

达氏鲟精子的主要生物学特性

陈春娜^{①②} 黄颖颖^① 陈先均^① 龙治海^① 杜 军^{①②*}

① 四川省农业科学院水产研究所 宜宾 644000; ② 四川省生物资源保护与可持续利用实验室 成都 611731

摘要: 达氏鲟 (*Acipenser dabryanus*) 属淡水定居性鲟鱼类, 为我国特有种, 主要分布在长江上游干流及金沙江下游。长期人为过度捕捞及其生存环境的持续污染和水利工程的影响, 使得达氏鲟自然种群资源遭到严重破坏, 其配子质量的下降已经成为限制其规模化人工繁殖成功的关键因素之一, 因此为解决达氏鲟规模化人工繁殖过程中存在的关键性技术点, 作者从达氏鲟精液基本特征、精浆元素组成以及不同水体和 Na^+ 、 K^+ 对达氏鲟精子活力的影响、精子超微结构方面入手, 对达氏鲟精子的生理生态特性进行了研究。结果显示, 达氏鲟精子平均密度为 1.52×10^9 个/ml; 精浆元素以 Na^+ 含量最高, 其次是 K^+ , 之后为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} , 其中 Na^+ 、 K^+ 、 Zn^{2+} 在达氏鲟精浆中的含量有极显著性差异 ($P < 0.01$), Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mg^{2+} 差异不明显; 精子在江水中的活力最高; 在 Na^+ 浓度为 20 mmol/L 时, 精子活力最高, 精子快速运动时间 (FT) 和寿命 (LT) 分别为 (66.7 ± 7.1) s 和 (177.0 ± 14.9) s; 达氏鲟精子对 K^+ 浓度变化较为敏感, 在 K^+ 浓度为 0.05 mmol/L 时, 精子 FT 和 LT 最长, 分别为 (109.0 ± 16.1) s 和 (189.3 ± 12.4) s, K^+ 浓度超过 0.05 mmol/L 后精子 FT 和 LT 急速下降, 当 K^+ 浓度达到 0.5 mmol/L 以上时, 精子活力立即受到抑制; 达氏鲟精子细胞核长 (5.67 ± 0.20) μm , 鞭毛长 (63.16 ± 2.79) μm , 全长为 (70.35 ± 2.92) μm 。

关键词: 达氏鲟; 精子活力; 精浆元素; 精子结构

中图分类号: S917 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2015) 01-75-13

Biological Characteristics of *Acipenser dabryanus* Sperm

CHEN Chun-Na^{①②} HUANG Ying-Ying^① CHEN Xian-Jun^① LONG Zhi-Hai^① DU Jun^{①②*}

① Fisheries Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Yibin 644000; ② Laboratory of Biological Resources Protection and Sustainable Utilization of Sichuan Province, Chengdu 611731, China

Abstract: Dabry's Sturgeon (*Acipenser dabryanus*) lives only in the Yangtze River and Chin-sha River, and its natural populations have been damaged severely by long-term over-exploitation and increasing pollution. In 1988, the fish was listed as class I state protected animal. It is immediately required to develop conservation measures for its populations, which requires both management and understanding of its biogeographical and biological characteristics. Beacause of the decline of natural spawning colony resource, there is litter knowledge about the sperm physio-ecological characteristics. Healthy male *A.dabryanus*

基金项目 四川省财政基因工程青年基金项目 (No. 2012QNJJ-016);

*通讯作者, E-mail: dujun9100@126.com;

第一作者介绍 陈春娜, 女, 助理研究员; 研究方向: 水产名特优繁育和鱼类生理生化研究; E-mail: hc_1981_2001@sina.com.

收稿日期: 2014-02-05, 修回日期: 2014-05-09 DOI: 10.13859/j.cjz.201501010

individuals which had been cultured by our institute were selected and their spermatozoa were collected. The density of spermatozoa was determined by counting using a haemocytometer after 1 000× dilution of samples with 0.65% NaCl extender, and the results from three replicates were averaged. Milt concentration was enumerated by using milt collected into standard centrifuge tubes and centrifuged at 4 000 r/min for 30 min. The sperm cell volume percentage in the total volume of semen was calculated from 5 replicates. Semen pH was measured with a precision test paper. Ionic composition of seminal plasma was measured by the atomic absorption spectrophotometry method with the use of a AA_220 spectrometer (Varian USA). The effects of different aqueous solution on the sperm motility were measured by using different sources of test water, and Na⁺, K⁺ sensitivity of sperm motility was assessed by activating sperm with 20, 40, 60, 80, 100, 120 mmol/L NaCl and 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00, 1.50 mmol/L KCl, respectively. For testing the motility of spermatozoa, 1 μl of milt was mixed directly with 30 μl of the experimental solution, placed on a glass slide and examined under 400× magnification. The ultrastructure of spermatozoa was observed by using SEM (scanning electron microscopy) and TEM (transmission electron microscopy). All statistical analyses were conducted with SPSS STATISTICS, Version 17.0. For multiple comparisons between groups with LSD method, statistical significance was declared at $P < 0.05$. Results were presented as mean ± standard deviation (SD). The results showed that the sperm density of *A. dabryanus* was 0.63×10^9 to 2.73×10^9 /ml, with the average of 1.52×10^9 /ml, the concentration of sperm was 3.18% to 12.98%, with the average of 7.67%, and the pH value was between 7.5 and 7.9 (Table 2). The ions composition in seminal plasma of *A. dabryanus* included Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, and Na⁺ was the main ion in seminal plasma, followed by K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺. There was significant difference in the concentration of Na⁺, K⁺, and Zn²⁺ ($P < 0.01$), but no significant difference in Ca²⁺, Cu²⁺, Mg²⁺ (Table 3). In *A. dabryanus*, the Na⁺, K⁺ concentrations were lower than in teleostean fish (Table 4). The sperm had the highest motility in river water, and the fast movement time (FT) and lifetime (LT) were 142 s and 373 s, respectively (Fig. 1). The activity of *A. dabryanus* sperm in NaCl solution reached the highest when its concentration was 20 mmol/L, with the FT and LT being 66.7 ± 7.1 s and 177.0 ± 14.9 s, respectively (Fig. 2a). When the concentration of K⁺ was 0.05 mmol/L, the motility of sperm was the highest, while the FT and LT were the longest, which were 109.0 ± 16.1 s and 189.3 ± 12.4 s, respectively (Fig. 2b). The average length of the nucleus was 5.67 ± 0.20 μm (Table 5). Three intertwining endonuclear canals traversed the nucleus longitudinally from the acrosomal end to the basal nuclear fossa region. There were three mitochondria in the midpiece. The flagellum (63.16 ± 2.79 μm in length), originating from the centriolar apparatus, had a typical 9 + 2 eukaryotic flagellar organization (Plate I). Some *A. dabryanus* sperm characteristics are reported here, but further investigations are needed in order to improve our knowledge of reproductive biology of this species and to establish gamete management methods.

Key words: *Acipenser dabryanus*; Sperm motility; Seminal plasma; Spermatozoa structure

达氏鲟 (*Acipenser dabryanus*) 又称长江鲟和沙腊子, 是我国特有的淡水定居性鲟科 (Acipenseridae) 鲟属鱼类, 分布于长江上游和金沙江下游 (丁瑞华 1994), 国家 I 级重点保护野生动物和长江上游一级急切保护鱼类

(刘军 2004), 国际自然保护联盟 (World Conservation Union, IUCN) 极危级 (critically endangered, CR) 物种 (杜军等 2009), 国际濒危动植物种贸易公约 (Convention on International Trade in Endangered Species of

Wild Fauna and Flora, CITES)附录 II 保护物种, 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区的主要保护对象之一。近年来, 由于长江上游江河生态环境的恶化, 本来就较少的达氏鲟资源进一步下降, 现很难发现、更难捕获。正在实施的金沙江梯级水电开发, 可能进一步对达氏鲟的生存产生不利影响(Zhuang et al. 1997, Zhang et al. 2011), 为了保护这一珍稀鱼类资源, 对达氏鲟进行人工繁殖研究, 最终实现规模化人工养殖, 势在必行。虽然目前各界对达氏鲟的保护引起了高度重视, 但在资源量严重衰减的情况下, 关于达氏鲟的研究报告较少, 主要集中在种群生态学(黄德祥 1980, 贾敬德等 1981, 四川省长江水产资源调查组 1988, Zhuang et al. 1997)、形态学(Kynard et al. 2003)、人工繁殖与养殖技术(四川省重庆长寿湖渔场水产研究所 1976, 谢大敬等 1981, 四川省长江水产资源调查组 1988, 杜军等 2009, 何斌等 2011)、生理学(龚全等 2012, 史玲玲等 2013)和分子遗传学(张四明等 1999a, b, c, 2000, Wan et al. 2003, 汪登强 2004, Zeng et al. 2013, Zhang et al. 2013)等方面。

环境污染对物种繁殖性能的破坏已经是一个不争的事实, 配子质量的下降已经成为限制许多珍稀鱼类人工繁殖成功的关键因素之一。达氏鲟个体怀卵量大, 但从以往开展的工作来看, 其受精率偏低, 为探讨限制达氏鲟规模化

人工繁殖过程中存在的关键性技术点, 2012 年 4 月, 作者展开了达氏鲟精子主要生物学特性的研究, 旨在积累达氏鲟繁殖生物学的相关数据, 丰富鱼类精子生物学研究内容, 为达氏鲟规模化人工繁殖和种质资源的保护开发提供相关资料。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

实验用性成熟达氏鲟雄性亲鱼为四川省农业科学院水产研究所养殖, 养殖水源为金沙江江水。2012 年 4 月雄性亲鱼经注射鲤鱼(*Cyprinus carpio*)脑垂体、鱼用促排卵 2 号激素催产, 腹部挤压法采集精液。取精液前, 用干净毛巾擦干生殖孔周围的水及脏物, 收集的干净精液保存在干燥的离心管中, 置于 4℃的冰瓶中待用。本次实验共采集 3 尾达氏鲟的精液用于分析, 3 尾达氏鲟采精量见表 1。

1.2 实验方法

1.2.1 精液浓度、精子密度和精液 pH 的测定

将新鲜精液装入刻度离心管中, 常温下 4 000 r/min 离心 30 min, 计算精子细胞总体积占精液总体积的百分率, 即为精液浓度, 重复 5 次, 结果取平均值。用蒸馏水配制 0.65%的 NaCl 溶液, 将达氏鲟精液稀释 1 000 倍, 用血球计数板(XB-K-25)在 Olympus CX31 显微镜下计数, 计算精子密度, 精子密度(个/ml) = (80 小格内精子数/80) × 400 × 10⁴ × 稀释倍

表 1 实验用鱼采精量

Table 1 The amount of *Acipenser dabryanus* semen collection

亲本 Brood stock	年龄 Age	全长 (cm) Total length	体重 (kg) Weight	采精量 (ml) Semen collection
♂1	8	97	11.0	150
♂2	8	89	9.0	80
♂3	8	92	10.5	120
平均 Average	8	92.7	10.2	116.7

数, 重复 3 次, 结果取平均值。用精密 pH 试纸测定精液的 pH。

1.2.2 精浆主要离子成分测定 采集的精液用 Eppendorf 5810R 冷冻离心机在 3 000 r/min、4℃ 下离心 10 min, 取上部精浆进行分析, 样品测定前于 -20℃ 下保存。精浆主要离子成分组成分析用 AA_220 型原子吸收分光光度计 (美国瓦里安公司) 进行测定。本次测定共检测 3 个样本, 每个样本重复检测 3 次。

1.2.3 精子活力测定 采用金沙江水、池塘水、曝气井水和蒸馏水, 测定不同水体对达氏鲟精子活力及寿命的影响。取干燥洁净载玻片, 用移液枪吸取 30 μ l 的实验液于片上, 置于 10 \times 40 倍显微镜下, 定好视野, 用移液枪吸取 1 μ l 精液涂于实验液中并使其均匀分散, 即刻用秒表计时。每种水体重复 3 次, 取平均值为观测数据。精子活动等级参照鲁大椿等 (1989) 的方法。根据达氏鲟精子的活动状态, 将其运动过程分为: 激烈运动、快速运动、慢速运动、原地颤动。精子寿命指从精子激活开始到约 90% 停止原地颤动所需时间。

1.2.4 Na⁺、K⁺对精子活力的影响 采用不同浓度的 Na⁺、K⁺溶液, 测定 Na⁺、K⁺对达氏鲟精子活力的影响。用去离子水配制 Na⁺、K⁺溶液, NaCl 溶液浓度为 20、40、60、80、100、120 mmol/L, KCl 溶液浓度为 0.01、0.05、0.10、0.50、1.00、1.50 mmol/L。每种离子的每个浓度设 3 个平行组, 观察方法同 1.2.3 节。

1.2.5 精子结构观察 透射电镜样品的制备: 样品用 2.5% 的戊二醛固定, 将固定的精子经 3 000 r/min 离心 5 min, 弃上清液, 再加等量 2.5% 的戊二醛, 30 min 后将沉淀从离心管中剥离出来, 置 2.5% 的戊二醛中, 保存在 4℃ 下备用。样品经磷酸盐缓冲液 (phosphate buffer saline, PBS) 漂洗 3 次后, 用 1% 的锇酸固定, 各级酒精梯度脱水, Epon 812 树脂包埋, 超薄切片切片。样本经醋酸铀和柠檬酸铅染色, 置 tecnail 10 型透射电镜 (荷兰 Philips) 观察并拍照。

扫描电镜样品的制备: 将样品用 2.5% 的戊二醛固定 3 h 以上 (0~4℃), 用 pH 7.4 的 PBS 漂洗 3 次, 1% 的锇酸固定 2 h (20℃), 梯度酒精脱水, 醋酸异戊酯取代, 二氧化碳临界点干燥, 真空镀膜, 日立 SN3400N II 型扫描电镜观察。

2 结果

2.1 达氏鲟精液的一般特征

实验测定了达氏鲟新鲜精液的一般特征 (表 2), 其精液呈弱碱性, 精子密度和精液浓度存在明显的个体差异。达氏鲟精液颜色为乳白色和白色, 其中乳白色精液较浓, 白色精液则显得稀薄。

2.2 达氏鲟精浆主要离子成分分析

达氏鲟精浆中以 Na⁺ 含量最高, 其次是 K⁺, 之后为 Ca²⁺、Mg²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ (表 3)。Na⁺、K⁺、Zn²⁺ 含量在 3 尾雄鱼间呈现极显著性差异 ($P < 0.01$), Ca²⁺、Mg²⁺、Cu²⁺ 差异不明显。

2.3 不同水体对达氏鲟精子活力的影响

达氏鲟精子在江水、池塘水、曝气井水及蒸馏水中的快速运动时间 (fast movement time, FT) 和寿命 (life time, LT) 依次降低 (图 1), 其中精子快速运动时间在 4 种水体间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.4 Na⁺、K⁺对精子活力的影响

Na⁺ 对达氏鲟精子活力的影响见图 2a, 随着 Na⁺ 浓度增加, 达氏鲟精子活力先升高后逐步下降, 40 mmol/L 时即表现出了对精子活力的抑制作用, 80 mmol/L 则完全抑制精子活力。Na⁺ 浓度为 20 mmol/L 时, 精子活力最高, 精子快速运动和寿命均达最大值, 分别为 (66.7 \pm 7.1) s 和 (177.0 \pm 14.9) s。精子激活率在 Na⁺ 浓度为 20 mmol/L 之前一直保持在 100%, 随着 Na⁺ 浓度的继续升高, 激活率快速下降, 浓度为 100 mmol/L 时精子激活率为 0, 加入江水后, 精子延时 5 s 后全部运动, 浓度为 120 mmol/L 时精子激活率也为 0, 但加入江水后, 精子无运动, 说明在 120 mmol/L 的 NaCl 溶液中, 精

表 2 达氏鲟精液的一般特征

Table 2 The basic characteristics of *Acipenser dabryanus* milt

亲本 Brood stock	精液浓度 (%) Milt concentration	精子密度 $\times 10^9$ (个/ml) Sperm density $\times 10^9$ (cell/ml)	pH	颜色 Colour
♂1	12.98	2.73	7.5 ~ 7.9	乳白色 Ivory- white
♂2	3.18	0.63		白色 White
♂3	6.84	1.20		乳白色 Ivory- white
平均 Average	7.67	1.52		

表 3 达氏鲟精浆中主要离子成分 (单位: mmol/L)

Table 3 Composition of main ions in *Acipenser dabryanus* semen (unit: mmol/L)

离子成分 Ions composition	亲本 Brood stock			
	♂1	♂2	♂3	平均值 Average
Na ⁺	34.93 \pm 0.24 ^A	46.42 \pm 1.28 ^B	23.70 \pm 0.58 ^C	35.02 \pm 9.86
K ⁺	2.19 \pm 0.29 ^A	4.09 \pm 0.13 ^B	3.10 \pm 0.12 ^C	3.13 \pm 0.84
Ca ²⁺	0.71 \pm 0.08 ^a	0.99 \pm 0.05 ^b	0.93 \pm 0.03 ^b	0.88 \pm 0.13
Mg ²⁺	0.54 \pm 0.04 ^a	0.71 \pm 0.03 ^b	0.70 \pm 0.01 ^b	0.65 \pm 0.09
Cu ²⁺	0.034 \pm 0.003 ^a	0.075 \pm 0.001 ^b	0.071 \pm 0.002 ^b	0.06 \pm 0.19
Zn ²⁺	0.001 9 \pm 0.000 1 ^A	0.009 2 \pm 0.000 4 ^B	0.005 4 \pm 0.000 3 ^C	0.005 2 \pm 0.003 1

数据以平均值 \pm 标准差表示, 同一行上标不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$), 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Data are expressed as Mean \pm SD. Values followed by a different capital letter in the same line are significantly different at the 1% probability level, and those by a different lowercase letter at the 5% probability level.

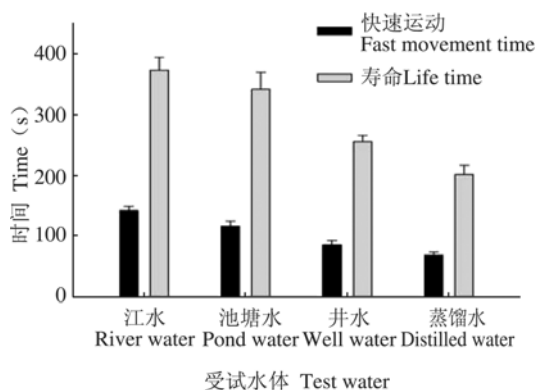


图 1 不同水源对达氏鲟精子活力的影响

Fig. 1 Effects of different sources of test water on the sperm motility in *Acipenser dabryanus*

子全部死亡。对数据进行统计分析表明, Na⁺浓度为 20 mmol/L 时精子寿命与其他浓度之间

差异极显著 ($P < 0.01$)。精子快速运动的变化规律与寿命相似, 在 Na⁺浓度为 20 mmol/L 时精子快速运动与其他浓度之间差异显著 ($P < 0.05$), 浓度为 40 mmol/L 时与 60 mmol/L 之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

不同浓度的 K⁺对达氏鲟精子活力的影响见图 2b。精子快速运动变化规律与寿命的变化相近, 随着 K⁺溶液浓度的增加, 精子快速运动和寿命变化首先呈逐渐上升的状态, 在其浓度为 0.05 mmol/L 时, 精子快速运动和寿命最长, 分别为 (109.0 \pm 16.1) s 和 (189.3 \pm 12.4) s, 当 K⁺溶液浓度超过 0.05 mmol/L 后, 精子快速运动和寿命急速下降, 当 K⁺浓度达到 0.5 mmol/L 以上时, 精子活力立即受抑制, 不见精子运动。K⁺溶液浓度为 0.05 mmol/L 与

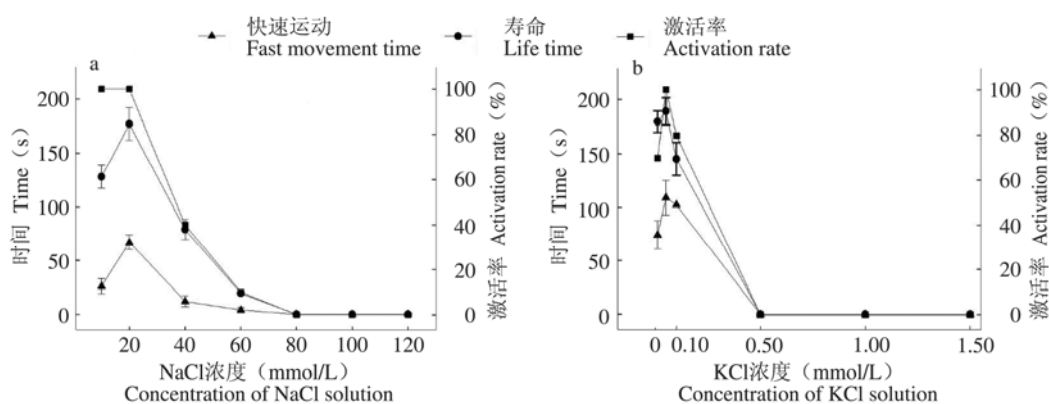


图 2 Na^+ (a) 和 K^+ (b) 对达氏鲟精子活力的影响

Fig. 2 Effect of Na^+ (a) and K^+ (b) on motility characteristics of *Acipenser dabryanus* sperm

0.10 mmol/L 时精子快速运动和寿命无显著性差异, 而与其他浓度之间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.5 达氏鲟精子的形态结构

2.5.1 精子大小 扫描电镜下观察到达氏鲟精子由头部、中段和尾部组成 (图版 I: 1, 2), 头部细胞核呈杆状, 尾部细长。达氏鲟精子全长 (70.35 ± 2.92) μm , 精子细胞核长 (5.67 ± 0.20) μm , 鞭毛长 (63.16 ± 2.79) μm , 约为头长的 11.14 倍。

2.5.2 精子的超微结构 达氏鲟精子的头部由顶体和核区两部分组成。顶体似伞状帽覆盖在核区的前端, 由顶体泡、亚顶体等组成 (图版 I: 3)。顶体泡位于顶体的最外层, 亚顶体位于顶体泡与核区之间, 且与两者紧密相贴。顶体泡与亚顶体之间具顶体膜, 亚顶体与细胞核之间具核膜。

细胞核由染色较深的电子致密物组成, 核质分布均匀, 外周质膜覆盖。细胞核中有 3 条细胞核内沟呈螺旋形排列, 从细胞核的横切面观察, 3 条细胞核内沟之间排列似三角形 (图版 I: 4)。

在达氏鲟精子中段和细胞核连接处, 细胞核向核内凹陷形成植入窝 (图版 I: 5), 植入窝由膜包被呈囊状结构, 纤维体位于植入窝内 (图版 I: 6), 横切面呈双环形管状结构, 中段的后缘延长为袖套, 从精子的纵切面可以看到 3 个

圆形或椭圆形线粒体排列在中段的一侧 (图版 I: 7)。

达氏鲟精子的尾部为一条细长的鞭毛, 长 (63.16 ± 2.79) μm , 鞭毛两侧有侧鳍, 鞭毛的起始端位于袖套腔中, 并从袖套中伸出。鞭毛由细胞质膜和轴丝组成, 鞭毛的核心结构是轴丝, 轴丝具有典型的“9+2”双联微管结构 (图版 I: 8)。

3 讨论

3.1 精液基本特性

精子密度和精液浓度是鱼类精子主要的基本特征, 鱼类精液浓度和精子密度在不同种类之间, 同种的不同个体之间以及同一个体在繁殖季节的不同阶段都是不同的。达氏鲟精子的平均密度为 1.52×10^9 个/ml, 低于其他淡水鱼类, 鲤鱼精子平均密度为 29.4×10^9 个/ml, 团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 精子平均密度为 33.2×10^9 个/ml, 四大家鱼精子平均密度为 26.6×10^9 个/ml (鲁大椿等 1989), 和其他鲟鱼相比差别不大, 如中华鲟 (*A. sinensis*) 精子的平均密度为 3.26×10^9 个/ml (郑跃平 2007), 史氏鲟 (*A. schrenki*) 精子密度为 $2.45 \times 10^9 \sim 9.50 \times 10^9$ 个/ml (孙大江等 2002), 波斯鲟 (*A. persicus*) 精子平均密度为 1.54×10^9 个/ml (Noveiri et al. 2006)。Noveiri 等 (2006)

研究发现, 精液浓度和精子密度之间存在着显著正相关性, 精液浓度高, 精子密度大, 反之则小。达氏鲟精液颜色为乳白色和白色, 其中乳白色精液较浓, 其精子密度也大, 白色精液较稀薄, 其精子密度小。虽然达氏鲟精子密度较其他鱼类低, 但由于其个体相对较大, 每次排精量较多, 在一定程度上弥补了精子密度较低的缺陷。达氏鲟精子同大多数鲟鱼相比, 其寿命相对较长, 达氏鲟精子在江水中的寿命为 373 s, 史氏鲟为 330 s (王丙乾等 2003), 西伯利亚鲟 (*A. baerii*) 为 353 s (刘鹏等 2007)。达氏鲟精子在江水中快速运动时间为 142 s, 根据 20 世纪 80 年代的报告 (谢大敬等 1981), 池塘养殖 4 龄达氏鲟的精子在金江沙水中快速运动时间为 241 s, 寿命为 780 s, 其差别很可能是本次实验亲鱼在人工养殖过程中受到营养限制及养殖胁迫等因素的影响, 导致其激素分泌异常, 从而影响其精子质量, 另一方面也可能与金沙江水质变化引起达氏鲟精子质量下降

有关, 显示雄性达氏鲟个体繁殖力有衰退的趋势。

达氏鲟精液 pH 范围为 7.5 ~ 7.9, 和其他鱼类相似, 是对自然水体环境适应的结果。达氏鲟精子快速运动和寿命都以在江水中最高, 这与大口鲶 (*Silurus meridionalis*) (罗相忠等 2002)、华鲮 (*Sinilabeo rendahli*) (李萍等 2005)、稀有鮡鲫 (*Gobiocypris rarus*) (王永明等 2011) 相似。本次实验所用江水为金沙江水源, 其溶氧含量变化范围为 8.74 ~ 9.92 mg/L, 比其他 3 种水体要高, 且 pH 变化范围在 7.4 ~ 8.0 之间, 更接近精子最适 pH, 这可能是精子在江水中活力最高的原因之一, 另一方面也可能与不同水体所含离子浓度有关。

3.2 达氏鲟精浆主要离子成分

达氏鲟精浆中的离子成分同其他鱼类的比较见表 4, 种属间精浆离子成分的不同一方面反映了鱼类生殖系统功能的不同 (Toth et al.

表 4 部分鲟鱼和硬骨鱼精浆离子含量 (单位: mmol/L)

Table 4 Ionic contents of the seminal plasma in different species (unit: mmol/L)

物种 Species	离子组成 Ions composition				
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Zn ²⁺
达氏鲟 <i>Acipenser dabryanus</i>	35.02 ± 9.86	3.13 ± 0.84	0.88 ± 0.13	0.65 ± 0.09	0.005 2 ± 0.003 1
波斯鲟 <i>A. persicus</i> (Alavi et al. 2004)	62.44 ± 6.82	6.92 ± 0.88	0.79 ± 0.03	0.52 ± 0.03	
西伯利亚鲟 <i>A. baerii</i> (Psenicka et al. 2008)	28.0 ± 0.7	2.5 ± 0.3			
湖鲟 <i>A. fulvescens</i> (Toth et al. 1997)	25.6 ± 2.8	5.78 ± 0.49	0.16 ± 0.05	0.21 ± 0.02	
施氏鲟 <i>A. schrenckii</i> (张涛等 2003)	38.92	2.29		0.47	0.013
小体鲟 <i>A. ruthenus</i> (张涛等 2003)	48.32	2.05		0.34	0.016
匙吻鲟 <i>Polyodon spathula</i> (Linhart et al. 2003)	21.739	2.495	0.195	2.292	
中华鲟 <i>A. sinensis</i> (厉萍 2007)	18.6	7.8	0.1	0.8	0.016
俄罗斯鲟 <i>A. gueldenstaedti</i> (Li 2011)	34.58 ± 4.61	2.29 ± 0.50	0.35 ± 0.12	0.70 ± 0.25	
闪光鲟 <i>A. stellatus</i> (Li 2011)	20.08 ± 10.75	5.42 ± 1.06	0.28 ± 0.06	0.29 ± 0.05	
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> (鲁大椿等 1992)	15.72	32.02	0.05	0.039	
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Glogowski et al. 2000)	122.0 ± 14.2	30.4 ± 4.5	1.10 ± 0.26	0.85 ± 0.12	
大麻哈鱼 <i>Oncorhynchus keta</i> (Morisawa et al. 1979)	142.0 ± 1.7	66.1 ± 4.9	2.2 ± 0.1	1.6 ± 0.1	

大部分数据以平均值 ± 标准差方式表示。Data are expressed as Mean ± SD.

1997, Alavi et al. 2004), 另一方面也同催产用的激素种类、剂量、效应时间及采精频率有关 (Piros et al. 2002, Linhart et al. 2003, Alavi et al. 2006, Psenicka et al. 2008)。同硬骨鱼类一样, 钠和钾是构成鲟鱼精浆渗透压最主要的离子, 但是, 鲟鱼精浆中钠和钾的含量却比硬骨鱼类低很多, 达氏鲟精浆中钠的含量为 (35.02 ± 9.86) mmol/L, 钾为 (3.13 ± 0.84) mmol/L, 而硬骨鱼类钠含量为 50 ~ 150 mmol/L, 钾含量为 25 ~ 90 mmol/L (Alavi et al. 2006, 2008)。由于达氏鲟精巢特殊的形态结构, 精子通过输尿管排出, 因此, 精浆中钠、钾含量与硬骨鱼类的差别有可能是由尿液污染造成的 (Alavi et al. 2012a)。钾是抑制精子在精浆中运动最主要的离子, 1 mmol/L 的钾便可以抑制精子在精浆中的运动 (Alavi et al. 2012b)。精浆中锌的含量与精液品质优劣有密切关系, 含量过低, 精液质量差; 精浆中锌含量高, 则精液质量好。结合哺乳动物的研究结果, 达氏鲟精浆中微量元素归纳起来可能有以下几种作用: 1) 与精液渗透压有关; 2) 与精液质量有关; 3) 影响性腺发育; 4) 与精液的酸碱度有关, 除了上述几点作用外, 可能还同保护精子免受尿液污染有关, 这有待于进一步的研究。

3.3 Na^+ 、 K^+ 对精子活力的影响

Na^+ 是维持细胞兴奋性和渗透压的主要阳离子, Na^+ 可以通过诱发细胞膜去极化产生动作电位, 进而引起细胞内 Ca^{2+} 浓度的变化, 从而激活精子鞭毛中的 ATP 酶活性, 使鞭毛产生摆动, 起到间接激活精子运动的作用。 Na^+ 在一定范围内具有提高鲟鱼精子活力和加快精子运动速度的作用, 但若超出适宜范围精子活力即受抑制。湖鲟精子在 Na^+ 浓度为 10 mmol/L 时运动时间最长, 40 mmol/L 则可抑制精子运动 (Toth et al. 1997); 中华鲟精子可在 0 ~ 100 mmol/L 的 Na^+ 溶液运动, 随浓度升高精子活力先升高后下降, 精子运动最适浓度为 25 mmol/L (郑跃平 2007)。实验表明, 随着 Na^+ 浓度增加, 达氏鲟精子活力先升高后逐步

下降, 40 mmol/L 时即表现出了对精子活力的抑制作用, 80 mmol/L 完全抑制精子活力, 20 mmol/L 时精子活力最高。上述研究说明低浓度的 Na^+ 确实可以促进和调节鲟鱼精子的活力, 但同时鲟鱼精子对细胞外高浓度的 Na^+ 具有很高的敏感性, 已有研究表明, 鲟鱼精子对 Na^+ 的生物敏感性主要由精浆成分和 Na^+ 含量决定 (Alavi et al. 2006)。

同硬骨鱼类一样, 鲟鱼精子在精巢中也是静止的, K^+ 是其精浆的重要组成成分及形成精浆渗透压的主要离子, 同鲑鳟鱼类相似, K^+ 是抑制鲟鱼精子活动的主要因子 (Gallis et al. 1991), 在精子激活液中降低 K^+ 的浓度, 可以显著提高鲟鱼精子的活力 (Alavi et al. 2011)。不同种类的鲟鱼, K^+ 对精子的抑制浓度不同, 湖鲟为 1 mmol/L (Toth et al. 1997), 匙吻鲟为 0.5 mmol/L (Linhart et al. 2002), 波斯鲟为 2 mmol/L (Alavi et al. 2005), 小体鲟为 0.35 mmol/L (Alavi et al. 2011), 达氏鲟为 0.50 mmol/L, 由此可见鲟鱼精子对低浓度的 K^+ 具有很高的敏感性, 其活力可受低浓度 K^+ 调控。 K^+ 抑制浓度的不同可能与精浆中 K^+ 浓度有关, 研究表明, 匙吻鲟精浆中 K^+ 浓度为 2.495 mmol/L, 细胞外 0.5 mmol/L 的 K^+ 即具有抑制作用, 说明精浆中的 K^+ 是匙吻鲟精子活动的主要抑制因子 (Linhart et al. 2002), 达氏鲟精浆中 K^+ 浓度为 2.19 ~ 4.09 mmol/L, 远高于精子活力抑制浓度, 因此作者认为, K^+ 是抑制达氏鲟精子在精浆中活动的主要因子。

3.4 达氏鲟精子的形态

达氏鲟精子的外形呈棒状, 辐射对称, 精子由头部、中段和尾部三部分构成。达氏鲟精子的顶体同其他鲟鱼精子顶体的形状和排列相似, 呈帽子形态, 鲟鱼至今已有 2 亿多年的历史, 精子的顶体结构和明显的中段是鲟鱼这种古老鱼类精子的特征。由于鲟鱼卵膜上多受精孔的存在, 精子顶体可以在受精的时候起到加速精子入卵的作用。达氏鲟精子顶体明显小于其他鲟鱼, 这可能与卵子受精孔直径大小相关

表 5 部分鲟鱼精子外部形态基本参数 (单位: μm)Table 5 Morphological parameters of spermatozoa in different sturgeon species (unit: μm)

参数 Parameters	达氏鲟 <i>Acipenser dabryanus</i>	中华鲟 <i>A. sinensis</i> (厉萍 2007)	史氏鲟 <i>A. schrenki</i> (章龙珍等 2008)	湖鲟 <i>A. fulvescens</i> (DiLauro et al. 2000)	短吻鲟 <i>A. brevirostrum</i> (DiLauro et al. 1999)	大西洋鲟 <i>A. sturio</i> (DiLauro et al. 1998)	西伯利亚鲟 <i>A. baerii</i> (Psenicka et al. 2007)
顶体长度 Acrosome length	0.29 ± 0.12	0.54 ± 0.15	0.99 ± 0.06	0.73 ± 0.14	0.78 ± 0.08	0.83 ± 0.11	0.95 ± 0.17
顶体宽度 Acrosome width	0.38 ± 0.05	0.68 ± 0.06	0.87 ± 0.09	0.81 ± 0.07	0.91 ± 0.06	1.00 ± 0.07	0.93 ± 0.12
核区长度 Nuclear length	5.67 ± 0.20		7.29 ± 0.32	5.69 ± 0.43	6.99 ± 0.83	3.15 ± 0.36	4.98 ± 0.83
核前端宽度 Anterior nucleus width	1.05 ± 0.06	0.59 ± 0.05	0.88 ± 0.04	0.68 ± 0.07	0.75 ± 0.11	0.92 ± 0.06	0.87 ± 0.13
核后端宽度 Posterior nucleus width	1.07 ± 0.04	1.84 ± 0.05	1.26 ± 0.06	1.04 ± 0.08	1.21 ± 0.12	0.55 ± 0.08	1.14 ± 0.18
中段长度 Midpiece length	0.95 ± 0.18	2.17 ± 0.36	0.51 ± 0.12	2.68 ± 0.43	1.91 ± 0.35	1.37 ± 0.16	1.09 ± 0.43
中段宽度 Midpiece width	0.52 ± 0.07	1.57 ± 0.27	0.91 ± 0.05	0.70 ± 0.08	0.81 ± 0.09	0.51 ± 0.07	0.81 ± 0.57
鞭毛长 Flagellum length	63.16 ± 2.79	33.2 ± 2.74	36.9 ± 1.25	47.53	36.70	37.08	44.75 ± 4.93
全长 Total length	70.35 ± 2.92	38.70	45.7 ± 0.18	56.63	46.41	42.74	51.76

大部分数据以平均值 ± 标准差方式表示。Data are expressed as Mean ± SD.

(Debus et al. 2002)。达氏鲟精子顶体外侧未观察到后外侧延长物, 这同史氏鲟精子(章龙珍等 2008)相似。达氏鲟精子细胞核的形态和大小与其他鲟鱼相比有一定差异, 达氏鲟精子细胞核的前后直径基本一致, 而其他鲟鱼(DiLauro et al. 1998, 1999, 2000, Psenicka et al. 2007)则呈现前细后粗或前粗后细的形态(表 5, 图版 I: 1)。鲟鱼精子细胞核形态的不同可能与精子细胞核内所含物质形态的不同和大小有关。大西洋鲟(DiLauro et al. 1998)只有 2 个细胞核内沟, 而达氏鲟同其他鲟鱼一样具有 3 个细胞核内沟, 核内沟的功能目前尚不清楚, Cherr 等(1984)认为它在精卵融合过程中起到运输中心粒到卵的作用。线粒体是精子运动产生三磷酸腺苷(adenosine triphosphate,

ATP)的主要地方, 精子中线粒体的数目在不同种属间不同, 在已报道的鲟鱼中, 中华鲟有 3~8 个(厉萍 2007), 西伯利亚鲟有 3~6 个(Psenicka et al. 2007), 观察到达氏鲟有 3 个, 线粒体在不同种属间数目的差异同精子活力之间存在的相关性有待进一步研究。达氏鲟精子的鞭毛长和全长明显长于其他鲟鱼, 鲟鱼鞭毛长度是否同运动速度和寿命有关, 这有待更深入的研究。

参 考 文 献

- Alavi S M H, Cosson J. 2005. Sperm motility and fertilizing ability in the Persian sturgeon *Acipenser persicus*. *Aquaculture Research*, 36(9): 841-850.

- Alavi S M H, Cosson J. 2006. Sperm motility in fishes. (II) Effects of ions and osmolality: A review. *Cell Biology International*, 30(1): 1–14.
- Alavi S M H, Cosson J, Karami M, et al. 2004. Chemical composition and osmolality of seminal fluid of *Acipenser persicus*; their physiological relationship with sperm motility. *Aquaculture Research*, 35(13): 1238–1243.
- Alavi S M H, Gela D, Rodina M, et al. 2011. Roles of osmolality, calcium-potassium antagonist and calcium in activation and flagellar beating pattern of sturgeon sperm. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 160(2): 166–174.
- Alavi S M H, Hatef A, Pšenička M, et al. 2012b. Sperm biology and control of reproduction in sturgeon: (II) sperm morphology, acrosome reaction, motility and cryopreservation. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 22(4): 861–886.
- Alavi S M H, Linhart O, Coward K, et al. 2008. Fish spermatology: implication for aquaculture management// Alavi S M H, Cosson J J, Coward K, et al. *Fish Spermatology*. Oxford: Alpha Science International Ltd, 397–460.
- Alavi S M H, Rodina M, Gela D, et al. 2012a. Sperm biology and control of reproduction in sturgeon: (I) testicular development, sperm maturation and seminal plasma characteristics. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 22(3): 695–717.
- Cherr G N, Clark W H, Jr. 1984. An acrosome reaction in sperm from the white sturgeon, *Acipenser transmontanu*. *Journal of Experimental Zoology*, 232(1): 129–139.
- Debus L, Winkler M, Billard R. 2002. Structure of micropyle surface on oocytes and caviar grains in sturgeons. *International Review of Hydrobiology*, 87(5/6): 585–603.
- DiLauro M N, Kaboord W S, Walsh R A, et al. 1998. Sperm-cell ultrastructure of North American sturgeons. I. The Atlantic sturgeon (*Acipenser oxyrinchus*). *Canadian Journal of Zoology*, 76(10): 1822–1836.
- DiLauro M N, Kaboord W S, Walsh R A. 1999. Sperm-cell ultrastructure of North American sturgeons. II. The shortnose sturgeon (*Acipenser brevirostrum*, Lesueur, 1818). *Canadian Journal of Zoology*, 77(2): 321–330.
- DiLauro M N, Kaboord W S, Walsh R A. 2000. Sperm-cell ultrastructure of North American sturgeon. III. The lake sturgeon (*Acipenser fulvescens* Rafinesque, 1817). *Canadian Journal of Zoology*, 78(3): 438–447.
- Gallis J L, Fedrigo E, Jatteau P, et al. 1991. Siberian sturgeon spermatozoa: effects of dilution, pH, osmotic pressure, sodium and potassium ions on motility// Williot P. *Acipenser*. Bordeaux: Cemagref, 143–151.
- Glogowski J, Kwasnik M, Piros B, et al. 2000. Characterization of rainbow trout milt collected with a catheter: semen parameters and cryopreservation success. *Aquaculture Research*, 31(3): 289–296.
- Kynard B, Zhuang P, Zhang T, et al. 2003. Ontogenetic behavior and migration of Dabry's sturgeon, *Acipenser dabryanus*, from the Yangtze River, with notes on body color and development rate. *Environmental Biology of Fishes*, 66(1): 27–36.
- Li P, Rodina M, Hulak M, et al. 2011. Spermatozoa concentration, seminal plasma composition and their physiological relationship in the endangered stellate sturgeon (*Acipenser stellatus*) and Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*). *Reproduction in Domestic Animals*, 46(2): 247–252.
- Linhart O, Cosson J, Mims S D, et al. 2002. Effects of ions on the motility of fresh and demembrated paddlefish (*Polyodon spathula*) spermatozoa. *Reproduction*, 124(5): 713–719.
- Linhart O, Mims S D, Gomelsky B, et al. 2003. Ionic composition and osmolality of paddlefish (*Polyodon spathula*, *Acipenseriformes*) seminal fluid. *Aquaculture International*, 11(4): 357–368.
- Morisawa M, Hirano T, Suzuki K. 1979. Changes in blood and seminal plasma composition of the mature salmon (*Oncorhynchus keta*) during adaptation to freshwater. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 64(3): 325–329.
- Noveiri S B, Alipour A, Pourkazemi M. 2006. Sperm morphometry, density and spermatocrit study in Persian sturgeon (*Acipenser persicus*). *Journal of Applied Ichthyology*, 22(Suppl 1): 380–383.
- Piros B, Glogowski J, Kolman R, et al. 2002. Biochemical characterization of Siberian sturgeon *Acipenser baeri* and sterlet

- Acipenser ruthenus* milt plasma and spermatozoa. *Fish Physiology and Biochemistry*, 26(3): 289–295.
- Psenicka M, Alavi S M H, Rodina M, et al. 2007. Morphology and ultrastructure of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) spermatozoa using scanning and transmission electron microscopy. *Biology of the Cell*, 99(2): 103–115.
- Psenicka M, Alavi S M H, Rodina M, et al. 2008. Morphology, chemical contents and physiology of chondrosteian fish sperm: a comparative study between Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) and sterlet (*Acipenser ruthenus*). *Journal of Applied Ichthyology*, 24(4): 371–377.
- Toth G P, Ciereszko A, Christ S A, et al. 1997. Objective analysis of sperm motility in the lake sturgeon, *Acipenser fulvescens*: activation and inhibition conditions. *Aquaculture*, 154(3/4): 337–348.
- Wan Q H, Fang S G, Li Y N. 2003. The loss of genetic diversity in Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*, Duméril) as revealed by DNA fingerprinting. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 13(3): 225–231.
- Zeng Q, Ye H, Ludwig A, et al. 2013. Microsatellite development for the endangered Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus* Duméril, 1869) using 454 sequencing. *Journal of Applied Ichthyology*, 29(6): 1219–1221.
- Zhang H, Wei Q W, Du H, et al. 2011. Present status and risk for extinction of the Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*) in the Yangtze River watershed: a concern for intensified rehabilitation needs. *Journal of Applied Ichthyology*, 27(2): 181–185.
- Zhang S H, Luo H, Du H, et al. 2013. Isolation and characterization of twenty-six microsatellite loci for the tetraploid fish Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*). *Conservation Genetics Resources*, 5(2): 409–412.
- Zhuang P, Ke F, Wei Q W, et al. 1997. Biology and life history of Dabry's sturgeon, *Acipenser dabryanus*, in the Yangtze River. *Environmental Biology of Fishes*, 48(1/4): 257–264.
- 丁瑞华. 1994. 四川鱼类志. 成都: 四川科学技术出版社, 29–31.
- 杜军, 赵刚, 龚全, 等. 2009. 达氏鲟亲鱼池塘人工培育试验. *西南农业学报*, 22(3): 824–827.
- 龚全, 赵刚, 杜军, 等. 2012. 达氏鲟肌肉营养成分分析. *西南农业学报*, 25(6): 2372–2375.
- 何斌, 陈先均, 杜军, 等. 2011. 人工养殖条件下达氏鲟生长特性的研究. *西南农业学报*, 24(1): 335–339.
- 黄德祥. 1980. 达氏鲟仔鱼消化系统的发育及摄食初期食性的初步观察. *水产学报*, 4(3): 285–293.
- 贾敬德, 王志玲. 1981. 两种鲟鱼的生态简介. *淡水渔业*, 11(6): 12–13.
- 李萍, 张耀光, 殷江霞, 等. 2005. 华鲮精子活力的观察. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 30(6): 1100–1104.
- 厉萍. 2007. 中华鲟精子结构特征及其精液超低温冷冻保存技术研究. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文.
- 刘军. 2004. 长江上游特有鱼类受威胁及优先保护顺序的定量分析. *中国环境科学*, 24(4): 395–399.
- 刘鹏, 庄平, 章龙珍, 等. 2007. 人工养殖西伯利亚鲟精子超低温冷冻保存研究. *海洋渔业*, 29(2): 20–127.
- 鲁大椿, 傅朝君, 刘宪亭, 等. 1989. 我国主要淡水养殖鱼类精液的生物学特性. *淡水渔业*, 19(2): 34–37.
- 鲁大椿, 刘宪亭, 方建萍, 等. 1992. 我国主要淡水养殖鱼类精浆的元素组成. *淡水渔业*, 22(2): 10–12.
- 罗相忠, 邹桂伟, 潘光碧. 2002. 大口鲶精子生理特性的研究. *淡水渔业*, 32(2): 51–53.
- 史玲玲, 危起伟, 柴毅, 等. 2013. 达氏鲟视网膜早期发育及其相关机能. *中国水产科学*, 20(5): 958–967.
- 四川省长江水产资源调查所. 1988. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究. 成都: 四川科学技术出版社, 154–170.
- 四川省重庆长寿湖渔场水产研究所. 1976. 长江鲟人工繁殖初步试验报告. *水产科技情报*, 4(9): 17–21.
- 孙大江, 韩志忠, 曲秋芝, 等. 2002. 史氏鲟全人工繁殖研究——I. 精子生物学特性观察. *水产学杂志*, 15(2): 32–34.
- 汪登强. 2004. 白鲟、达氏鲟线粒体 DNA 全序列及鲟形目分子进化研究. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文.
- 王丙乾, 曲秋芝, 邱岭泉, 等. 2003. 人工培育与野生施氏鲟精、卵生物学及胚胎发育的比较分析. *大连水产学院学报*, 18(4): 246–251.
- 王永明, 史晋绒, 蒲德永, 等. 2011. 稀有鮰鲫精子主要生物学特性及活力的观察. *淡水渔业*, 41(1): 68–72.
- 谢大敬, 田应培, 陈东禹. 1981. 池养四龄长江鲟的人工催情试验及其精子活力的初步观察. *淡水渔业*, 11(5): 14–17.
- 张四明, 邓怀, 汪登强, 等. 1999b. 7 种鲟形目鱼类亲缘关系的随机扩增多态性 DNA 研究. *自然科学进展*, 9(9): 818–823.

- 张四明, 吴清江, 张亚平. 2000. 中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 及相关种类的 mtDNA 控制区串联重复序列及其进化意义. 中国生物化学与分子生物学报, 16(4): 458–461.
- 张四明, 晏勇, 邓怀, 等. 1999a. 几种鲟鱼基因组大小、倍体的特性及鲟形目细胞进化的探讨. 动物学报, 45(2): 200–206.
- 张四明, 张亚平, 郑向忠, 等. 1999c. 12 种鲟形目鱼类 mtDNA ND4L-ND4 基因的序列变异及其分子系统学. 中国科学: C 辑, 29(6): 608–614.
- 张涛, 庄平, 章龙珍, 等. 2003. 人工养殖施氏鲟和小体鲟精浆微量元素分析. 中国水产科学, 10(4): 350–352.
- 章龙珍, 庄平, 张涛, 等. 2008. 史氏鲟精子超微结构. 海洋渔业, 30(3): 195–201.
- 郑跃平. 2007. 中华鲟精子生理生态特性研究. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文.

图 版 说 明

达氏鲟精子的形态和超微结构

1. 达氏鲟与其他鲟鱼精子外部形态比较: I. 达氏鲟精子, II. 史氏鲟精子 (章龙珍等 2008), III. 短吻鲟精子 (章龙珍等 2008), IV. 湖鲟精子 (章龙珍等 2008), V. 西伯利亚鲟精子 (Psenicka et al. 2007), VI. 中华鲟精子 (厉萍 2007); 2. 达氏鲟精子扫描电镜 (SEM) 观察; 3. 透射电镜 (TEM) 观察顶体与核区的纵切面; 4. TEM 观察核区横切面, 示细胞核内沟贯穿整个核区; 5. TEM 示核植入窝; 6. TEM 观察靠近中段细胞核横切, 示纤维体为双环管结构; 7. TEM 示中段线粒体; 8. TEM 观察精子鞭毛横切, 示 9 + 2 微管结构。

Explanation of Plate

Morphology and ultrastructure of *Acipenser dabryanus*

1. Sperm morphological characteristics: A comparison between *A. dabryanus* and other sturgeons, I. *A. dabryanus*, II. *A. schrenki*, III. *A. brevirostrum*, IV. *A. fulvescens*, V. *A. baerii*, VI. *A. sinensis*; 2. Morphology of *A. dabryanus* sperm under scanning electronic microscope (SEM); 3. Transmission electronic microscopy (TEM) showing the sagittal section between the nucleus and acrosome; 4. TEM transverse section of the nucleus showing the endonuclear canals traversed in the nucleus; 5. TEM showing the implantation fossa region; 6. TEM transverse section of nuclear areas near midpiece showing fibrous body with double annulus tube model; 7. TEM showing the midpiece with mitochondria irregularly dispersed in the cytoplasm; 8. TEM transverse section of flagellum showing 9 + 2 microtubular arrangement and lateral extensions of flagellum.

A. 顶体; Av. 顶体泡; C. 袖套; CM. 中央微管; E. 细胞核内沟; F. 鞭毛; Fb. 纤维体; Fi. 侧鳍; IF. 核植入窝; Md. 中段; Mi. 线粒体; N. 核区; PM. 周围的微管; S. 亚顶体。

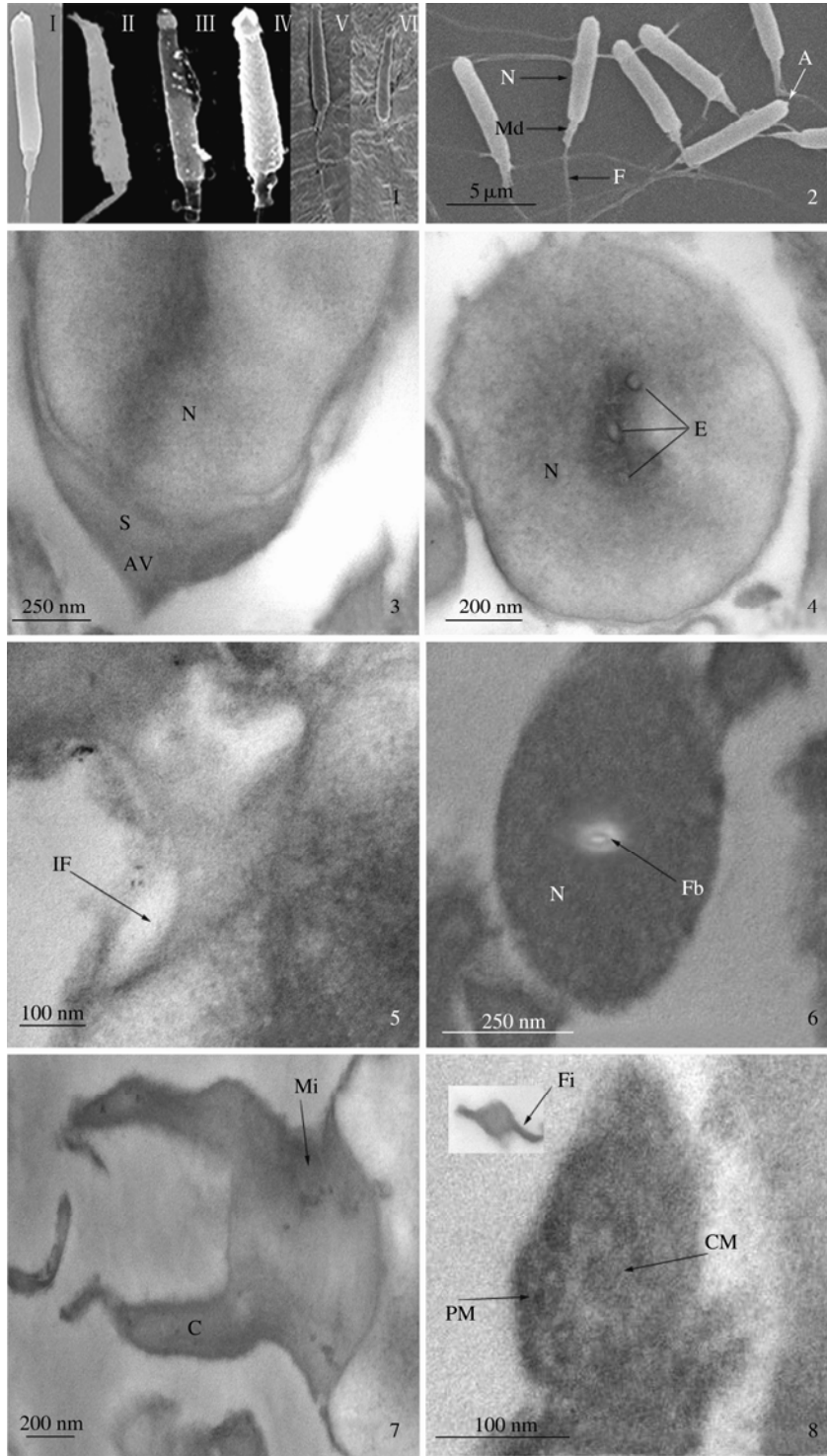
A. Acrosome; Av. Acrosome vesicle; C. Cytoplasmic sheath; CM. Microtubules; E. Endonuclear canals; F. Flagellum; Fb. Fibrous body; Fi. Fins; IF. Implantation fossa; Md. Midpiece; Mi. Mitochondria; N. Nucleus; PM. Microtubules; S. Subacrosome.

陈春娜等：达氏鲟精子的主要生物学特性观察

图版 I

CHEN Chun-Na *et al.*: Biological Characteristics of *Acipenser dabryanus* Sperm

Plate I



图版说明见文后