



川陕哲罗鲑卵子和精子的显微与超微结构观察

刘 钊^{1,2}, 邓 益³, 李 华^{1,2}, 陈叶雨^{1,4}, 杨焕超^{1,2,4}, 陈彦伶^{1,2,4},
卫秦瑶¹, 邹奥斯³, 林 珏^{1,2*}

(¹四川省农业科学院水产研究所/四川省水产研究所, 四川成都 611731; ²长江上游鱼类资源保护与利用四川省重点实验室, 四川成都 611731; ³中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川成都 611130; ⁴长江上游鱼类资源与环境四川省野外科学观测研究站, 四川成都 611731)

摘要:【目的】观察川陕哲罗鲑正常卵子和精子的形态学结构,并比较不同活力精子的超微结构差异,揭示川陕哲罗鲑配子超微结构损伤与其活力下降的内在关联,为优化其人工繁育技术提供理论依据。【方法】以人工养殖性成熟的雌、雄性川陕哲罗鲑为研究对象,通过组织学结合扫描电子显微镜及透射电子显微镜对川陕哲罗鲑正常卵子和精子的形态结构进行观察,同时结合精子活力检测系统比对不同活力精子的超微结构差异。【结果】川陕哲罗鲑正常卵子的核膜溶解,核仁完全消失,在靠近卵膜位置分布有液泡;卵膜表面平整,壁孔大小均匀,受精孔前庭区平坦,精孔管较深,属于II型。川陕哲罗鲑正常精子的结构属于鞭毛型,由头部、中段和尾部3个部分组成;头部呈椭圆形或近圆形,无顶体结构,细胞核内可见空隙(核泡),其染色质呈颗粒状或均质状;中段(颈部)较短,其主要结构包括中心粒复合体及袖套;尾部(鞭毛)细长光滑,鞭毛轴丝具有典型的“9+2”微管结构。扫描电子显微镜观察发现,无活力川陕哲罗鲑精子的头部轮廓不规则、皱缩塌陷,中段连接结构不明显,鞭毛普遍出现断裂和缺失,无法维持正常形态;高活力精子的形态结构完整,头部呈饱满的卵圆形,中段连接紧密,鞭毛细长且无明显损伤,各部分结构清晰。透射电子显微镜观察结果显示,无活力川陕哲罗鲑精子的线粒体结构被破坏,膜膨胀变大破损,线粒体内部电子密度下降,头部表面褶皱不平滑,核膜破裂或消失,染色质松散甚至解体;高活力精子的细胞质致密、均匀饱满,细胞质膜完整,结构正常。【结论】川陕哲罗鲑正常卵子的卵膜表面平整,其受精孔属于II型,核仁完全消失,在靠近卵膜位置分布有液泡;正常精子由头部、中段及鞭毛3个部分构成,具备硬骨鱼类典型的无顶体结构特征,鞭毛轴丝为“9+2”微管排列模式。质膜、核膜、线粒体、鞭毛结构完整性及成熟度直接关联川陕哲罗鲑的精子活力,是评价川陕哲罗鲑精液质量及优化其人工繁育技术的关键形态学指标。

关键词:川陕哲罗鲑; 卵子; 精子; 形态学; 超微结构

中图分类号:S965.199

文献标志码:A

文章编号:2095-1191(2026)06-1718-11

Microstructure and ultrastructure observation of eggs and sperms of *Hucho bleekeri*

LIU Zhao^{1,2}, DENG Yi³, LI Hua^{1,2}, CHEN Ye-yu^{1,4}, YANG Huan-chao^{1,2,4},
CHEN Yan-ling^{1,2,4}, WEI Qin-yao¹, ZOU Ao-si³, LIN Jue^{1,2*}

(¹Fisheries Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Sichuan Fisheries Research Institute, Chengdu, Sichuan 611731, China; ²Fishes Conservation and Utilization in the Upper Reaches of the Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611731, China; ³Chengdu Engineering Corporation Limited, Power China, Chengdu, Sichuan 611130, China; ⁴Fish Resources and Environment in the Upper Reaches of the Yangtze River Observation and Research Station of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611731, China)

收稿日期:2026-03-08

基金项目:国家现代农业产业技术体系四川淡水鱼创新团队项目(SCCXTD-2026-15);四川省农业科学院“10+9”自主创新拓展计划项目(“10+9”ZZCX-64);四川省农业科学院原始创新2035项目(YSCX2035-011);农业农村部渔业渔政管理局物种品种资源保护项目(09260156)

通信作者:林珏(1975-), <https://orcid.org/0009-0000-3843-4056>, 研究员,主要从事濒危物种保护研究工作, E-mail: 76345113@qq.com

第一作者:刘钊(1994-), <https://orcid.org/0009-0001-6537-1166>, 主要从事濒危物种保护研究工作, E-mail: lz754299716@163.com

Abstract: [Objective] This study aimed to observe the normal morphological structure of eggs and sperms of *Hucho bleekeri*, compare differences in ultrastructure of sperms of varying motility, and reveal the intrinsic association between gamete ultrastructure damage and decreased motility in *Hucho bleekeri*, providing theoretical basis for optimizing its artificial breeding techniques. [Method] Sexually mature female and male *Hucho bleekeri* reared under artificial culture conditions were used as research subjects. The morphological structure of normal eggs and sperms in *Hucho bleekeri* was observed through histological analysis with scanning electron microscope and transmission electron microscope. Meanwhile, the differences in ultrastructure of sperms of varying motility were compared using the sperm motility detection system. [Result] In normal eggs of *Hucho bleekeri*, the nuclear membrane was dissolved, the nucleoli completely disappeared, and vacuoles distributed close to egg membrane. The egg membrane surface was smooth, the pores were uniform in size, the vestibular region of micropyle was flat, and the micropylar canal was relatively deep, belonging to type II. The structure of normal sperms in *Hucho bleekeri* was of flagellate type, consisting of three parts (head, midpiece, and tail). The head was elliptical or nearly rounded, without acrosomal structure, and intranuclear space (nuclear vacuole) was visible within the nucleus, with granular or homogeneous chromatin. The midpiece (neck) was short, consisting mainly of the centriolar complex and sleeve. The tail (flagellum) was slender and smooth, with the flagellar axoneme exhibiting the typical “9+2” microtubule arrangement. Scanning electron microscope observations revealed that immotile *Hucho bleekeri* sperms displayed irregular head contours that were shrunken and collapsed, with an inconspicuous midpiece connecting structure, and the flagella were commonly broken and missing, unable to maintain normal morphology; highly motile sperms exhibited intact structure morphology, with plump ovoid heads, a tightly connected midpiece, slender flagella without obvious damage, and clear structures in all parts. Transmission electron microscope observations showed that in immotile *Hucho bleekeri* sperms, the mitochondrial structure was disrupted, the membranes were swollen, enlarged, and ruptured, and the internal electron density of mitochondria was decreased, with a wrinkled and uneven head surface, disrupted or disappeared nuclear membrane, and loose and even disintegrated chromatin; in highly motile sperms, the cytoplasm was dense, uniform, and compact, and the plasma membrane was intact with normal structure. [Conclusion] The oolemma of normal eggs in *Hucho bleekeri* is smooth, and the micropyle belongs to type II, with nucleoli completely disappeared and vacuoles distributed adjacent to egg membrane; normal sperms consist of three parts: the head, midpiece, and flagellum, exhibiting the typical acrosome-free structural characteristic of teleost fish, with the flagellar axoneme in a “9+2” microtubule arrangement. The structure integrity and maturity of the plasma membranes, nuclear membranes, mitochondria, and flagellar structure are directly associated with sperm motility in *Hucho bleekeri*, serving as key morphological indicators for evaluating semen quality and optimizing artificial breeding techniques.

Key words: *Hucho bleekeri*; egg; sperm; morphology; ultrastructure

Foundation items: Sichuan Fresh Water Fish Innovation Team Project of China Agriculture Research System (SCCXTD-2026-15); “10+9” Independent Innovation Extension Project of Sichuan Academy of Agricultural Sciences (“10+9” ZZX-64); Original Innovation 2035 Project of Sichuan Academy of Agricultural Sciences (YSCX2035-011); Measures for Administration of Species and Variety Resources Protection Fee Project, Bureau of Fisheries of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (09260156)

0 引言

【研究意义】川陕哲罗鲑(*Hucho bleekeri*)是我国长江流域特有的淡水鱼类,但由于栖息生境被破坏、水利工程建设及过度捕捞,其野生资源急剧减少,在1988年被列为国家二级保护动物,2012年被列入世界自然保护联盟(IUCN)濒危物种红色名录,至2021年升级为国家一级重点保护野生动物(屈万民等,2024)。目前,川陕哲罗鲑的野生种群数量及分布范围非常不乐观,开展人工繁育与种苗规模化培育是现阶段恢复其野生种群和实现物种保育的核心措施。在鱼类人工繁育过程中,生殖细胞形态学研究是判断卵子和精子质量的关键环节,尤其精子质量是实现鱼类人工繁殖的限制性因子,精子活力、形态完整性、超微结构稳定性直接影响其受精率、孵化率及子代发育水平(季相山等,2007)。因此,对川陕哲罗鲑的卵子和精子进行显微与超微结构观察,并建

立其形态学基础数据,可为后续的配子质量评估提供参考依据,同时为川陕哲罗鲑人工授精技术优化及其精子低温保存技术的完善提供理论指导。【前人研究进展】至今,有关川陕哲罗鲑的研究主要集中在形态发育(祁得林等,2009;杨焕超等,2016)、遗传多样性(汪珂,2016)、人工繁育(杨焕超,2016)、生态保护(屈万民等,2024;李柯懋等,2025)及免疫调控(陈叶雨等,2025)等方面,其中人工繁育的相关研究仅涉及精子超微结构与形态学(郭威等,2016)、早期发育(杨焕超,2016)和仔鱼人工驯养(张晗等,2025),尚缺乏正常卵子结构及精子结构损伤与活力下降的直接形态学证据。在鱼类的人工繁育过程中,配子结构正常是受精生物学的基础。斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)(赵会宏等,2003)、褐牙鲈(*Paralichthys olivaceus*)(章龙珍等,2010)、七带石斑鱼(*Epinephelus septemfasciatus*)(廖光勇等,2011)、半

滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)(穆淑梅等,2011)、条纹锯鲂(*Centropristis striata*)(陈超等,2014)等鱼类的卵子和精子超微结构研究证实,不同鱼类的配子结构形态及其受精时间具有明显的物种差异。在硬骨鱼类中,精子普遍无顶体,其中段富含线粒体,鞭毛轴丝多呈“9+2”的微管结构,且该特征在鲑科(*Salmonidae*)鱼类中已得到广泛证实(刘雪珠和杨万喜,2002;郭威等,2016;郑学斌等,2018)。线粒体作为精子运动的主要供能细胞器,其结构的完整程度直接决定了精子的运动续航能力;细胞膜破损、细胞器退变、氧化应激损伤等均会加速精子活力的衰减,最终导致精子失活(章龙珍等,2008;赵海霞等,2020)。黄晓荣等(2017)研究表明,超低温冷冻对俄罗斯鲟(*Acipenser gueldenstaedti*)精子的损伤主要集中在膜系统,其中心粒等微管系统基本完好;张齐等(2022)研究证实,适宜浓度的 Na^+ 、 K^+ 、葡萄糖、果糖及半乳糖对湖拟鲤(*Rutilus rutilus lacustris*)精子活力均具有较好的促进作用,其作用机理主要是通过改变渗透压来调控湖拟鲤精子活力;朱雅婷等(2022)研究发现,赤点石斑鱼(*Epinephelus akaara*)的精子在 NaCl 、 KCl 、 CaCl_2 溶液中活力较强,在 MgCl_2 和 EDTANa_2 溶液中则呈抑制状态;丁小雨等(2023)研究表明,长期超低温冷冻对鞍带石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus*)的精浆和精子酶活性、精子活力及精子超微结构均有显著影响。【本研究切入点】至今,鲜见川陕哲罗鲑正常配子形态及精子活力差异对应微观结构变化的研究报道,精子质膜、细胞核、线粒体及鞭毛的损伤程度与精子失活的关联性也尚未明确。【拟解决的关键问题】以人工养殖性成熟的雌、雄性川陕哲罗鲑为研究对象,通过组织学结合扫描电子显微镜及透射电子显微镜对川陕哲罗鲑正常卵子和精子的形态结构进行观察,同时结合精子活力检测系统比对不同活力精子的超微结构差异,旨在揭示川陕哲罗鲑配子超微结构损伤与其活力下降的内 在关联,为优化其人工繁育技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

性腺发育成熟的健康川陕哲罗鲑亲本由四川省农业科学院水产研究所(四川省水产研究所)鸡冠山冷水鱼科研基地提供,雌、雄性川陕哲罗鲑亲本各3尾。用干净浴巾包裹鱼体并轻轻挤压鱼体腹部,通过挤压法采集部分新鲜卵子和精液,卵子和精液分装于50 mL的离心管中,按照大于1:20的体积比分别加入电镜保存液和组织固定液。动物试验

由四川省农业科学院水产研究所(四川省水产研究所)动物伦理与福利委员会审查批准,批准号20240226002A。

1.2 精子活力观察

无菌操作吸取新鲜精液,以等量的无菌水稀释激活,光学显微镜下实时观察并记录精子总寿命(激活至完全静止的时长),每组试验重复3次,取平均值。

1.3 透射电子显微镜观察

收集适量川陕哲罗鲑精液置于离心管中,1500 r/min离心10 min,弃精浆;PBS洗涤2次,1500 r/min离心10 min,弃上清液。用吸管沿管壁缓慢加入约1 mL的0.5%戊二醛固定液,轻轻吹打混匀,4℃下静置10 min;然后13000 r/min离心15 min,弃上清液;再用吸管沿管壁缓慢加入50 mL的3.0%戊二醛固定液,1500 r/min离心10 min,弃上清液,加入1.0%四氧化锇再固定。固定好的样品依次进行梯度丙酮脱水,梯度丙酮脱水流程为30%→50%→70%→80%→90%→95%→100%(100%浓度换3次);然后按丙酮:包埋剂Epon-812为3:1、1:1、1:3进行梯度渗透,纯包埋剂包埋过夜。包埋好的样品通过超薄切片机制备60~90 nm的超薄切片,展片后以铜网捞片;室温下先用醋酸铀染色10~15 min,再以柠檬酸铅染色1~2 min(丁小雨等,2023);在透射电子显微镜(JEM-1400Flash)下观察并拍照。除了无需离心处理外,川陕哲罗鲑卵子的其他处理步骤与精液相同。

1.4 扫描电子显微镜观察

收集适量川陕哲罗鲑精液置于离心管中,1500 r/min离心10 min,弃精浆;PBS清洗2次,1500 r/min离心10 min,弃上清液后混匀。使用移液枪在盖玻片上涂片,晾干,缓慢加入3.0%戊二醛固定液。固定好的精子以超纯水清洗3次,每次10 min,用1.0%四氧化锇固定1~2 h,超纯水再清洗3次,每次10 min;然后依次放入梯度乙醇中脱水,梯度乙醇脱水流程为30%→50%→70%→90%→100%(100%浓度换3次,每次15 min)。脱水后的精子盖玻片用导电胶黏于样品座上,放入离子溅射仪中进行喷镀处理(胡春辉等,2016;高翔等,2018),然后在扫描电子显微镜(JSM-IT700HR)下观察并拍照。除了无需离心处理外,川陕哲罗鲑卵子的其他处理步骤与精液相同。

1.5 组织学结构观察

固定好的川陕哲罗鲑卵子经全自动脱水机脱水、包埋、切片后脱蜡至复水,苏木精染色5~10 min,流水洗涤至无色;盐酸酒精分化约3 s,流水洗涤;弱

碱性溶液返蓝,再流水洗涤;伊红染色 3 min;完成梯度乙醇脱水及二甲苯透明后,以中性树胶封片。在光学显微镜下观察川陕哲罗鲑卵子的组织学形态,并通过显微成像系统采集图像。

2 结果与分析

2.1 川陕哲罗鲑卵子显微与超微结构的观察结果

川陕哲罗鲑正常卵子的核膜溶解,核仁完全消失,细胞质由大量嗜酸性较强的均质物质构成,且在靠近卵膜位置分布有液泡(图1)。扫描电子显微镜

观察发现,川陕哲罗鲑正常卵子的卵膜表面平整,壁孔大小均匀,受精孔区周围分布有数量不等的突起及大小不等的壁孔,前庭区平坦,精孔管较深(图2)。透射电子显微镜观察结果(图3)显示,川陕哲罗鲑正常卵子的卵膜较厚,分布有大小均等的空隙,卵膜内部未观察到卵黄颗粒及液泡等结构。

2.2 川陕哲罗鲑精子超微结构的观察结果

扫描电子显微镜观察结果(图4)显示,川陕哲罗鲑正常精子的结构属于鞭毛型,由头部、中段和尾部3个部分组成,与郭威等(2016)的研究结果一致。精

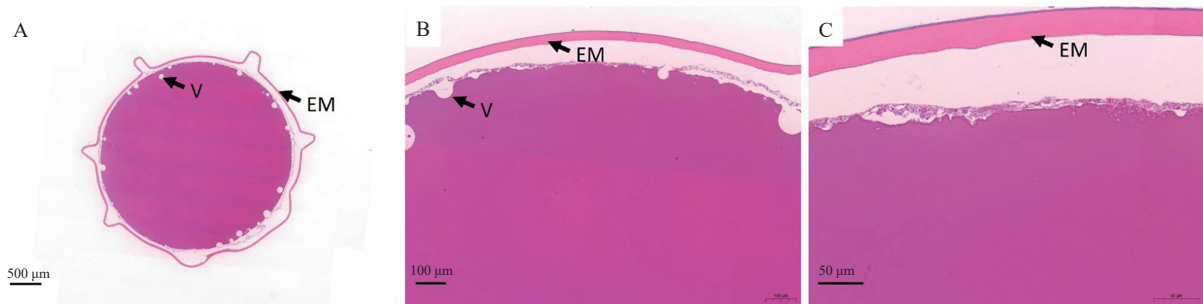


图1 川陕哲罗鲑正常卵子的组织学结构观察结果
Fig. 1 Histological structure observation results of normal egg of *Hucho bleakeri*
EM: 卵膜; V: 液泡
EM: Egg membrane; V: Vacuole

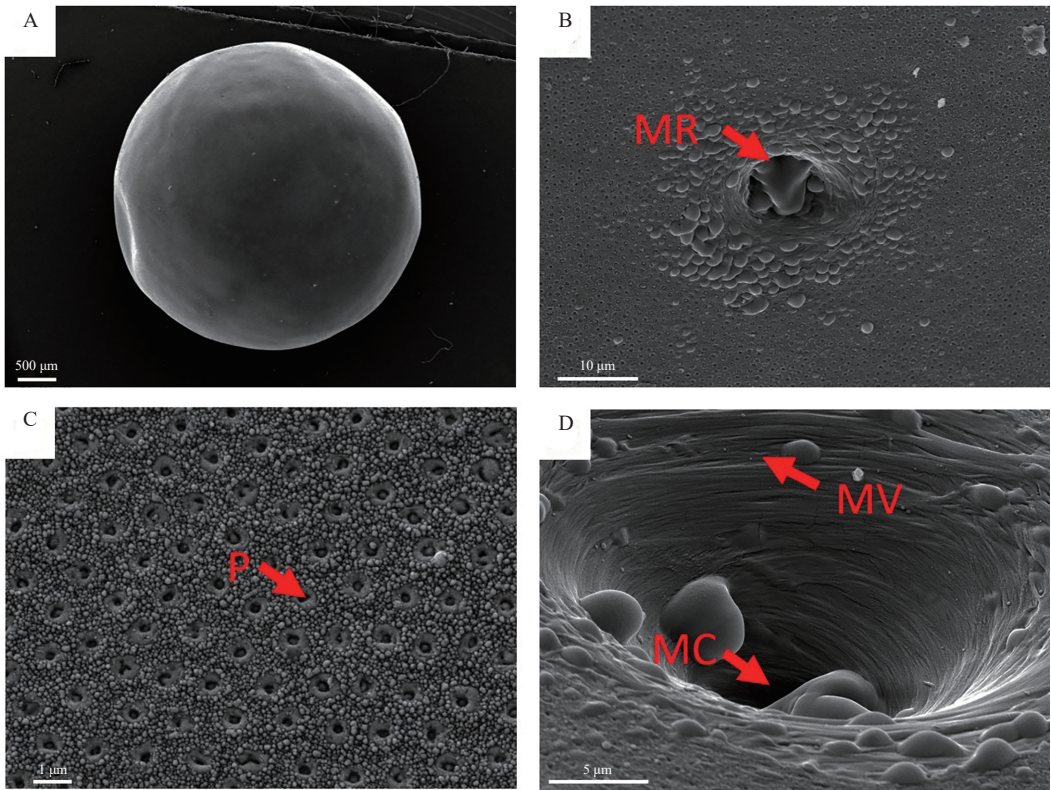


图2 川陕哲罗鲑正常卵子的扫描电子显微镜观察结果
Fig. 2 Scanning electron microscope observation results of normal egg of *Hucho bleakeri*
A: 卵子整体; B、D: 受精孔区; C: 卵膜表面(壁孔)。MR: 受精孔区; P: 壁孔; MV: 前庭区; MC: 精孔管
A: Egg overview; B, D: Micropylar region ; C: Egg membrane surface (pore). MR: Micropylar region; P: Pore; MV: Vestibular region; MC: Micropylar canal

子头部呈椭圆形或近圆形,无顶体结构,细胞质膜表面不光滑;精子中段(颈部)是附着在头部后端的一个小球形结构,与精子尾部(鞭毛)相连,一般中段不明显;尾部(鞭毛)细长光滑,是精子运动的主要器官。透射电子显微镜观察发现,川陕哲罗鲑正常精子由头部、中段(颈部)和鞭毛组成(图5),与多数鲑

科鱼类的精子结构(张永泉等,2011;谷伟等,2014;郭威等,2016;郑学斌等,2018)基本一致。精子头部细胞核纵切面呈扁卵圆形,细胞核后端正中有很浅的植入窝;核膜与细胞质膜间存在较窄的间隙,细胞质膜表面凹凸不平;细胞核内可见空隙(核泡),其染色质呈颗粒状或均质状。精子中段(颈部)较短,其

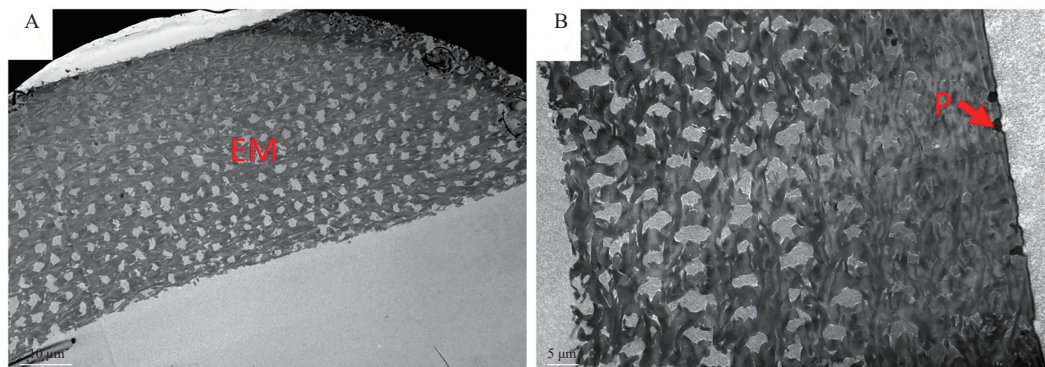


图3 川陕哲罗鲑正常卵子的透射电子显微镜观察结果

Fig. 3 Transmission electron microscope observation results of normal egg of *Hucho bleekeri*

EM: 卵膜; P: 壁孔

EM: Egg membrane; P: Pore

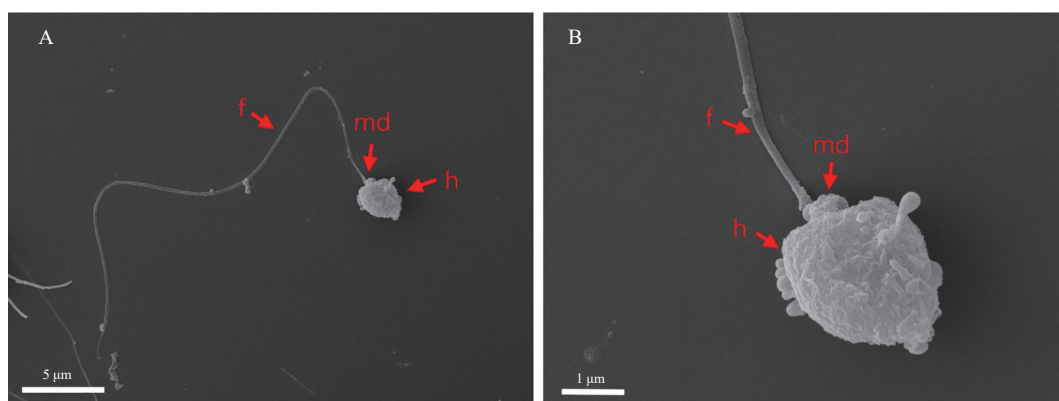


图4 川陕哲罗鲑正常精子的扫描电子显微镜观察结果

Fig. 4 Scanning electron microscope observation results of normal sperm of *Hucho bleekeri*

h: 头部; md: 中段(颈部); f: 尾部(鞭毛)。图6和图7同

h: Head; md: Midpiece (neck); f: Tail (flagellum). The same was applied in Fig. 6 and Fig. 7

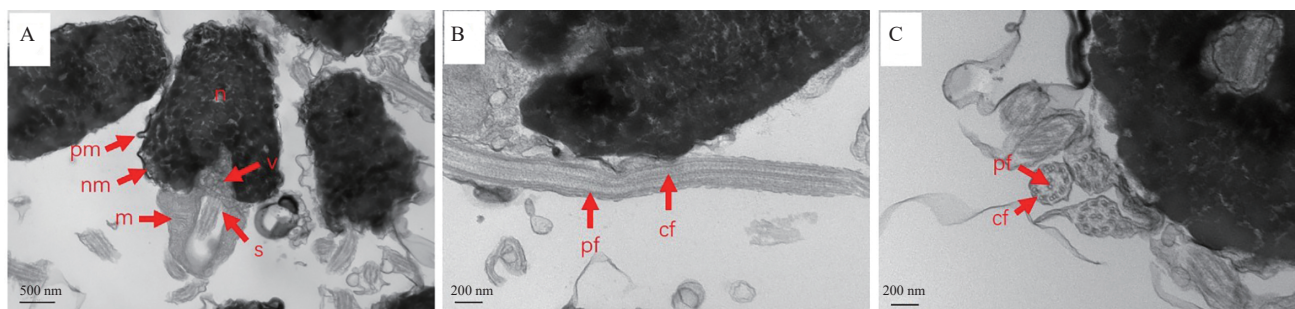


图5 川陕哲罗鲑正常精子的透射电子显微镜观察结果

Fig. 5 Transmission electron microscope observation results of normal sperm of *Hucho bleekeri*

A: 精子头部和中段; B: 精子鞭毛(纵切); C: 精子鞭毛(横切)。n: 细胞核; m: 线粒体; s: 袖套腔; v: 囊泡; pm: 细胞质膜; nm: 核膜; cf: 中央纤维; pf: 外周纤维。图8和图9同

A: Head and midpiece of sperm; B: Sperm flagellum (longitudinal section); C: Sperm flagellum (transverse section). n: Nucleus; m: Mitochondrion; s: Sleeve cavity; v: Vesicle; pm: Plasma membrane; nm: Nucleus membrane; cf: Central fiber; pf: Peripheral fiber. The same was applied in Fig. 8 and Fig. 9

主要结构包括中心粒复合体(近端中心粒和远端中心粒)及袖套;袖套中含有线粒体,呈单层环状排列,可见清晰的线粒体嵴。精子鞭毛细长,从头部后端的植入窝伸出;鞭毛轴丝具有典型的“9+2”微管结构,外周纤维由9组二联微管组成,中央纤维则是1组微管对;在鞭毛横切面上可观察到轴丝两侧具有发达的侧鳍,而侧鳍的基部有囊泡。

2.3 不同质量川陕哲罗鲑精子活力的检测结果

3尾雄性川陕哲罗鲑的精子活力存在明显个体差异。其中,1[#]川陕哲罗鲑的精子激活后无任何运动能力,完全失活;2[#]川陕哲罗鲑精子激活后的运动持续时间为92 s,活力中等;3[#]川陕哲罗鲑精子激活后的运动状态良好,运动持续时间长达201 s,综合活力最优。

2.4 不同质量川陕哲罗鲑精子的超微结构比较

通过比对3尾川陕哲罗鲑精子的扫描电子显微镜观察结果,发现不同活力的川陕哲罗鲑精子在形态结构完整性上存在明显差异。1[#]川陕哲罗鲑精子(无活力)的头部轮廓不规则、皱缩塌陷,中段连接结构不明显,鞭毛普遍出现断裂和缺失,无法维持正常形态(图6);2[#]川陕哲罗鲑精子(中等活力)的头部与

中段结构基本完整,但其周边存在一层透明的胶质(图7);3[#]川陕哲罗鲑精子(高活力)的形态结构完整,头部呈饱满的卵圆形,中段连接紧密,鞭毛细长且无明显损伤,各部分结构清晰(图4)。可见,川陕哲罗鲑精子的活力与其结构完整性呈正相关。

通过比对3尾川陕哲罗鲑精子的透射电子显微镜观察结果,发现无活力与高活力的川陕哲罗鲑精子头部细胞质差异明显。1[#]川陕哲罗鲑精子(无活力)的线粒体结构被破坏,膜膨胀变大破损,线粒体内部电子密度下降,染色较浅;细胞质膜破损变形,精子头部表面褶皱不平滑,细胞质流失;核膜破裂或消失,染色质松散甚至解体,头部的囊泡数量增多(图8)。2[#]川陕哲罗鲑精子(中等活力)整体细胞器与膜结构基本完整,仅存在轻微损伤(图9)。3[#]川陕哲罗鲑精子(高活力)的细胞质致密、均匀饱满,细胞质膜完整,结构正常(图5)。说明精子活力与其细胞质致密度、质膜完整性及细胞器等呈正相关。

3 讨论

卵膜是鱼类卵子最外层具有一定厚度的复杂蛋白质壳(Iconomidou et al., 2000)。卵膜上的受精孔

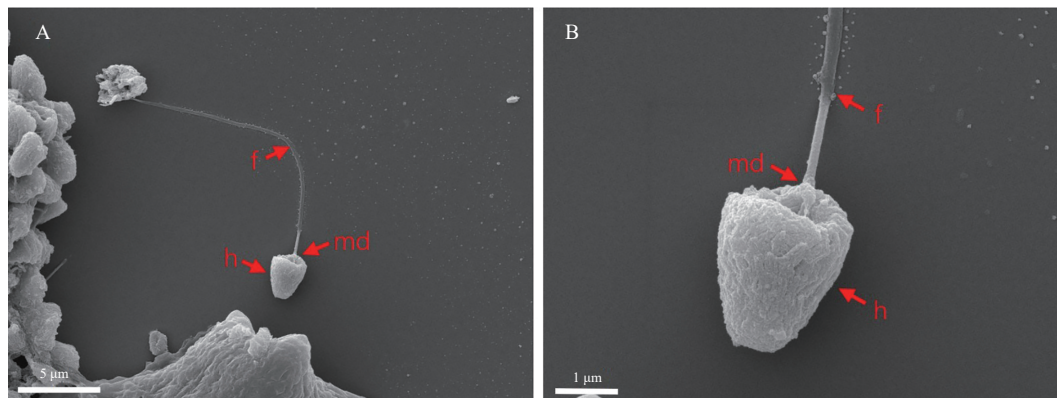


图6 1[#]川陕哲罗鲑精子(无活力)的扫描电子显微镜观察结果

Fig. 6 Scanning electron microscope observation results of sperm (immotile) 1[#] of *Hucho bleekeri*

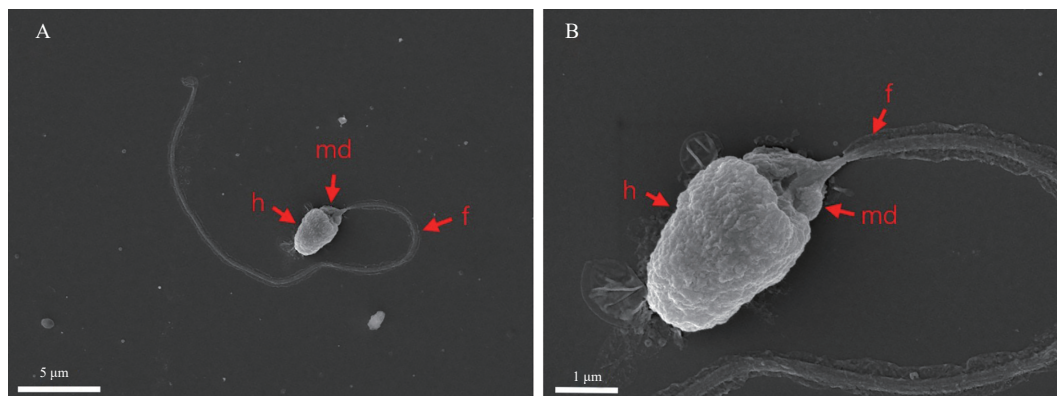


图7 2[#]川陕哲罗鲑精子(中等活力)的扫描电子显微镜观察结果

Fig. 7 Scanning electron microscope observation results of sperm (moderately motile) 2[#] of *Hucho bleekeri*

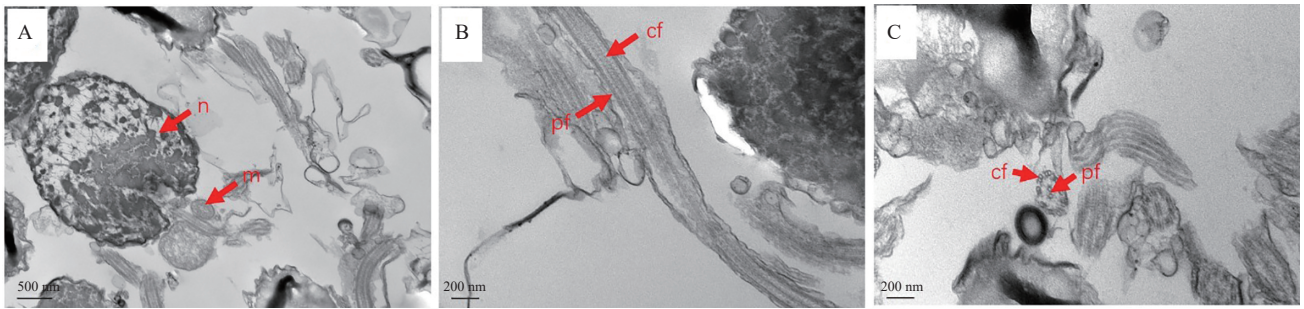


图8 1#川陕哲罗鲑精子(无活力)透射电子显微镜观察结果

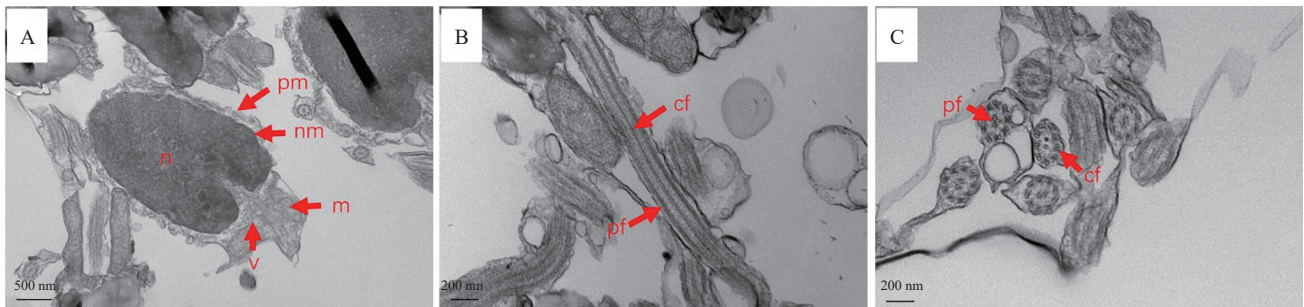
Fig. 8 Transmission electron microscope observation results of sperm (immotile) 1# of *Hucho bleekeri*

图9 2#川陕哲罗鲑精子(中等活力)透射电子显微镜观察结果

Fig. 9 Transmission electron microscope observation results of sperm (moderately motile) 2# of *Hucho bleekeri*

是鱼类精子通过卵膜完成受精的唯一通道(Otani et al., 2009),根据受精孔形状可划分为3类:(1)I型,受精孔前庭较深,精孔管孔道较短;(2)II型,受精孔前庭平坦,精孔管孔道较长;(3)III型,受精孔周围的卵膜具有放射状排列的沟槽,或呈深凹陷的沉孔状(Yanagimachi et al., 2017)。川陕哲罗鲑卵子的受精孔前庭区平坦,精孔管较深,属于II型。此外,川陕哲罗鲑正常卵子的核膜溶解,核仁完全消失,在靠近卵膜位置分布有液泡,与花鲢(*Hemibarbus maculatus*)成熟期卵母细胞的细胞核消失、卵黄颗粒体积增大并充满整个卵母细胞(王静等, 2020),七彩神仙鱼(*Symphysodon aequifasciatus*)成熟期卵母细胞核膜溶解、核仁完全消失、卵黄颗粒几乎充满整个卵母细胞、液泡沿卵膜分布(英娜等, 2022)的结果相似。

精子形态是区分物种的重要依据,软体动物的精子可分为原生型和修饰型(黄瑞等, 2021),哺乳动物的精子存在顶体结构(曾玉峰等, 2010),而鱼类的精子除了几种鲟形目(*Acipenseriformes*)鱼类外,其头部基本无顶体结构(刘雪珠和杨万喜, 2002; 章龙珍等, 2008; 张永泉等, 2011; 谷伟等, 2014; 黄晓荣等, 2017)。本研究通过透射电子显微镜和扫描电子显微镜观察川陕哲罗鲑精子的超微结构,结果发现其精子无顶体结构,鞭毛轴丝具有典型的“9+2”微管结构,与白斑红点鲑(*Salvelinus leucomaenis*) (张永泉等, 2011)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*) (谷伟等,

2014)等鲑形目(*Salmoniformes*)鱼类精子的典型结构特征一致。

质膜是维持精子细胞内环境稳定的重要屏障,其完整性对精子的正常代谢、运动等具有重要作用,也是决定人工授精成功与否的关键条件(赵建清, 2021)。韩龙江等(2014)研究证实,太平洋鲑(*Gadus macrocephalus*)精子冷冻后其细胞膜、线粒体和鞭毛均有不同程度的损伤,具体表现为细胞膜破裂、线粒体脱落变形、鞭毛断裂等;长牡蛎(*Crassostrea gigas*)精子在超低温冷冻后则出现不同程度的染色质破裂,细胞核变形、核内空泡增多,甚至整体分解,质膜破裂消失,头部顶体膜破损,线粒体肿胀(韩龙江等, 2017)。黄晓荣等(2017)研究表明,俄罗斯鲟精子经超低温冷冻后其活力下降,主要表现为质膜、核膜、线粒体膜、顶体膜、鞭毛外膜等膜结构囊泡化,顶体表面破损、断裂,内容物消散,线粒体嵴消失。丁小雨等(2023)研究发现,鞍带石斑鱼精子的激活率随超低温冷冻时间的延长而降低,且经超低温冷冻后精子形态结构不完整、变形严重,质膜破损变形,线粒体肿大,鞭毛断裂或脱落等。本研究通过对比3尾川陕哲罗鲑精子的超微结构发现,高活力精子的形态结构完整,细胞质膜完整,头部呈饱满的卵圆形,细胞质致密、均匀饱满,中段连接紧密,鞭毛细长且无明显损伤,各部分结构清晰;中等活力精子的整体细胞器与膜结构基本完整,仅存在轻微损伤,

鞭毛周边存在一层透明的胶质;无活力精子的头部表面褶皱不平滑,轮廓不规则、皱缩塌陷,质膜结构破裂或破损变形,线粒体结构被破坏,膜膨胀变大破损,线粒体内部电子密度下降,染色较浅,鞭毛普遍出现断裂和缺失,无法维持正常形态。可见,川陕哲罗鲑精子质膜的完整程度与其活力水平呈正相关,与韩龙江等(2014,2017)、黄晓荣等(2017)、丁小雨等(2023)的研究结果一致。

精子中段的线粒体是其能量代谢的核心场所,可为鞭毛持续摆动提供能量,其结构完整性直接决定了精子的运动寿命。线粒体肿胀、嵴溶解、膜破裂是精子活力衰退的标志性超微结构变化,线粒体受损导致能量合成功能障碍,无法为精子运动持续提供能量,最终造成鞭毛运动停滞(李霞等,2012;黄晓荣等,2017;张莹等,2020;丁小雨等,2023)。中间球海胆(*Strongylocentrotus intermedius*)精子在不加抗冻剂冷冻后其线粒体结构不完整,内部出现空泡,甚至线粒体内膜破损,内嵴减少呈弥散状(李霞等,2012);俄罗斯鲟精子经超低温冷冻后其形态结构发生明显变化,主要表现为线粒体质膜破损,内膜嵴弥散,线粒体脱落(黄晓荣等,2017);许氏平鲱(*Sebastes schlegelii*)精子冷冻后其线粒体鞘撕裂或膨胀,少数线粒体丢失,内膜嵴减少或消失,线粒体呈空泡状(张莹等,2020);鞍带石斑鱼精子经长时间超低温冷冻后其线粒体膨大破损,结构变化明显(丁小雨等,2023)。本研究也发现,无活力的川陕哲罗鲑精子普遍头部萎缩、鞭毛断裂,且外部形态缺陷与内部细胞器退变的结果相吻合。

精子运动主要依靠尾部鞭毛的摆动来实现,鞭毛结构的完整性与精子活力水平呈正相关。俄罗斯鲟精子经冷冻后其鞭毛与中段的连接部位普遍发生断裂(黄晓荣等,2017);许氏平鲱精子在超低温冷冻后多数出现尾部断裂,基体中轴丝分布混乱,失去典型的“9+2”微管结构(张莹等,2020);兰州鲇(*Silurus lanzhouensis*)精子在超低温冷冻后其鞭毛外膜变形脱离,中段位置断裂,但微管结构基本完好(邢露梅等,2021);鞍带石斑鱼精子经超低温冷冻后其鞭毛与头部及中段脱离现象明显,但微管结构仍保持完整(丁小雨等,2023)。本研究中,高活力川陕哲罗鲑精子的鞭毛细长、结构清晰、无明显损伤,摆动有力且方向性强;中等活力精子的鞭毛基本完整,但存在轻微的膜损伤或胶质附着,运动能力有所下降;无活力精子的鞭毛普遍出现断裂和缺失,无法维持正常形态。鞭毛断裂不仅导致精子丧失运动能力,断裂的鞭毛片段还可能干扰其他精子正常运动,进而降

低精液质量。中等活力川陕哲罗鲑精子存在轻微胶质附着,无明显膜破裂和细胞器坏死,可能源于精子细胞变态成熟过程中的核浓缩机制。在精子细胞的变态成熟过程中,通过核浓缩以实现染色质致密固缩,定型精子头部结构,同时细胞大量丢弃多余细胞质(杨万喜等,2000;尤永隆等,2002;Uribe et al.,2014)。在成熟度不够的情况下,鞭毛周围会残留一部分透明的细胞质,增加精子运动负担,而导致其摆动无法像成熟精子一样有力。

4 结论

川陕哲罗鲑正常卵子的卵膜表面平整,其受精孔属于II型,核仁完全消失,在靠近卵膜位置分布有液泡;正常精子由头部、中段及鞭毛三部分构成,具备硬骨鱼类典型的无顶体结构特征,鞭毛轴丝为“9+2”微管排列模式。质膜、核膜、线粒体、鞭毛结构完整性及成熟度直接关联川陕哲罗鲑的精子活力,是评价川陕哲罗鲑精液质量及优化其人工繁育技术的关键形态学指标。

参考文献(References):

- 陈超,贾瑞锦,李炎璐,吴雷明,宋振鑫,赵从明,吴坚. 2014. 条纹锯精子超微结构及其入卵过程的电镜观察[J]. 渔业科学进展,35(5):97-103. [Chen C, Jia R J, Li Y L, Wu L M, Song Z X, Zhao C M, Wu J. 2014. Observations on the spermatozoon, egg and fertilization process of *Centropomus striata* using the electronic microscopic technique [J]. Progress in Fishery Sciences, 35(5):97-103.] doi: 10.11758/yykxjz.20140514.
- 陈叶雨,吴晓云,杨焕超,刘钊,陈彦伶,林珏,李华,文典,王渝栋,谭平. 2025. 川陕哲罗鲑髓样分化因子88的克隆、表达及免疫功能分析[J]. 西南农业学报,38(1):182-191. [Chen Y Y, Wu X Y, Yang H C, Liu Z, Chen Y L, Lin J, Li H, Wen D, Wang Y D, Tan P. 2025. Cloning, expression and immune function of myeloid differentiation factor 88 in Sichuan taimen (*Hucho bleekeri*) [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 38(1):182-191.] doi:10.16213/j.cnki.scjas.2025.1.020.
- 丁小雨,李振通,段鹏飞,邱弈树,王心怡,黎琳琳,王林娜,刘阳,李文升,王清滨,赵侠,田永胜,李胜忠. 2023. 长期超低温冷冻保存对鞍带石斑鱼精子超微结构及酶活性的影响[J]. 水产学报,47(7):48-64. [Ding X Y, Li Z T, Duan P F, Qiu Y S, Wang X Y, Li L L, Wang L N, Liu Y, Li W S, Wang Q B, Zhao X, Tian Y S, Li S Z. 2023. Effects of long-term cryopreservation on ultrastructure and enzyme activity of *Epinephelus lanceolatus* sperm [J]. Journal of Fisheries of China, 47(7):48-64.] doi: 10.11964/jfc.20221113796.
- 高翔,朱紫瑞,孙伟,郭娟. 2018. 场发射扫描电镜荷电现象的

- 研究及参数优化[J]. 真空科学与技术学报, 38(11): 1008-1012. [Gao X, Zhu Z R, Sun W, Guo J. 2018. Solutions to charge accumulation on low conductivity surfaces in imaging with scanning electron microscopy[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 38(11): 1008-1012.] doi:10.13922/j.cnki.cjovst.2018.11.16.
- 谷伟, 张永泉, 户国, 徐革锋, 王炳谦. 2014. 虹鳟精子的扫描和透射电镜观察[J]. 水产学杂志, (5): 24-27. [Gu W, Zhang Y Q, Hu G, Xu G F, Wang B Q. 2014. Scanning and transmission electron microscopic observation of spermatozoon in rainbow trout [J]. Chinese Journal of Fisheries, (5): 24-27.] doi: 10.3969/j.issn.1005-3832.2014.05.006.
- 郭威, 厉萍, 杨焕超, 杜浩, 吴金明, 危起伟. 2016. 川陕哲罗鲑精子超微结构及形态学研究[J]. 四川动物, 35(4): 550-555. [Guo W, Li P, Yang H C, Du H, Wu J M, Wei Q W. 2016. Study on the morphology and ultrastructure of *Hucho bleekeri* Kimura spermatozoa [J]. Sichuan Journal of Zoology, 35(4): 550-555.] doi: 10.11984/j.issn.1000-7083.20160047.
- 韩龙江, 刘清华, 许飞, 温海深, 李军. 2017. 长牡蛎精子超低温冷冻后超微结构损伤研究[J]. 水生生物学报, 41(1): 220-227. [Han L J, Liu Q H, Xu F, Wen H S, Li J. 2017. Study on ultrastructure observation of fresh and cryopreserved sperm in *Crassostrea gigas* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 41(1): 220-227.] doi: 10.7541/2017.28.
- 韩龙江, 刘清华, 于道德, 官曙光, 纪利芹, 王文琪, 刘名, 温海深, 李军. 2014. 太平洋鲑(*Gadus macrocephalus*)精液超低温冷冻方法的建立及精子超微结构分析[J]. 海洋与湖沼, 45(4): 789-797. [Han L J, Liu Q H, Yu D D, Guan S G, Ji L Q, Wang W Q, Liu M, Wen H S, Li J. 2014. Cryopreservation and ultrastructure of *Gadus macrocephalus* sperm [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 45(4): 789-797.] doi: 10.11693/hyhz20130700086.
- 胡春辉, 徐青, 孙璇, 于浩, 袁玉清. 2016. 几种典型扫描电镜生物样本制备[J]. 湖北农业科学, 55(20): 5389-5392. [Hu C H, Xu Q, Sun X, Yu H, Yuan Y Q. 2016. Several biological typical samples preparation methods of scanning electron microscope [J]. Hubei Agricultural Sciences, 55(20): 5389-5392.] doi: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2016.20.056.
- 黄瑞, 黄标武, 李林春, 李云飞. 2011. 近江蛭精子超微形态结构观察及与缢蛭精子的比较[J]. 水产学报, 35(1): 58-64. [Huang R, Huang B W, Li L C, Li Y F. 2011. Comparative ultrastructure of spermatozoa of *Sinonovacula rivularis* sp. nov. and *Sinonovacula constricta* [J]. Journal of Fisheries of China, 35(1): 58-64.] doi: 10.3724/SP.J.1231.2011.17128.
- 黄晓荣, 张涛, 冯广朋, 赵峰, 刘鉴毅, 王好, 章龙珍, 庄平. 2017. 超低温冷冻对俄罗斯鲑精子形态结构的影响[J]. 海洋渔业, 39(6): 640-648. [Huang X R, Zhang T, Feng G P, Zhao F, Liu J Y, Wang Y, Zhang L Z, Zhuang P. 2017. Effects of cryopreservation on morphology and ultrastructure of *Acipenser gueldenstaedti* spermatozoa [J]. Marine Fisheries, 39(6): 640-648.] doi: 10.3969/j.issn.1004-2490.2017.06.005.
- 季相山, 陈松林, 赵燕, 田永胜. 2007. 鱼类精子质量评价研究进展[J]. 中国水产科学, 14(6): 1048-1054. [Ji X S, Chen S L, Zhao Y, Tian Y S. 2007. Review of assessing sperm quality in fish [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 14(6): 1048-1054.] doi: 10.3321/j.issn:1005-8737.2007.06.025.
- 李柯懋, 简生龙, 魏金良, 薛长安, 韩庆祥, 王贺崑元. 2025. 长江源区土著鱼类优先保护等级定量研究[J]. 人民长江, 56(9): 150-157. [Li K M, Jian S L, Wei J L, Xue C A, Han Q X, Wang H K Y. 2025. Quantitative study on priority conservation levels of indigenous fish species in source region of Yangtze River [J]. Yangtze River, 56(9): 150-157.] doi: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2025.09.018.
- 李霞, 刘志丹, 秦艳杰. 2012. 中间球海胆精子超低温冷冻损伤的研究[J]. 大连海洋大学学报, 27(2): 105-109. [Li X, Liu Z D, Qin Y J. 2012. Cryodamage of sperm in sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 27(2): 105-109.] doi: 10.3969/j.issn.1000-9957.2012.02.003.
- 廖光勇, 区又君, 李加儿, 陈超, 庄志猛. 2011. 七带石斑鱼精子的超微结构[J]. 上海海洋大学学报, 20(1): 71-75. [Liao G Y, Ou Y J, Li J E, Chen C, Zhuang Z M. 2011. Ultrastructure of spermatozoa in *Epinephelus septemfasciatus* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 20(1): 71-75.]
- 刘雪珠, 杨万喜. 2002. 硬骨鱼类精子超微结构及其研究前景[J]. 东海海洋, 20(3): 32-37. [Liu X Z, Yang W X. 2002. Recent progresses of study on spermatozoon structure of teleost and its application in reproductive evolution studies [J]. Journal of Marine Sciences, 20(3): 32-37.] doi: 10.3969/j.issn.1001-909X.2002.03.004.
- 穆淑梅, 刘美, 李凤超, 康现江, 郭明申. 2011. 半滑舌鳎胚胎发育中后期卵黄囊超微结构观察[J]. 四川动物, 30(5): 747-750. [Mu S M, Liu M, Li F C, Kang X J, Guo M S. 2011. The ultrastructure of the yolk sac in the middle to late embryonic stages of *Cynoglossus semilaevis* [J]. Sichuan Journal of Zoology, 30(5): 747-750.] doi: 10.3969/j.issn.1000-7083.2011.05.017.
- 祁得林, 晁燕, 杨成, 申质新, 唐文家. 2009. 川陕哲罗鲑 *Cyt b* 基因克隆及其在鲑亚科中的系统发育关系[J]. 四川动物, 28(6): 805-810. [Qi D L, Chao Y, Yang C, Shen Z X, Tang W J. 2009. Cloning of mitochondrial *Cytochrome b* gene of *Hucho bleekeri* and its phylogenetic relationships in Subfamily Salmonina [J]. Sichuan Journal of Zoology, 28(6): 805-810.]
- 屈万民, 杨海乐, 杜浩, 刘旭, 吴金明. 2024. 基于Ecopath模型的太白河川陕哲罗鲑环境容纳量的估算[J]. 水生生物学报, 48(10): 1706-1715. [Qu W M, Yang H L, Du H, Liu X, Wu J M. 2024. Estimation of environmental capacity of *Hucho bleekeri* in Taibai River based on Ecopath model [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 48(10): 1706-1715.] doi:

- 10.7541/2024.2023.0277.
- 汪珂. 2016. 川陕哲罗鲑种群遗传学及分子系统发育研究[D]. 南京: 南京农业大学. [Wang K. 2016. Population genetics and molecular phylogeny of *Hucho bleekeri* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University.] doi: 10.7666/d.Y3290154.
- 王静, 刘慧芬, 刘梦园, 程凯歌, 马晓, 于森, 赵艳静, 聂国兴, 李学军. 2020. 花鲢卵母细胞发育的组织学和超微结构观察[J]. 中国水产科学, 27(2): 158-165. [Wang J, Liu H F, Liu M Y, Cheng K G, Ma X, Yu M, Zhao Y J, Nie G X, Li X J. 2020. Histological and ultrastructural study of oocyte development in the spotted steed, *Hemibarbus maculatus* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 27(2): 158-165.] doi: 10.3724/SP.J.1118.2020.19124.
- 邢露梅, 肖伟, 李兰兰, 张利平, 赛清云, 俞兆曦, 吴旭东, 连总强. 2021. 兰州鲑精液超低温冷冻保存技术研究及细胞损伤检测[J]. 水生生物学报, 45(3): 547-556. [Xing L M, Xiao W, Li L L, Zhang L P, Sai Q Y, Yu Z X, Wu X D, Lian Z Q. 2021. Study of sperm cryopreservation in *Silurus lanzhouensis* and detection of cell damages after cryopreservation [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 45(3): 547-556.] doi: 10.7541/2021.2020.020.
- 杨焕超, 杨晓鸽, 吴金明, 王成友, 危起伟. 2016. 川陕哲罗鲑个体的早期发育观察[J]. 中国水产科学, 23(4): 759-770. [Yang H C, Yang X G, Wu J M, Wang C Y, Wei Q W. 2016. Early development of *Hucho bleekeri* Kimura [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 23(4): 759-770.] doi: 10.3724/SP.J.1118.2016.15415.
- 杨焕超. 2016. 陕西太白河川陕哲罗鲑人工繁育和早期发育[D]. 武汉: 华中农业大学. [Yang H C. 2016. The artificial breeding and early development of Sichuan taimen (*Hucho bleekeri*) in Taibai River of Shaanxi Province [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University.] doi: 10.7666/d.Y3052503.
- 杨万喜, 应雪萍, 竺俊全, 周宏. 2000. 硬骨鱼类精子发生及其在系统演化研究中的应用前景[J]. 海洋学研究, 18(3): 53-58. [Yang W X, Ying X P, Zhu J Q, Zhou H. 2000. Spermatogenesis of teleost and its prospective application in the study of phylogenetic development [J]. Journal of Marine Sciences, 18(3): 53-58.] doi: 10.3969/j.issn.1001-909X.2000.03.009.
- 英娜, 王元, 唐成婷, 宋学峰, 秦搏, 吴艳庆, 杨立国, 朱建辉, 房文红. 2022. 七彩神仙鱼卵母细胞的组织和超微结构观察[J]. 水产学杂志, 35(6): 89-93. [Ying N, Wang Y, Tang C Y, Song X F, Qin B, Wu Y Q, Yang L G, Zhu J F, Fang W H. 2022. Histology and ultrastructure of oocyte development in cultured *Symphysodon aequifasciatus* [J]. Chinese Journal of Fisheries, 35(6): 89-93.] doi: 10.3969/j.issn.1005-3832.2022.06.013.
- 尤永隆, 林丹军, 钟秀容. 2002. 卵胎生硬骨鱼褐菖鲈精子发生的超微结构研究[J]. 热带海洋学报, 21(1): 70-75. [You Y L, Lin D J, Zhong X R. 2002. Ultrastructure of spermatogenesis of ovoviviparous teleost, Japanese stingfish *Sebastiscus marmoratus* Cuvier et Valenciennes [J]. Journal of Tropical Oceanography, 21(1): 70-75.] doi: 10.3969/j.issn.1009-5470.2002.01.010.
- 曾玉峰, 阎萍, 林金杏, 郭宪, 梁春年, 包鹏甲, 裴杰. 2010. 哺乳动物精子超微结构研究进展[J]. 江西农业学报, 22(9): 107-109. [Zeng Y F, Yan P, Lin J X, Guo X, Liang C N, Bao P J, Pei J. 2010. Research progress in ultrastructure of spermatozoa in mammals [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 22(9): 107-109.] doi: 10.3969/j.issn.1001-8581.2010.09.033.
- 张晗, 侯峰, 刘治国, 姜维. 2025. 川陕哲罗鲑仔鱼人工驯化技术研究[J]. 陕西农业科学, 71(12): 100-103. [Zhang H, Hou F, Liu Z G, Jiang W. 2025. Captive domestication techniques for *Hucho bleekeri* fry [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 71(12): 100-103.] doi: 10.3969/j.issn.0488-5368.2025.12.018.
- 张齐, 李胜忠, 邱弈树, 刘长龙. 2022. Na^+ 、 K^+ 、pH及3种单糖对湖拟鲤精子活力的综合调控[J]. 南方农业学报, 53(6): 1768-1775. [Zhang Q, Li S Z, Qiu Y S, Liu C L. 2022. Comprehensive regulation of sperm motility of *Rutilus rutilus* lacustris by Na^+ , K^+ , pH, and 3 monosaccharides [J]. Journal of Southern Agriculture, 53(6): 1768-1775.] doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2022.06.031.
- 张莹, 齐鑫, 王孝杰, 李键爽, 吕里康, 姚一甲, 温海深. 2020. 许氏平鲈精子超微结构及超低温冷冻对其形态的影响[J]. 大连海洋大学学报, 35(3): 355-359. [Zhang Y, Qi X, Wang X J, Li J S, Lü L K, Yao Y J, Wen H S. 2020. Ultrastructure and ultra-low temperature freezing effect of spermatozoon in black rockfish *Sebastes schlegelii* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 35(3): 355-359.] doi: 10.16535/j.cnki.dlhyxb.2020-031.
- 张永泉, 尹家胜, 刘奕, 谷伟, 徐革锋, 白庆利. 2011. 白斑红点鲑精子形态和超微结构的研究[J]. 上海海洋大学学报, 20(6): 820-825. [Zhang Y Q, Yin J S, Liu Y, Gu W, Xu G F, Bai Q L. 2011. Morphosis and ultrastructure of the spermatozoon of *Salvelinus leucomaenis* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 20(6): 820-825.]
- 章龙珍, 刘鹏, 庄平, 王斌, 闫文罡. 2008. 超低温冷冻对西伯利亚鲟精子形态结构损伤的观察[J]. 水产学报, 32(4): 558-565. [Zhang L Z, Liu P, Zhuang P, Wang B, Yan W G. 2008. Observation on cryodamage of spermatozoa of Siberian sturgeon (*Acipenser b. baerii*) [J]. Journal of Fisheries of China, 32(4): 558-565.] doi: 10.3321/j.issn: 1000-0615.2008.04.008.
- 章龙珍, 闫文罡, 庄平, 黄晓荣, 江琪. 2010. 褐牙鲈精子超微结构观察[J]. 海洋渔业, 32(1): 35-41. [Zhang L Z, Yan W G, Zhuang P, Huang X R, Jiang Q. 2010. The ultrastructure of spermatozoa of *Paralichthys olivaceus* [J]. Marine Fisheries, 32(1): 35-41.] doi: 10.3969/j.issn.1004-2490.2010.01.005.
- 赵海霞, 王学颖, 杜腾飞, 周莉, 徐世宏, 王彦丰, 肖永双, 刘清华, 李军. 2020. 体内受精许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)和体外受精大菱鲈(*Scophthalmus maximus*)精子结构

- 及生理特性比较[J]. 海洋与湖沼, 51(6): 1513-1519. [Zhao H X, Wang X Y, Du T F, Zhou L, Xu S H, Wang Y F, Xiao Y S, Liu Q H, Li J. 2020. Sperm ultrastructural and physiological differences between internally fertilized black rockfish (*Sebastes schlegelii*) and externally fertilized turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 51(6): 1513-1519.] doi: 10.11693/hyhz20200300087.
- 赵会宏, 刘晓春, 林浩然, 刘付永忠, 王云新. 2003. 斜带石斑鱼精子超微结构及盐度、温度、pH对精子活力及寿命的影响[J]. 中国水产科学, 10(4): 286-292. [Zhao H H, Liu X C, Lin H R, Liufu Y Z, Wang Y X. 2003. Ultrastructure of spermatozoa and effects of salinity, temperature and pH on spermatozoa motility in *Epinephelus coioides* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 10(4): 286-292.] doi: 10.3321/j.issn:1005-8737.2003.04.005.
- 赵建清. 2021. 超长时间低温保存绵羊精液对精子遗传物质的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学. [Zhao J Q. 2021. Effects of long-term low temperature storage of sheep semen on sperm genetic substance [D]. Alaer: Tarim University.] doi: 10.27708/d.cnki.gtlmd.2021.000265.
- 郑学斌, 张清科, 乐韵, 蒋宏雷, 金珊, 王建平, 竺俊全. 2018. 香鱼 (*Plecoglossus altivelis*) 精子的超微结构及其与鲤形目及鲑形目其他鱼类精子结构的比较研究[J]. 海洋与湖沼, 49(4): 866-872. [Zheng X B, Zhang Q K, Yue Y, Jiang H L, Jin S, Wang J P, Zhu J Q. 2018. Scanning and transmission electron microscopic observation of spermatozoon in *Plecoglossus altivelis* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 49(4): 866-872.] doi: 10.11693/hyhz20180100025.
- 朱雅婷, 张明清, 吴好莘, 赵会宏, 张海发, 舒琥. 2022. 赤点石斑鱼 (*Epinephelus akaara*) 精子超微结构及环境因子对精子活力的影响[J]. 海洋与湖沼, 53(6): 1523-1530. [Zhu Y T, Zhang M Q, Wu Y X, Zhao H H, Zhang H F, Shu H. 2022. Ultrastructure of spermatozoa and effects of environmental factors on spermatozoa motility of grouper *Epinephelus akaara* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 53(6): 1523-1530.] doi: 10.11693/hyhz202203000079.
- Iconomidou V A, Chryssikos D G, Gionis V, Pavlidis M A, Papatetis A, Hamodrakas S J. 2000. Secondary structure of chorion proteins of the teleostean fish *Dentex dentex* by ATR FT-IR and FT-Raman spectroscopy [J]. Journal of Structural Biology, 132(2): 112-122. doi: 10.1006/jsbi.2000.4307.
- Otani S, Iwai T, Nakahata S, Sakai C, Yamashita M. 2009. Artificial fertilization by intracytoplasmic sperm injection in a teleost fish, the medaka (*Oryzias latipes*) [J]. Biology of Reproduction, 80(1): 175-183. doi: 10.1095/biolreprod.108.069880.
- Uribe M C, Grier H J, Mejía-Roa V. 2014. Comparative testicular structure and spermatogenesis in bony fishes [J]. Spermatogenesis, 4(3): e983400. doi: 10.4161/21565562.2014.983400.
- Yanagimachi R, Harumi T, Matsubara H, Yan W, Yuan S Q, Hirohashi N, Iida T, Yamaha E, Arai K, Matsubara T, Andoh T, Vines C, Cherr G N. 2017. Chemical and physical guidance of fish spermatozoa into the egg through the micropyle [J]. Biology of Reproduction, 96(4): 780-799. doi: 10.1093/biolre/iox015.

(责任编辑: 兰宗宝)