

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19259

濒危中华鲟人工群体的繁殖生物学

罗江, 杜浩, 危起伟, 张辉, 乔新美, 熊伟, 刘志刚, 冷小茜, 吴金平, 沈丽, 王成友, 吴金明, 张书环, 周琼, 刘源, 王科兵

农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 武汉 430223

摘要: 以 1998—2008 年孵出的子一代(F_1)中华鲟(*Acipenser sinensis*)为材料, 研究了人工养殖中华鲟的繁殖生物学特征。结果表明: 年龄 10~20 龄的 492 尾人工养殖子一代中华鲟体重为 30~169 kg, 体长为 140~258 cm, 肥满度为 0.77~1.26, 体长(L)与体重(W)之间的关系式为 $W=1\times 10^{-5}L^{2.9658}$ ($R^2=0.9076$, $n=492$)。74 尾中华鲟性腺发育成熟, 成熟比例为 15.04%, 成熟个体中雄鱼体重[(60.73±14.53) kg]和体长[(172.27±13.46) cm]均小于雌鱼体重[(88.39±29.14) kg]和体长[(193.37±18.90) cm]; 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。雄鱼催产成功率为 76.36%, 精子快速运动时间为(49.11±13.38) s, 精子寿命为(220.75±56.47) s; 雌鱼催产成功率为 57.89%, 产卵量为(13.43±6.79)万粒, 卵径(3.97±0.15) mm, 卵重(0.046±0.013) g, 受精率为(42.72±27.82)%, 孵化率为(51.61±32.41)%, 出苗量为(4.44±5.67)万尾。与野生中华鲟相比, 人工养殖中华鲟成熟个体体格、繁殖力和繁殖效果均有下降趋势, 人工保种面临挑战。

关键词: 中华鲟; 子一代; 人工养殖; 繁殖生物学

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)03-0269-08

中华鲟(*Acipenser sinensis*)是中国国家一级重点保护动物, 具有重大的生态价值、社会价值、科学研究价值以及巨大的经济潜力^[1]。由于水利工程建设、捕捞等人类活动的影响, 中华鲟自然资源急剧衰退, 已知的唯一产卵场(葛洲坝下产卵场)繁殖群体数量已不足 100 尾, 且出现自然繁殖中断的现象^[2], 其自然种群的存亡令人关注。大尺度的长江生态环境在短期内还无法恢复, 因此, 在人工养殖条件下实施迁地保护, 建立人工养殖群体, 开展增殖放流仍是中华鲟物种保护的必由之路^[3]。中华鲟具有个体大, 寿命长, 性成熟时间晚、周期间隔长等生物学特征, 且在海水中生长育肥, 淡水中产卵繁殖, 是一种大型溯河产卵洄

游型鲟鱼^[4], 其人工保种工作难度大, 需要持续的人力、物力的投入。

有关中华鲟繁殖方面的研究探索, 最早起始于 20 世纪 70 年代, 四川省水产调查组率先对金沙江江段的野生中华鲟进行催产并获得成功^[5]; 1983 年中国水产科学研究院长江水产研究所联合有关单位成功实现了葛洲坝下野生中华鲟的人工繁殖^[6]; 1997 年中华鲟规模化苗种培育技术突破后, 大规模的人工种群得以逐步建立^[7]; 2012 年中国水产科学研究院长江水产研究所首次突破子一代中华鲟的全人工繁殖^[7], 并于 2016 年实现了规模化全人工繁殖。经过 30 年的系统研究^[8-14], 中华鲟人工养殖群体已初具规模, 并形成一定年

收稿日期: 2019-08-29; 修订日期: 2019-11-16.

基金项目: 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室开放课题(LFBC0907); 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB150702); 农业农村部长江流域渔政监督管理办公室修复向家坝库区渔业资源及保护长江珍稀特有物种合作项目(F12); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2019ZD03); 国家自然科学基金面上项目(31772854).

作者简介: 罗江(1988-), 男, 助理研究员, 研究方向为濒危鱼类保护. E-mail: luojiang@yfi.ac.cn;

杜浩(1981-), 共同第一作者, 男, 研究员, 研究方向为濒危鱼类保护. E-mail: duhao@yfi.ac.cn

通信作者: 危起伟, 研究员, 研究方向为鱼类生态与资源保护. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

龄梯队,目前主要集中于湖北,在北京、上海、山东、福建、广东和四川等地有零星分布,在北京、香港、宁波等地的海洋馆也有少量养殖。现有的养殖方式主要有流水养殖、循环水养殖和网箱养殖等。

本文以 1998—2008 年孵出的子一代中华鲟为研究材料,研究了人工养殖中华鲟的繁殖生物学特征,并对中华鲟全人工繁殖技术进行了系统总结,以期为今后中华鲟规模化繁殖和可持续保种提供基础数据与科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼来源

实验所用中华鲟来自中国水产科学研究院长江水产研究所通过野生中华鲟人工繁殖的子一代,孵出年份为 1998—2008 年(2002 年除外),实验前,已在人工养殖条件下经过 10~20 年的培育,分别饲养于荆州太湖基地、恒升基地、襄阳基地和北京海洋馆等 4 个基地的 6 种不同形状和规格的养殖池内。

1.2 养殖环境

不同基地的养殖条件如表 1 所示。太湖基地位于荆州市荆州区八岭山镇后湖畔,养殖池规格为(12~16) m×1.8 m (直径×深)的圆形池和 36 m×12 m×3.5 m (长×宽×深)的椭圆形池,采用湖水和地下水养殖;恒升基地位于荆州市荆州区小北门外庙湖畔,养殖池规格为 38 m×3.5 m (直径×深)的圆形池,采用湖水养殖;襄阳基地位于襄阳市谷城县前进水库下方,养殖池规格为 25 m×2 m

(直径×深)的圆形池和 20 m×13 m×3.5 m (长×宽×深)的椭圆形池,采用水库表层和底层混合水养殖;北京海洋馆养殖池规格为 29 m×11 m×4.4 m (长×宽×高)的方形池,采用恒温循环水养殖(表 1)。投喂自制的配合饲料,日投喂量为 0.4%~0.6%,各基地水温周年变化见图 1。

1.3 体检

2012—2018 年,在每年的 4—5 月和 9—10 月,对不同养殖基地子一代中华鲟进行两次体检,测量体重、体长等基本生物学数据,采用 Du 等^[11]的方法,利用 Terason2000 便携式彩超仪判定性别及性腺成熟度,对子一代中华鲟性腺发育实施连续监测。

1.4 人工催产、授精及孵化

2012—2018 年,在每年 10—11 月,水温 17.5~20.5 ℃,对性腺发育成熟的子一代中华鲟实施人工催产,催产药物为 LRHA-2 (宁波第三制药厂生产),雄鱼采取一针注射,剂量为 4~5 μg/kg,雌鱼采取两针注射(个别采取三针注射),第一针剂量为 0.5~1.0 μg/kg,第二针剂量约 9 μg/kg,中间间隔 12~14 h,在实际催产过程中根据亲鱼性腺成熟度适当调整剂量。效应时间后,采用腹部挤压法采集精子和卵子,精子每隔 2 h 采集一次,共采集 4~5 次,用保鲜袋充氧保存于 0~4 ℃冰箱,根据 Alavi 等^[16]的方法统计精子剧烈运动时间、快速运动时间和精子寿命,挑选活力最好的精子用于人工授精;卵子一般 1 次采完,个别需采集 2 次(中间间隔 1~2 h)。采用干法进行人工授精,受精卵经黄泥浆或滑石粉脱黏约 45 min,用瓶式孵

表 1 中华鲟不同基地的养殖条件
Tab. 1 Breeding conditions at different farms for *Acipenser Sinensis*

地点 place	池编号 tank number	池形状 tank shape	池规格/m tank size	养殖密度/(kg/m ³) stocking density	水温/℃ water temperature
北京海洋馆 Beijing Aquarium	BJ	方形 rectangle	29×11×4.4	2~3	19~22
襄阳基地 Xiangyang Farm	XY-1	圆形 roundness	25×2	3~4	7~25
	XY-2	椭圆形 oval	20×13×3.5	2~3	
太湖基地 Taihu Farm	TH-1	圆形 roundness	(12~16)×1.8	7~9	8~29
	TH-2	椭圆形 oval	36×12×3.5	4~5	13~23
恒升基地 Hengsheng Farm	HS	圆形 roundness	38×3.5	3~4	8~31

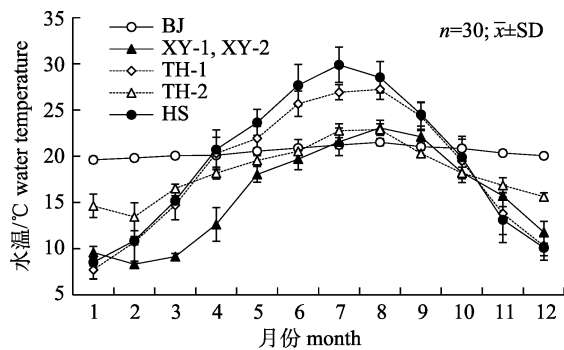


图 1 各养殖池水温周年变化
Fig. 1 Annual variation of water temperatures at different tanks

化器或孵化框孵化, 孵化水温为 18.0~20.0 ℃。

1.5 数据统计和分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据统计和分析, 按照以下公式计算:

体长与体重关系式: $W=aL^b$

肥满度 $=(W/L^3) \times 100\%$

催产率=产卵(精)亲鱼数量/雌(雄)亲鱼总数量 $\times 100\%$

受精率=受精卵数量/产卵总数量 $\times 100\%$

孵化率=出苗数量/受精卵数量 $\times 100\%$

其中, W 是体重(kg), L 是体长(cm), a 和 b 为常数, 胚胎发育至原肠期开始统计受精率。

2 结果与分析

2.1 人工养殖中华鲟生物学特征

2.1.1 体长与体重 共获得了 492 尾 10~20 龄子

一代中华鲟的生物学数据, 体重 30~169 kg, 体长 140~258 cm, 肥满度 0.77~1.26 (1.01 ± 0.10)。随着年龄的增长, 中华鲟的体长和体重均不断增长, 19 龄和 20 龄的中华鲟体长和体重均不存在显著差异($P>0.05$)。肥满度呈现逐渐上升的趋势, 随着年龄增大逐渐出现显著差异($P<0.05$)(表 2)。体长(L)与体重(W)之间的关系式为 $W=1 \times 10^{-5} L^{2.9658}$ ($R^2=0.9076$, $n=492$), 式中 $b<3$, 说明人工养殖中华鲟呈负异速生长(图 2)。

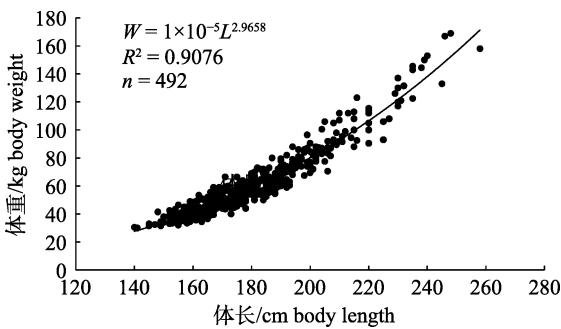


图 2 人工养殖子一代中华鲟体长与体重的关系
Fig. 2 Relationships between body length and body weight of cultured *Acipenser sinensis* of the first generation

2.1.2 性成熟 492 尾子一代中华鲟中, 仅 74 尾性腺发育成熟, 成熟比例仅有 15.04%, 其中雌鱼 19 尾, 雄鱼 55 尾, 雄鱼性成熟最小年龄为 10 龄, 平均为(14.96 ± 1.93)龄, 雌鱼性成熟最小年龄为 12 龄, 平均为(17.84 ± 1.80)龄。不同年龄阶段性成熟比例见图 3, 由图可知不同年龄段的雌鱼成熟

表 2 人工养殖子一代中华鲟不同年龄阶段体长和体重
Tab. 2 Body length and weight of cultured *Acipenser sinensis* of the first generation at different ages

年龄/a years of age	统计数量/ind statistical magnitude	体长/cm body length		体重/kg body weight		肥满度 condition factor	
		$\bar{x} \pm SD$	范围 range	$\bar{x} \pm SD$	范围 range	$\bar{x} \pm SD$	范围 range
10	79	165.35±12.53 ^f	141–191	44.77±10.24 ^f	30–68	0.98±0.10 ^b	0.80–1.11
11	72	167.78±9.93 ^f	150–191	46.70±7.58 ^f	32–69	0.98±0.08 ^b	0.81–1.18
12	66	169.52±11.14 ^f	152–207	48.46±10.02 ^f	33–87	0.99±0.11 ^b	0.77–1.22
13	68	176.32±14.32 ^e	152–211	56.04±13.24 ^e	35–93	1.01±0.10 ^{ab}	0.78–1.22
14	36	181.69±12.01 ^{de}	155–225	60.31±10.38 ^{de}	44–96	1.00±0.10 ^{ab}	0.87–1.25
15	47	185.34±12.45 ^d	161–221	65.47±13.20 ^d	41–99	1.02±0.10 ^a	0.83–1.18
17	69	190.83±15.38 ^c	161–230	73.05±16.31 ^c	47–117	1.04±0.10 ^a	0.90–1.26
18	21	197.65±21.28 ^b	170–258	86.61±27.34 ^b	54–158	1.05±0.10 ^a	0.89–1.23
19	16	211.63±13.84 ^a	189–235	112.56±26.99 ^a	77–167	1.07±0.06 ^a	0.95–1.18
20	18	221.61±16.80 ^a	201–248	115.06±24.98 ^a	85–169	1.05±0.07 ^a	0.90–1.12

注: 同一列上标不同字母表示不同年龄间差异显著($P<0.05$).
Note: Different superscript letters in the same colum represent significant differences among different age groups ($P<0.05$).

比例均不高,最高仅为 45.45%,出现在 20 龄,雄鱼在 18 龄以后成熟比例较高,最高为 71.43%,不同年龄阶段的雄鱼成熟比例均要高于雌鱼(图 3、表 3)。

成熟雌鱼体重(88.39 ± 29.14) kg,体长(193.37 ± 18.90) cm,均高于成熟雄鱼体重(60.73 ± 14.53) kg 和体长(172.27 ± 13.46) cm(表 3),成熟个体的体长(L)和体重(W)之间的关系式为:

雌鱼: $W=1\times 10^{-5}L^{2.9826}$ ($R^2=0.9031$, $n=19$),

雄鱼: $W=2\times 10^{-5}L^{2.9114}$ ($R^2=0.8975$, $n=55$)。

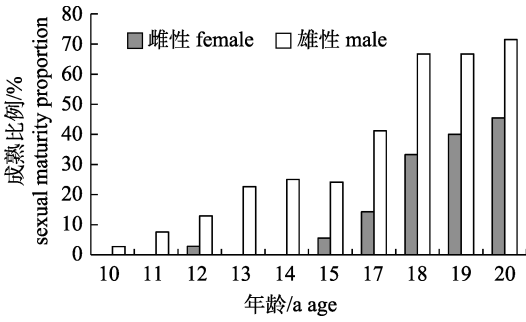


图 3 人工养殖子一代中华鲟不同年龄阶段的性成熟比例

Fig. 3 Sexual maturity proportion of cultured *Acipenser sinensis* of the first generation at different ages

表 3 人工养殖子一代中华鲟性成熟个体体重、体长及年龄

Tab. 3 Body weight, body length, and age of cultured mature *Acipenser sinensis* for the first generation

性别 gender	数量/ind number	体长/cm body length		体重/kg body weight		年龄/a years of age	
		$\bar{x}\pm SD$	范围 range	$\bar{x}\pm SD$	范围 range	$\bar{x}\pm SD$	范围 range
雌鱼 female	19	193.37 ± 18.90	160–240	88.39 ± 29.14	50–166	17.84 ± 1.80	12–20
雄鱼 male	55	172.27 ± 13.46	145–201	60.73 ± 14.53	35–97	14.96 ± 1.93	10–20

2.2 中华鲟全人工繁殖效果

在 2012—2018 年,对 74 尾成熟的子一代中华鲟实施了人工催产,在水温 17.5~20.5 ℃,雌雄亲鲟均能催产成功。雄鱼催产成功率为 76.36%,其中 10.91%的个体在未经人工催产的情况下即可挤出精液(精子“自产”),催产效应时间为 8.5~17.0 h,平均为(12.72 ± 2.08) h,精子剧烈运动时间、快速运动时间和寿命分别为(49.11 ± 13.38) s、(87.47 ± 20.01) s 和(220.75 ± 56.47) s(表 4)。雌鱼催产成功率为 57.89%,未出现卵子“自产”的现象,催产效应时间为 24~41 h,平均为(30.91 ± 5.80) h,卵径(3.97 ± 0.15) mm,卵重(0.046 ± 0.013) g,不同个体之间产卵量、受精率、孵化率及出苗量相差较大,产卵量最小仅 5 万粒,最大达 25 万粒,平均为(13.43 ± 6.79)万粒,受精率最小仅 6.25%,最大可达 80.03%,平均为(42.72 ± 27.82)%,孵化率最小仅 9.3%,最大可达 89.1%,平均为(51.61 ± 32.41)%,出苗量最小仅 0.1 万尾,最大达 17.5 万尾,平均为(4.44 ± 5.67)万尾(表 5),2012—2018 年共计出苗 40 万尾。

表 4 2012—2018 年子一代中华鲟雄鱼繁殖效果

Tab. 4 Result of male cultured *Acipenser sinensis* of the first generation for artificial propagation in 2012—2018

项目 item		$\bar{x}\pm SD$	范围 range
催产水温/℃ inducting water temperature		/	17.5–20.5
效应时间/h response time		12.72 ± 2.08	8.5–17
催产率/% inducting rate	自产 self-spawning	10.91	/
	催产 success to induce	65.45	/
	未产 fail to induce	23.64	/
精子活力/s sperm motility	剧烈运动时间 swirling moving time	49.11 ± 13.38	35–90
	快速运动时间 fast moving time	87.47 ± 20.01	59–150
	寿命 life time	220.75 ± 56.47	120–360

3 讨论

3.1 人工养殖中华鲟与野生中华鲟繁殖生物学比较

3.1.1 个体大小 四川渔民有“千斤腊子万斤象”的谚语,其中“千斤腊子”指的就是中华鲟,体重最大可达上千斤,据已有的部分文献记载,1983—1991 年葛洲坝下中华鲟自然繁殖群体雄鱼体重为

表 5 2012—2018 年子一代中华鲟雌鱼繁殖效果
Tab. 5 Result of female cultured *Acipenser sinensis* of the first generation for artificial propagation in 2012—2018
n=19

项目 item	$\bar{x} \pm SD$	范围 range
催产水温/℃ inducting water temperature	/	17.5—20.5
效应时间/h response time	30.91±5.80	24—41
自产 self-spawning	0	/
催产率/% inducting rate	57.89	/
催产 success to induce	57.89	/
未产 fail to induce	42.11	/
产卵量/(×10 ⁴ ind) egg quantity	13.43±6.79	5—25
卵径/mm egg diameter	3.97±0.15	3.75—4.20
卵重/g egg weight	0.046±0.013	0.033—0.058
受精率/% fertility rate	42.72±27.82	6.25—80.03
孵化率/% hatching rate	51.61±32.41	9.3—89.1
出苗量/% quantity of hatching-out larvae	4.44±5.67	0.1—17.5

42.5~167.5 kg (平均 84.5 kg), 雌鱼体重为 104.5~420 kg (平均 217.3 kg)^[15], 1998—2004 年为雄鱼 70~244 kg (平均 134 kg), 雌鱼 140~432 kg (平均 234 kg)^[8]。本研究中, 人工养殖的子一代中华鲟体重范围仅为 30~169 kg, 性成熟的雄鱼体重为 35~97 kg (平均 60.73 kg), 性成熟的雌鱼体重为 50~166 kg (平均 88.39 kg), 均远低于野生个体, 目前人工养殖的 1 尾体重最大的子一代中华鲟位于北京海洋馆, 仅为 169 kg, 且出现体重增长缓慢或不增长等“长不大”的现象。中华鲟个体大, 对养殖空间的需求大, 而现有人工养殖设施往往池体小, 池水浅, 人工养殖中华鲟长期处于空间胁迫状态^[7], 使其生长受阻, 是其个体“长不大”的主要原因。

3.1.2 性成熟年龄 Doroshov 等^[17]认为适宜的养殖环境和充足的营养供应往往使得人工养殖的鲟鱼性成熟年龄提前, 这在部分鲟鱼中已有发现, 如高首鲟(*A. transmontanus*)^[17]、俄罗斯鲟(*A. gueldenstaedti*)^[18]和施氏鲟(*A. schrencki*)^[19-20]。中华鲟性成熟年龄晚, 1983—1991 年葛洲坝下中华鲟自然繁殖群体性成熟年龄为雄鱼 8~27 龄(平均 14 龄), 雌鱼 13~34 龄(平均 20.7 龄)^[15], 1998—2004 年为雄鱼 12~26 龄(平均 20.6 龄), 雌鱼 15~30 龄(平均 22.3 龄)^[8]。在本研究中, 已性成熟的中华鲟中, 雄鱼年龄为 10~20 龄(平均 14.96

龄), 雌鱼为 12~20 龄(平均 17.84 龄), 雄鱼性成熟年龄略晚于 1983—1991 年自然繁殖群体, 而明显提前于 1998—2004 年自然繁殖群体, 雌鱼性成熟年龄较自然繁殖群体明显提前。由于目前人工养殖的中华鲟还未达到批量成熟(成熟比例仅 15.04%), 因此, 人工养殖中华鲟性成熟年龄是否较野生个体提前目前还不能完全断定。

3.1.3 繁殖力和繁殖效果 在以往的研究中, 野生中华鲟的繁殖力呈现出不断下降的趋势, 1973—1976 年野生中华雌鲟的绝对怀卵量为 30.6 万~130.3 万粒(平均 64.5 万粒), 卵径为 4.4~4.6 mm, 雄鲟精子剧烈运动时间为 248 s^[5]; 而 1998—2004 年雌鲟的绝对怀卵量为 20 万~59 万粒(平均 35.8 万粒), 卵径为 4.0~4.2 mm, 雄鲟精子剧烈运动时间下降至 103 s^[8]。本研究中, 成熟子一代中华鲟雌鲟怀卵量为 5 万~25 万粒(平均 13.43 万粒), 远低于野生个体, 卵径 3.75~4.20 mm (平均 3.97 mm), 也小于野生个体^[8, 21], 雄鲟精子剧烈运动时间为 34~90 s (平均 49.11 s), 也远低于野生个体。人工养殖中华鲟雌雄亲鲟催产成功率分别为 57.89% 和 76.36%, 远低于野生中华鲟(94.7%), 平均受精率为 42.72%, 也低于野生中华鲟(63.7%)^[8], 但孵化率略高于野生个体(表 6)。总体来讲, 与野生中华鲟相比, 人工养殖的中华鲟繁殖力和繁殖效果呈下降趋势。

3.2 中华鲟全人工繁殖技术探讨

对性腺成熟度进行准确判断, 是中华鲟全人工繁殖技术的关键, 中华鲟个体大, 体检时容易产生应激反应, 对亲鲟造成伤害, 对其生长和发育均不利。对鲟鱼性腺成熟度的鉴定, 最初采用腹部手术开口(长 2~4 cm)的方式, 但这种方法伤口易感染, 对亲鲟伤害较大; 后来逐步采用腹部穿刺的方法, 用手术刀在腹部开一小口(长 6~8 mm), 再用挖卵器穿过取性腺观察, 此方法创口小, 对亲鲟的影响也较小, 被广泛应用于鲟鱼的人工繁殖; 近年来, B 超作为一种先进的现代技术, 逐渐被应用于鱼类的性腺成熟度判定, Du 等^[11]采用 B 超和性激素检测相结合的技术, 对中华鲟 II 期性腺鉴别准确率在 90.4% 以上, IV 期可达 100%, 这种方法对亲鲟的干扰极小, 为中华鲟的

表 6 人工养殖中华鲟与野生中华鲟繁殖力和繁殖效果比较
Tab. 6 Difference of fecundity and reproductive performance between cultured and wild *Acipenser sinensis*

项目 item	野生个体 wild fish		人工养殖个体 cultured fish
	1973—1976 ^[5]	1998—2004 ^[8]	
怀卵量/(×10 ⁴ ind) egg quantity	30.6—130.3 (平均 64.5)	20—59 (平均 35.8)	5—25 (平均 13.43)
卵径/mm egg diameter	4.4—4.6	4.0—4.2	3.75—4.2 (平均 3.97)
精子剧烈运动时间/s swirling moving time of the sperm	248	103	34—90 (平均 49.11)
催产率/% inducing rate	/	94.7	♀: 57.89%; ♂: 76.36%
受精率/% fertility rate	/	63.7	42.72
孵化率/% hatching rate	/	48.1	51.61

全人工繁殖提供了重要的技术支撑。本研究中,我们发现部分中华鲟性腺发育出现退化的现象,如上半年检查时发现性腺发育至 III 期,而在下半年再次检查时退化至 II 期,这可能与体检频次过多有一定关系,频繁的体检会干扰其正常摄食、生长,进而影响性腺发育,因此我们认为频繁的检查对中华鲟性腺发育不利,建议检查频率为 1 次/年,在每年 9—10 月进行较合适。

温度是影响鱼类生长和性腺发育的关键因子之一,而低温被认为是鲟鱼性腺发育最终成熟至关重要的一个环节^[22]。在本研究中,在不同周年水温变化(自然水温、恒温、控温)养殖条件下,中华鲟性腺均能发育成熟,并最终成功催产。但在对北京海洋馆恒温(20~21 ℃)养殖条件下 1 尾性腺发育成熟的雌性中华鲟实施人工催产时,虽成功产卵约 10 万粒,却没有获得受精卵,这可能与这尾中华鲟没有经历过低温刺激有关。恒定的水温有利于亲鲟的生长,而性腺成熟前的低温刺激有利于提高人工繁殖效率。

中华鲟个体大、性成熟时间晚,开展中华鲟物种保护相关工作难度大、周期长,需要持续的人力和物力的投入。现阶段,中华鲟人工群体已初步建立,全人工繁殖也已取得成功,但其人工保种工作仍然面临挑战,主要体现在:现有中华鲟养殖池规格小,池水浅,养殖密度高,中华鲟生长空间需求得不到满足;大部分人工养殖中华鲟均是纯淡水养殖,未经历海水阶段,生活史不完整。这些因素均可能与其繁殖力出现下降有关。在今后的工作中,应加大这方面的研究力度。

致谢: 中国水产科学研究院长江水产研究所濒危

鱼类课题组全体同事及已毕业和在读的研究生;荆州太湖试验场全体员工参与了本研究工作;合作单位北京海洋馆及湖北恒升实业有限责任公司等许多未署名人员在中华鲟人工群体建立和全人工繁殖技术研究中做出了贡献,一并表示感谢。特别感谢长期关心和支持本工作的单位、领导、专家和同行们。

参考文献:

[1] 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, 27(2): 176-180.

[2] 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.]

[3] Zhang H, Wang C Y, Yang D G, et al. Spatial distribution and habitat choice of adult Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray, 1835) downstream of Gezhouba Dam, Yangtze River, China[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2014, 30(6): 1483-1491.

[4] 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.

[5] Yangtze River Fisheries Investigation Team of Sichuan Province. Biology and Artificial Reproduction of Sturgeon in Yangtze River[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 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[M]. 成都: 四川科学技术出版

- 社, 1988.]
- [6] Fu C J, Liu X T, Lu D C, et al. Artificial propagation of *Acipenser sinensis* below Gezhouba Dam[J]. Freshwater Fisheries, 1985, 15(1): 1-5. [傅朝君, 刘宪亭, 鲁大椿, 等. 葛洲坝下中华鲟的人工繁殖[J]. 淡水渔业, 1985, 15(1): 1-5.]
- [7] 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.]
- [8] 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.]
- [9] 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.]
- [10] Wei Q W, Chen X H, Yang D G, et al. Variations in spawning stock structure of *Acipenser sinensis* within 24 years since damming of Gezhouba Dam[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(4): 452-457. [危起伟, 陈细华, 杨德国, 等. 葛洲坝截流 24 年来中华鲟产卵群体结构的变化[J]. 中国水产科学, 2005, 12(4): 452-457.]
- [11] Du H, Yao J P, Zhou H, et al. Optimal dietary lipid level promoted ovary development of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) broodstocks[J]. Aquaculture, 2018, 495: 288-294.
- [12] Zhang H, Yang D G, Wei Q W, et al. Spatial distribution and spawning stock estimates for adult Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray, 1835) around the only remaining spawning ground during the trial operation of the newly constructed Three Gorges Project in the Yangtze River, China[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2013, 29(6): 1436-1440.
- [13] Xi M D, Li P, Du H, et al. Geranylgeranylacetone induction of HSP90 α exerts cryoprotective effect on *Acipenser sinensis* sperm[J]. Animal Reproduction Science, 2018, 193: 19-25.
- [14] Du H, Zhang X Y, Leng X Q, et al. Gender and gonadal maturity stage identification of captive Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, using ultrasound imagery and sex steroids[J]. General and Comparative Endocrinology, 2017, 245: 36-43.
- [15] Wei Q W, Ke F E, Zhang J M, et al. Biology, fisheries, and conservation of sturgeons and paddlefish in China[J]. Environmental Biology of Fishes, 1997, 48(1-4): 241-255.
- [16] Alavi S M H, Cosson J. Sperm motility and fertilizing ability in the Persian sturgeon *Acipenser persicus*[J]. Aquaculture Research, 2005, 26(9): 841-850.
- [17] Doroshov S I, Moberg G P, van Eenennaam J P. Observations on the reproductive cycle of cultured white sturgeon, *Acipenser transmontanus*[J]. Environmental Biology of Fishes, 1997, 48(1-4): 265-278.
- [18] Hu H X, Liu X C, Zhu H, et al. Gonadal development, artificial reproduction in cultured *Acipenser gueldenstaedti*[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46(1): 81-85. [胡红霞, 刘晓春, 朱华, 等. 养殖俄罗斯鲟性腺发育及人工繁殖[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(1): 81-85.]
- [19] Qu Q Z, Sun D J, Ma G J, et al. A note report on artificial reproduction of *Acipenser schrencki*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2002, 9(3): 277-279. [曲秋芝, 孙大江, 马国军, 等. 施氏鲟全人工繁殖研究初报[J]. 中国水产科学, 2002, 9(3): 277-279.]
- [20] Zhang L Z, Zhuang P, Zhang T, et al. Artificial breeding of *Acipenser schrencki* observation of gonad development[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2002, 9(4): 323-327. [章龙珍, 庄平, 张涛, 等. 人工养殖施氏鲟性腺发育观察[J]. 中国水产科学, 2002, 9(4): 323-327.]
- [21] 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.]
- [22] Webb M A H, Doroshov S I. Importance of environmental endocrinology in fisheries management and aquaculture of sturgeons[J]. General and Comparative Endocrinology, 2011, 170(2): 313-321.

Reproductive biology of an artificial population of endangered Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*)

LUO Jiang, DU Hao, WEI Qiwei, ZHANG Hui, QIAO Xinmei, XIONG Wei, LIU Zhigang, LENG Xiaoqian, WU Jingping, SHEN Li, WANG Chengyou, WU Jinming, ZHANG Shuhuan, ZHOU Qiong, LIU Yuan, WANG Keping

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

Abstract: The natural population of the endangered Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*), a first-class protected aquatic fish in China, declined sharply recently in the Yangtze River, because of human activities such as dam construction, overfishing, and pollution. The wild breeding groups consisted of less than 100 individuals, and the natural reproductive behavior became irregular under the Gezhou Dam, the only discovered spawning site. Since the ecological environment of the Yangtze River cannot be restored in a short time, the best way to recover the natural population is to build artificial breeding groups and release cultured fish. The Chinese sturgeon is a typical anadromous fish with large body size, a long lifespan, and a high sexual maturity age; thus, it is challenging to cultivate this fish under artificial conditions, which requires time, investment, and material resources. Since the 1970s, many conservation studies on Chinese sturgeons have been conducted. The wild Chinese sturgeon was induced successfully for the first time in 1976 in the Jinsha River, a tributary of the upper Yangtze River, by the Fisheries Investigation Team of Sichuan. In 1983, the first year after the cutoff of the river by the Gezhou Dam, the wild fish was induced successfully under the Gezhou Dam by the Yangtze River Fisheries Research Institute (YFI). In 1997, with the advent of the technology of large-scale juvenile fish cultivation, large-scale artificial breeding groups (the first generation, F_1) gradually established. In 2012, the artificial propagation of the F_1 generation was successfully conducted by YFI, and a second generation (F_2) was acquired for the first time. The artificial breeding groups of Chinese sturgeon have been established following more than 30 years of efforts and systematic studies and comprise individuals belonging to a certain age echelon. Previous studies indicated that the reproductive capacity of the wild Chinese sturgeon has been in decline over the past 30 years. In this study, the reproductive biology characteristics of cultured F_1 *A. sinensis*, which hatched between 1998 to 2008, were analyzed. A total of 492 fish, between the ages of 10 and 20 years, were counted. The body weight was 30 to 169 kg, the body length 140 to 258 cm, and the condition factor was 0.77 to 1.26. The relationship between body length and weight was determined as $W=1\times 10^{-5}L^{2.9658}$ ($R^2=0.9076$, $n=492$). In total, 74 fish were almost reaching gonadal maturation; the mature proportion was 15.04%. The body weight and body length of the mature male fish were (60.73 ± 14.53) kg and (172.27 ± 13.46) cm, respectively, and were significantly lower than the female fish with (88.39 ± 29.14) kg and (193.37 ± 18.90) cm, respectively. The minimum age of sexual maturation for the male fish was 10 years, with an average of (14.96 ± 1.93) years, while the minimum age for the female was 12 years, with an average of (17.84 ± 1.80) years. Both mature male and female fish were induced successfully every October to November from 2012 to 2018 when the water temperature was between 17.5 °C and 20.5 °C. The success rate of inducing the mature male fish was 76.36%, the swirling movement time of the sperm was (49.11 ± 13.38) s, and the sperm life was (220.75 ± 56.47) s. The success rate of inducing the female fish was 57.89%, the egg quantity, egg diameter, and egg weight were $(13.43\pm 6.79)\times 10^4$ ind, (3.97 ± 0.15) mm, and (0.046 ± 0.013) g, respectively. The fertility rate, hatching rate, and quantity of hatched-out larvae were $(42.72\pm 27.82)\%$, $(51.61\pm 32.41)\%$, and $(4.44\pm 5.67)\times 10^4$ ind, respectively. Compared with wild *A. sinensis*, the cultured *A. sinensis* has a smaller body size and decreased fecundity, indicating that its preservation will be faced with challenges. The fundamental data in this study will contribute to further large-scale artificial propagation of the Chinese sturgeon.

Key words: *Acipenser sinensis*; the first generation; cultured; reproductive biology

Corresponding author: WEI Qiwei. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn