasm Resources and Conservation [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1996: 7. [李思发. 中国淡水鱼类种质资源和保护 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 7.]
- [2] Li M L, Zheng X H, Wu B, *et al.* Advances and prospects in research on collection, preservation and sharing of aquaculture germplasm resources in China [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, 32(4): 78-82. [李梦龙, 郑先虎, 吴彪, 等. 我国水产种质资源收集、保存和共享的发展现状与展望 [J]. 水产学杂志, 2019, 32(4): 78-82.]
- [3] Liu H J, Song A H. Strengthen the protection and utilization of aquatic germplasm resources [J]. *China Fisheries*, 2020(9): 31-32. [刘洪军, 宋爱环. 加强水产种质资源保护利用 [J]. 中国水产, 2020(9): 31-32.]
- [4] 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. [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.]
- [5] Sichuan Province Yangtze River Aquatic Resources Investigation Group. The Biology of the Sturgeons in Changjiang and Their Artificial Propagation [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1988: 5-113. [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 [M]. 成都: 四川省科学技术出版社, 1988: 5-113.]
- [6] IUCN, 2010: IUCN red list of threatened species. Version 2010.3. Available at: <http://www.iucnredlist.org/apps/redlist/details/236/0> (accessed on 24 October 2010).
- [7] Frankham R, Jonathan D, Briscoe. Introduction to Conservation Genetics [M]. The Press Syndicate of the University Cambridge, 2002: 1-22.

- [8] Wei F, Huang G, Guan D, *et al.* Digital Noah's Ark: last chance to save the endangered species [J]. *Science China Life Sciences*, 2022, **65**(11): 2325-2327.
- [9] Cowie R H, Bouchet P, Fontaine B. The sixth mass extinction: fact, fiction or speculation [J]? *Biological Reviews*, 2022, **97**(2): 640-663.
- [10] Yang H S. Modern Fishery Science and Technology Innovation: Current Status and Prospects [M]. Beijing: Science Press, 2022: 10-17. [杨红生著. 现代渔业科技创新发展现状与展望 [M]. 北京: 科学出版社, 2022: 10-17.]
- [11] Zhang H, Jarić I, Roberts D L, *et al.* Extinction of one of the world's largest freshwater fishes: Lessons for conserving the endangered Yangtze fauna [J]. *Science of the Total Environment*, 2020(710): 136242.
- [12] IUCN, 2022. The IUCN red list of threatened species. Version 2022-1 [EB/OL]. <http://www.iucnredlist.org> (2022-09-25).
- [13] Dong F, Fang D D, Zhang H, *et al.* Protection and development after the ten-year fishing ban in the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(2): 029318. [董芳, 方冬冬, 张辉, 危起伟. 长江十年禁渔后保护与发展 [J]. 水产学报, 2023, **47**(2): 029318.]
- [14] Wei Q W. Conservation of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) based on its life history: Dilemma and breakthrough [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.]
- [15] Dong F, Wei Q W. On the approach of rescuing conservation for Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray) [J]. *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 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(9): 1610-1616.]
- [16] Ke F E. The protection and development of Chinese sturgeon [J]. *Freshwater Fisheries*, 1999, **29**(9): 3-7. [柯福恩. 论中华鲟的保护与开发 [J]. 淡水渔业, 1999, **29**(9): 3-7.]
- [17] 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.]
- [18] Yang H L, Yang H L. Suppressive and active protective actions in aquatic wildlife conservation [J]. *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 [J]. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 1-10.]
- [19] 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 [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.]
- [20] Liu H Z. Discussion on the conservation of Chinese sturgeon [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(9): 1603-1609. [刘焕章. 中华鲟物种保护的若干问题探讨 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(9): 1603-1609.]
- [21] Jiang W, Du H J, Chen P, *et al.* Process, difficulties, and directions of species conservation of Chinese sturgeon [J]. *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 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(9): 1617-1624.]
- [22] Zeng Y, Wei Q W, Wang D Q. The variation of genetic diversity of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Marine Sciences*, 2007, **31**(10): 67-69, 76. [曾勇, 危起伟, 汪登强. 长江中华鲟遗传多样性变化 [J]. 海洋科学, 2007, **31**(10): 67-69, 76.]
- [23] Shen Z Y. Study on population genetic diversity, breeding population size and breeding strategy of *Acipenser sinensis* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 81-90. [沈中源. 中华鲟群体遗传多样性、繁殖群体大小及繁殖策略研究 [D]. 中国科学院大学, 2020: 81-90.]
- [24] 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.]
- [25] Tian T, Zhang D Z and Du H J. Clinical diagnosis and treatment on main bacterial diseases in Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* [J]. *Fisheries Science*, 2018, **37**(6): 82-87. [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): 82-87.]
- [26] 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.]
- [27] 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.]
- [28] 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**(2): 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**(2): 62-72.]
- [29] Xiao K, Du H J, Zhao X, *et al.* Preliminary study on the genetic diversity of the MHC\_IIB gene in Chinese stur-

- geon [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(3): 76-86. [肖衍, 杜合军, 赵珣, 等. 中华鲟MHC\_IIB基因遗传多样性初步研究 [J]. 水生生态学杂志, 2018, **39**(3): 76-86.]
- [30] Yang J, Hu Y, Xiao K, *et al.* Transcriptome profiling reveals candidate cleft palate-related genes in cultured Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Gene*, 2018(666): 1-8.
- [31] Zhang L Z, Zhuang P, Zhang T, *et al.* On the differences of nostril and osseous plate between artificial and natural breeding juvenile *Acipenser sinensis* Gray [J]. *Marine Fisheries*, 2018, **40**(5): 560-568. [章龙珍, 庄平, 张涛, 等. 中华鲟幼鱼人工繁殖群体与自然繁殖群体鼻孔及骨板差异研究 [J]. *海洋渔业*, 2018, **40**(5): 560-568.]
- [32] Xiao H, Chang J B, Liu Y. Evaluation on status of artificial propagation and releasing of Chinese sturgeon in the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(6): 572-576. [肖慧, 常剑波, 刘勇. 中华鲟人工繁殖放流现状评估 [J]. 水生生物学报, 1999, **23**(6): 572-576.]
- [33] Xiao H. Research and exploration of Chinese sturgeon conservation [J]. *Three Gorges in China*, 2012(1): 22-29. [肖慧. 中华鲟保护研究探索历程 [J]. 中国三峡, 2012(1): 22-29.]
- [34] Yu L N, Wei Q W, Zhang F R, *et al.* Cryopreservation and nuclear transplantation of Chinese sturgeon's embryonic cells [J]. *Journal of fisheries of China*, 2007, **31**(4): 431-436. [余来宁, 危起伟, 张繁荣, 等. 中华鲟胚胎细胞的冷冻保存及其核移植 [J]. 水产学报, 2007, **31**(4): 431-436.]
- [35] 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.]
- [36] Du H J, Liu X Q, Chen L, *et al.* A method for inducing gynogenesis in Chinese sturgeon using homologous sperm: CN 106614116B [P]. 2020-4-4. [杜合军, 刘雪清, 陈磊, 等. 一种同源精子诱导中华鲟雌核发育的方法 [P]. 2020-4-4.]
- [37] Shu D B, Liu X Q, Zhang J M, *et al.* Insemination methods with cryopreserved Chinese sturgeon F1 sperm [J]. *Fisheries Science*, 2018, **37**(4): 484-487. [舒德斌, 刘雪清, 张建明, 等. 超低温冷冻保存中华鲟F1精子受精方法研究 [J]. 水产科学, 2018, **37**(4): 484-487.]
- [38] Du H J, Chen L, Liu X Q, *et al.* A method for rapid gender identification of Chinese sturgeon using endoscopy: CN114287378 B [P]. 2023-03-31. [杜合军, 陈磊, 刘雪清, 等. 一种利用内窥镜快速鉴定中华鲟性别的方法 [P]. 2023-03-31.]
- [39] 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](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), [http://www.cjyzbgs.moa.gov.cn/tzgg/201904/t20190428\\_6220349.htm](http://www.cjyzbgs.moa.gov.cn/tzgg/201904/t20190428_6220349.htm).]
- [40] Xiao K, Du H J, Hu Y C, *et al.* A pioneering approach for non-invasive sex identification of Chinese sturgeon at early stage [J]. *Aquaculture*, 2021(538): 736530.
- [41] Ye H, Li C J, Yue H M, *et al.* Establishment of intraperitoneal germ cell transplantation for critically endangered Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* [J]. *Theriogenology*, 2017(94): 37-47.
- [42] Du H J, Jian J B, Wang B Z, *et al.* Hypothalamus-pituitary-gonad axis transcriptome profiling for sex differentiation in *Acipenser sinensis* [J]. *Scientific Data*, 2019, **6**(1): 87.
- [43] Du H J, Hu Y C, Liu X Q, *et al.* A rapid method for identifying the genetic sex of Chinese sturgeon using a genomic sequence fragment ZHXF-2 and its application: CN113186300B [P]. 2022-03-2. [杜合军, 胡亚成, 刘雪清, 等. 一种快速鉴定中华鲟遗传性别的基因组序列片段ZHXF-2及应用 [P]. 2022-03-2.]
- [44] Hu Y C, Wang B Z, Du H J, *et al.* A rapid method for identifying the genetic sex of Chinese sturgeon using a genomic sequence fragment ZHXF-1 and its application: CN11316437B [P]. 2022-4-8. [胡亚成, 王彬忠, 杜合军, 等. 一种快速鉴定中华鲟遗传性别的基因组序列片段ZHXF-1及应用 [P]. 2022-4-8.]
- [45] 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](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](http://www.cjyzbgs.moa.gov.cn/tzgg/201912/t20191227_6334009.htm).]
- [46] Ye H, Takeuchi Y, Du H, *et al.* Spermatogonia from cryopreserved testes of critically endangered Chinese sturgeon efficiently colonized and preferentially proliferated in the recipient gonads of Yangtze sturgeon [J]. *Marine Biotechnology*, 2022, **24**(1): 136-150.
- [47] The Yangtze River Fisheries Research Institute of the Chinese Academy of Fishery Sciences. The natural water regulation and breeding experiment of Chinese sturgeon has made phased progress and passed expert acceptance [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2024, **51**(1): 67. [中国水产科学研究院长江水产研究所. “中华鲟天然水域调控繁殖试验”取得阶段性进展并通过专家验收 [J]. 水产科技情报, 2024, **51**(1): 67.]
- [48] Wang B Z, Wu B, Liu X, *et al.* Whole-genome sequencing reveals autooctoploidy in Chinese sturgeon and its evolutionary trajectories [J]. *Genomics, Proteomics & Bioinformatics*, 2024, **22**(1): qzad002.
- [49] 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 sturgeon [J]. *Journal of Hehai 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.]
- [50] Bi X, Tian Z F, Yang M F. Influence of different operation modes of Gezhouba Hydropower station on flow condition of Chinese sturgeon [J]. *Yangtze River*, 2016, **47**(17): 25-29. [毕雪, 田志福, 杨梦斐, 等. 葛洲坝电站运行对中华鲟产卵场水流条件的影响 [J]. 人民长江, 2016, **47**(17): 25-29.]
- [51] 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.]
- [52] Jiang W, Du H J, Chen P, *et al.* Process, difficulties, and directions of species conservation of Chinese sturgeon [J]. *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 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(9): 1617-1624.]
- [53] Cheng J C, Gao J, Liu J. Resource status of Chinese sturgeon and its protection countermeasures [J]. *Fishery modernization*, 2005(3): 3-4. [程金成, 高健, 刘健. 中华鲟资源现状及其保护对策探讨 [J]. 渔业现代化, 2005(3): 3-4.]
- [54] Wang J H, Wei Q W, Zou Y C. Conservation strategies for the Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*: an overview on 30 years of practices and future needs [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011(2): 176-180.
- [55] Huang Z L. A new method of estimation on populations of Chinese sturgeon in the Yangtze River by using existing fishing data [J]. *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 [J]. 科技导报, 2013, **31**(13): 18-22.]
- [56] Wang X, Wang H S, Zhang X F. From three sturgeons to the ecological protection of the Yangtze River [J]. *Journal of Central China Normal University* (Natural Sciences), 2020, **54**(4): 734-748. [王熙, 王环珊, 张先锋. 由长江中的三种鲟到长江水域生态保护 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, **54**(4): 734-748.]
- [57] Ji W Z, Su B. Principle and Methodologies of Genetic Diversity Studies [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 1999: 31-50. [季维智, 宿兵. 遗传多样性研究的原理和方法 [M]. 杭州浙江科学技术出版社, 1999: 31-50.]
- [58] Hedrick P W [A]/W V Holt, A R Pickard, J C Rodger, *et al.* (Eds.), *Reproduction Science and Integrated Conservation* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 97-113.
- [59] Chang H. *Animal Genetic Resources* [M]. Beijing: Science Press, 2009: 410-413. [常洪. 动物遗传资源学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 410-413.]
- [60] Chen S L. *Theory and Technology of Fish Sperm and Embryo Cryopreservation* [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2007: 1-12. [陈松林. 鱼类精子和胚胎冷冻保存理论与技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 1-12.]
- [61] Liao X L, Zhu B, Chang J B. Study on conservation of Chinese sturgeon [J]. *Yangtze River*, 2017, **48**(11): 16-35. [廖小林, 朱滨, 常剑波. 中华鲟物种保护研究 [J]. 人民长江, 2017, **48**(11): 16-35.]
- [62] 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**(9): 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**(9): 2100-2108.]
- [63] Tudge C. *Last Animal at the Zoo* [M]. Washington: Island Press. 1992.
- [64] Hedrick P W. *Application of Molecular Genetics to Conservation: New Issues and Examples* [M]/Beissinger R, McCullough D R (Eds.), *Population viability analysis*. Chicago, IL & London, UK: The University of Chicago Press. 2002: 367-387.
- [65] Jarić I, Riepe C, Gessner J. Sturgeon and paddlefish life history and management: Experts' knowledge and beliefs [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2018, **34**(2): 244-257.
- [66] Foose T J. *Species Survival Plans and Overall Management Strategies* [M]. *Tigers of the World: The Biology, Biopolitics, Management and Conservation of an Endangered Species*. Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1987: 304-316.
- [67] Thompson E A. Ancestry of alleles and extinction of genes in populations with defined pedigrees [J]. *Zoo Biology*, 1986, **5**(2): 161-170.
- [68] Ballou J D. *Calculating Inbreeding Coefficients from Pedigrees* [M]/Genetics and Conservation. Schonewald-Cox C M (Eds.), Benjamin/Cummings: Menlo Park, USA. 1983: 509-520.
- [69] Boyce A J. Computation of inbreeding and kinship coefficients on extended pedigrees [J]. *Journal of Heredity*, 1983, **74**(6): 400-404.
- [70] Deng X, Deng Z L. Progress in the conservation biology of Chinese sturgeon [J]. *Zoological Research*, 1997, **18**(1): 113-120.
- [71] Foose T J, Ballou J D. Population management: theory and practice [J]. *International Zoo Yearbook*, 1988(**27**): 26-41.
- [72] Conway W. The practical difficulties and financial implications of endangered species breeding programmes [J]. *International Zoo Yearbook*, 1986, **24**(1): 210-219.
- [73] Havelka M, Kašpar V, Hulák M, *et al.* Sturgeon genetics and cytogenetics: a review related to ploidy levels and interspecific hybridization [J]. *Folia Zoologica*, 2011, **60**(2): 93-103.

- [74] Ye H, Wang Y, Du H. *et al.* Establishment and characterization of a testicular cell line from Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(8): 1261-1268. [叶欢, 王艺舟, 杜浩, 等. 中华鲟精巢细胞系的建立和鉴定 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(8): 1261-1268.]
- [75] Chen S L. Progress in fish embryonic stem cell research [J]. *Chinese Journal of Aquatic Science*, 2000, **7**(4): 95-98. [陈松林. 鱼类胚胎干细胞研究进展 [J]. 中国水产科学, 2000, **7**(4): 95-98.]
- [76] Chen S L, Qin Q W. Fish Cell Culture: Theory and Techniques [M]. Beijing: Science press, 2011: 140-144, 161-165. [陈松林, 秦启伟. 鱼类细胞培养理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 140-144, 161-165.]
- [77] Chen H X, Yi Y L, Chen M R, *et al.*, Study on the developmental potentiality of cultured cell nuclei of fish [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1986, **10**(1): 1-7. [陈宏溪, 易永兰, 陈敏容, 等. 鱼类培养细胞核发育潜能的研究 [J]. 水生生物学报, 1986, **10**(1): 1-7.]
- [78] Feng X L, Lei A M, Yang C R, *et al.*, The progress and problem of inter-species nuclear transfer [J]. *Journal of Northwest A & F University* (Natural Science Edition), 2003, **31**(4): 200-204. [冯秀亮, 雷安民, 杨春荣, 等. 异种动物细胞核移植研究现状及相关问题的探讨 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, **31**(4): 200-204.]
- [79] Ye H, Wei Q W, Xu D D, *et al.* Progress and application prospect of germ cell transplantation technique in fish [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, **44**(2): 321-337. [叶欢, 危起伟, 徐冬冬, 等. 鱼类生殖细胞移植的研究进展及应用前景 [J]. 水产学报, 2020, **44**(2): 321-337.]
- [80] Ye X H, Liu H Q, Yu X M, *et al.* Preliminary research on tissue culture of Chinese sturgeon [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(6): 566-571. [叶湘辉, 刘汉勤, 俞小牧, 等. 中华鲟组织培养的初步研究 [J]. 水生生物学报, 1999, **23**(6): 566-571.]
- [81] Liu J, Wang B, Hu Y, *et al.* Germplasm rescue of post-mortem critically endangered yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*) by cell preservation [J]. *Aquaculture Research*, 2023, **2023**(1): 2472375.
- [82] Liu J J, Liu X Q, Zeng Q, *et al.* Establishment and characterization of a cell line derived from fin of the endangered Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*) [J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Animal*, 2020, **56**(8): 650-658.
- [83] Gong Z, Zhang Q, Liu J, *et al.* Establishment, characterization and application in germplasm conservation and disease resistance: An embryonic cell line from Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*) [J]. *Aquaculture*, 2023(575): 739807.

## REFLECTIONS ON THE CONSERVATION STRATEGIES FOR GERmplasm RESOURCES OF CHINESE STURGEON (*ACIPENSER SINENSIS*)

DU He-Jun<sup>1,2</sup>, WANG Bin-Zhong<sup>1,2</sup>, LIU Juan-Juan<sup>1,2</sup>, JIANG Wei<sup>1,2</sup> and LI Zhi-Yuan<sup>1,2</sup>

(1. Chinese Sturgeon Research Institute, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, China; 2. China Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes, Yichang 443100, China)

**Abstract:** The world is currently experiencing the sixth mass extinction caused by human activities, and the diversity of fish species is also facing a severe threat. The Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*), a large anadromous fish unique to China, is critically endangered and at risk of extinction in the wild. The essence of biodiversity conservation lies in the protection of genetic resources. How to protect the existing genetic resources of the Chinese sturgeon has become a significant challenge. This article systematically outlines the history and current status of Chinese sturgeon genetic resource conservation, and discusses systematic conservation strategies and action plans around *in situ* protection, live breeding, and *ex situ* genetic resource preservation. It also explores the urgent need for action and suggests future directions for conservation protection.

**Key words:** Gerplasm resource; Biodiversity; Conservation Strategy; Action plan; *Acipenser sinensis*