

汪灏,熊皓,金阳,等.前臀鮡和贡山鮡精子的超微结构与运动学参数比较[J].华中农业大学学报,2026,45(2):28-36.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.004

## 前臀鮡和贡山鮡精子的超微结构与运动学参数比较

汪灏<sup>1</sup>,熊皓<sup>2</sup>,金阳<sup>1</sup>,范雅文<sup>1</sup>,杨学芬<sup>1</sup>,赵恒<sup>2</sup>,杨瑞斌<sup>1</sup>

1. 华中农业大学水产学院,武汉430070; 2. 华电金沙江上游水电开发有限公司叶巴滩分公司,甘孜627153

**摘要** 为探明前臀鮡(*Pareuchiloglanis anteanalis*)和贡山鮡(*Pareuchiloglanis gongshanensis*)精子的超微结构与运动学特征,采用扫描电镜、透射电镜及计算机辅助精子分析系统(CASA)进行系统比较分析。结果显示,2种鮡精子均由无顶体头部、中段及单鞭毛组成,但在形态构型与运动逻辑上分化显著。前臀鮡精子较长,头部细长(长宽比1.51),中段含4个伞状紧密排列的线粒体,鞭毛具对称侧鳍;贡山鮡精子较短,头部近球形(长宽比1.08),中段含4~5个较小线粒体,鞭毛更短而侧鳍更发达。CASA系统测定结果显示,两者平均路径速率(VAP)、平均直线速率(VSL)和平均曲线速率(VCL)差异不显著,但前臀鮡精子前向性(STR)和鞭打频率(BCF)显著更高( $P<0.05$ ),呈较直的运动轨迹;贡山鮡精子头部侧摆幅度(ALH)更大( $P<0.05$ ),运动轨迹更弯曲。研究表明,前臀鮡精子的形态结构与运动学特征高度符合体内授精型精子的典型表型,而贡山鮡精子的形态结构与运动学特征则表现出对体外受精环境的适应。

**关键词** 前臀鮡;贡山鮡;精子超微结构;运动学参数;授精方式

**中图分类号** S917 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0028-09

精子是动物生殖系统中结构最为高度特化的细胞之一<sup>[1]</sup>。精子的形态与功能不仅决定着受精效率,也深刻反映了物种为保障受精成功而演化出的授精策略与生态适应<sup>[2-3]</sup>。在脊椎动物中,精子形态与功能表现出的极高多样性,实质上是其授精方式、受精环境、生境压力共同塑造的结果<sup>[4-5]</sup>。作为脊椎动物中种类最丰富的一支,鱼类展现出多样的精子结构类型,目前已有超过280种鱼类、约100个硬骨鱼科的精子形态被系统描述<sup>[6]</sup>。有研究表明,授精方式的分化是驱动精子结构与运动特征演变的关键因素之一<sup>[7]</sup>。根据授精行为的不同,鱼类精子通常分为两大类:体外受精型精子(aquasperm)和体内受精型精子(introsperm)<sup>[8]</sup>。绝大多数硬骨鱼类精子为体外受精型,结构相对简单,适应于在水体环境中快速完成受精;体内受精型精子仅在极少数行使体内授精行为鱼类中出现,其头部形态、线粒体数量及鞭毛形态往往具有更高程度的特化<sup>[9]</sup>。体内授精方式通常被认为能提高受精成功率,并允许交配和产卵过程在时间和空间上分离,从而增强了物种在复杂环境中的繁殖适应性<sup>[10]</sup>。

鮡科(Sisoridae)是鲇形目(Siluriformes)中一类高度适应激流生态环境的底栖鱼类,主要分布于亚洲的山地河流,尤其在中国横断山脉及周边水系中物种最为多样<sup>[11]</sup>。这些鱼类长期栖息于高流速、低温、高含氧的环境中,演化出了多种解剖与生理层面的特化性状<sup>[12]</sup>。然而,与其生态适应性<sup>[13]</sup>和系统发育<sup>[14]</sup>等方面已有较多研究相比,鮡科鱼类生殖适应机制的探索仍显滞后。尤其是在激流环境下,其精子超微结构、运动特征与授精方式之间的关系仍缺乏系统解析。这种研究空白不仅限制了对鮡科鱼类在激流生态位中生殖策略演化机制的理解,也在一定程度上制约了其人工繁育技术的发展,使得配子活化调控、授精参数优化等关键环节缺乏理论支撑。

前期野外调查与驯养观测显示,前臀鮡(*Pareuchiloglanis anteanalis*)繁殖期存在雌雄交配接触行为,且授精与产卵并非同步发生,呈现为体内授精、体外孵化类型,这一模式与已有研究中对黄石爬鮡(*Euchiloglanis kishinouyei*)的描述一致<sup>[15]</sup>。相比之下,贡山鮡(*Pareuchiloglanis gongshanensis*)则表现

收稿日期:2026-01-22

基金项目:华电集团金沙江上游远期放流鱼种人工繁育技术研究项目(T-2022-04)

汪灏,E-mail:haowang\_2023@163.com

通信作者:杨瑞斌,E-mail:rbyang@mail.hzau.edu.cn;赵恒,E-mail:330591594@qq.com

为体外受精、体外孵化方式。由于授精方式差异往往造成精子在超微结构与运动性能上产生系统性分化,明确不同授精方式下鮡科鱼类的精子表型,对于解析其演化生物学价值及优化保护策略具有重要的科学意义。

基于此,本研究以2种授精方式不同的鮡科鱼类为研究对象,系统开展精子超微结构与运动学特征的比较分析,旨在查明2种鮡科鱼类的精子形态与动力学特征,明确其与授精方式之间的适应性关系,为人工繁育中的配子处理与授精条件优化提供理论支撑与生物学参考。此外,本研究还希望通过精子层面的分析,为深入理解激流环境中鱼类的生殖适应机制及其授精方式演化提供新的视角。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

试验所用性成熟雄性前臀鮡( $n=6$ )分别于2024年6月与2025年8月采自金沙江上游及大渡河流域( $29^{\circ}16'19.17''$  N,  $102^{\circ}17'11.54''$  E);贡山鮡( $n=6$ )于2025年7月采自云南省槟榔江水域( $25^{\circ}23'10.07''$  N,  $98^{\circ}12'12.51''$  E)。所有活鱼捕获后,均经充氧、低温打包,运输至实验室并于低温循环水系统中暂养1 d,暂养期间水温维持在 $14\sim 16^{\circ}\text{C}$ ,溶氧保持在 $8\sim 10\text{ mg/L}$ 。暂养期间未进行投喂。精液采集时,统一使用 $150\text{ mg/L}$  MS-222对实验鱼进行麻醉。随后,用吸水纸擦干其生殖突区域,通过温和挤压腹部收集乳白色精液,并转移至无菌离心管中于 $4^{\circ}\text{C}$ 保存备用。2种鮡的形态及生殖系统结构如图1所示。

### 1.2 精子扫描电镜和透射电镜观察

1)扫描电镜方法:将准备好的精液样品置于戊二醛固定液混匀后 $4^{\circ}\text{C}$ 固定保存,然后取固定样品经过后固定、脱水、干燥、导电处理后在扫描电子显微镜(hitachi SU8100)下观察并拍摄图像。

2)透射电镜方法:将准备好的精液样品置于戊二醛固定液混匀后 $4^{\circ}\text{C}$ 固定保存,然后取固定样本经过琼脂预包埋、后固定、室温脱水、渗透包埋、聚合、超薄切片、染色后在透射电子显微镜(hitachi HT7800)下观察并采集图像分析。

### 1.3 精子运动学参数分析

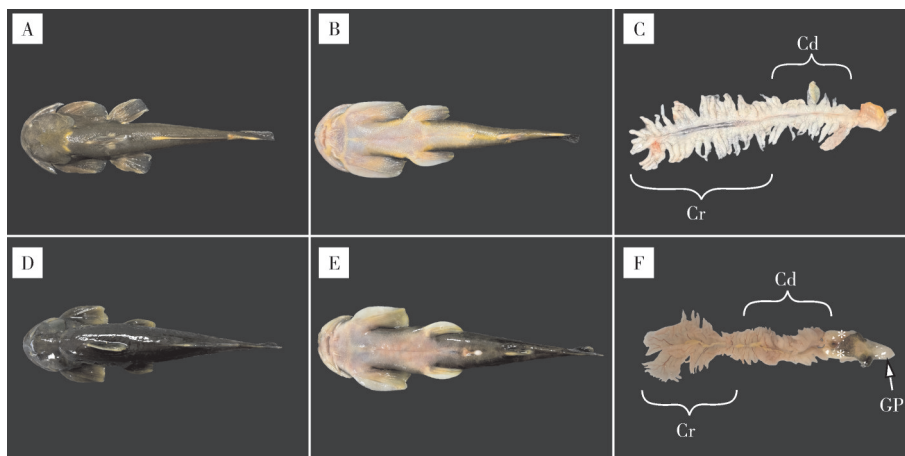
将已取出的精液分别使用 $4^{\circ}\text{C}$ 条件下保存的Hank's平衡盐溶液(含 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ , Biosharp, 中国)作为稀释液进行稀释。Hank's平衡盐溶液主要离子浓度( $\text{mmol/L}$ )为: $\text{Na}^{+} 142.8$ ,  $\text{K}^{+} 5.3$ ,  $\text{Ca}^{2+} 1.3$ ,  $\text{Mg}^{2+} 0.8$ ,  $\text{Cl}^{-} 145.8$ ,  $\text{HCO}_3^{-} 4.2$ ,  $\text{HPO}_4^{2-} 0.34$ , 葡萄糖 $5.6$ 。精子采用纯水进行激活,激活过程在常温下进行。随后在精子动力分析仪上测试采集相关数据并统计。

### 1.4 数据分析

本研究中精子超微结构的测量与运动学参数数据均使用SPSS 26.0统计软件进行处理,所有试验数据均以“均值±标准差”表示。平均数的比较采用单因素方差分析检测,显著性水平设为 $P<0.05$ 。

### 1.5 动物伦理审查声明

本研究涉及的鱼类(脊椎动物)活体采样及实验操作已通过华中农业大学科学伦理委员会审查批准。所有实验操作符合国家实验动物管理条例及动



A~C:贡山鮡;D~F:前臀鮡;Cr:前区;Cd:尾区;GP:生殖突。A-C: *P. gongshanensis*; D-F: *P. anteanalis*; Cr: Cranial region; Cd: Caudal region; GP: Genital papilla.

图1 贡山鮡和前臀鮡雄鱼外部形态以及生殖系统结构展示

Fig. 1 External morphology and reproductive system structure of male *P. gongshanensis* and *P. anteanalis*

物福利伦理要求。

## 2 结果与分析

### 2.1 前臀鲢和贡山鲢精子超微结构比较

扫描电镜观察结果显示,前臀鲢与贡山鲢成熟精子均由头部、中段和尾部3部分组成,形态均为典型的单鞭毛型精子(图2 A、B)。前臀鲢精子全长( $38.00\pm 0.91$ )  $\mu\text{m}$ ,贡山鲢为( $34.32\pm 1.01$ )  $\mu\text{m}$ 。前者整体形态更为细长。

在头部形态方面,前臀鲢精子头长( $1.88\pm 0.07$ )  $\mu\text{m}$ ,头部宽度( $1.25\pm 0.06$ )  $\mu\text{m}$ ,其精子头部形态表现为细长,贡山鲢精子头长( $1.43\pm 0.05$ )  $\mu\text{m}$ ,头部宽度( $1.32\pm 0.02$ )  $\mu\text{m}$ ,精子头部形态上趋于近球形(图2A、B)。

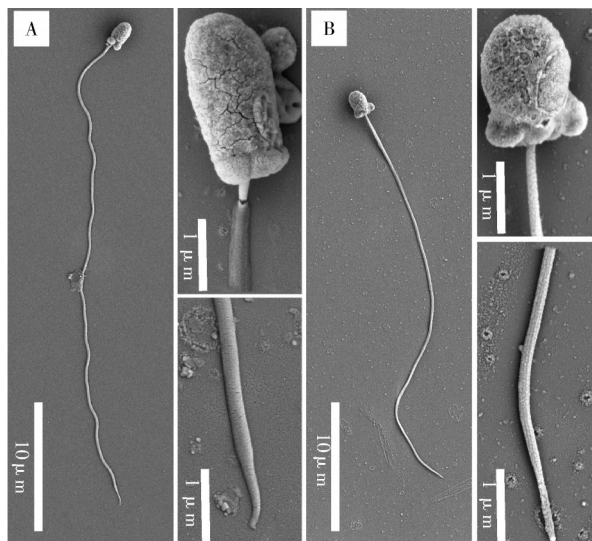


图2 前臀鲢(A)和贡山鲢(B)精子扫描电镜图

Fig. 2 Scanning electron micrographs of spermatozoa from *P. anteanalis* (A) and *P. gongshanensis* (B)

透射电镜观察显示,2种鲢精子头部均无顶体,为硬骨鱼类的典型特征。头部主要由高度致密的细胞核、核膜及外覆的质膜构成。前臀鲢精子细胞核在透射电镜下电子致密度高,表现出凝缩特征。核膜紧密包裹细胞核,未见明显核空泡结构,核膜外层由质膜包裹,质膜呈不规则波浪褶皱状,头部表面可见“嵴”或浅凹形态,细胞质极少(图3A)。贡山鲢头部同样由致密细胞核、核膜和质膜组成,核膜与质膜之间几乎无间隙,质膜褶皱较为细密,头部表面不光滑,可见密集凹陷(图3B)。2种精子头部后端均发育有明显的植入窝(图3A、B)。前臀鲢植入窝约深入细胞核长度的1/6,贡山鲢约为1/5。植入窝内包埋有中心粒复合体,由近端中心粒和远端中心粒沿

纵轴排列构成,远端中心粒作为轴丝形成的起始结构,其远端微管延伸并组装形成轴丝。

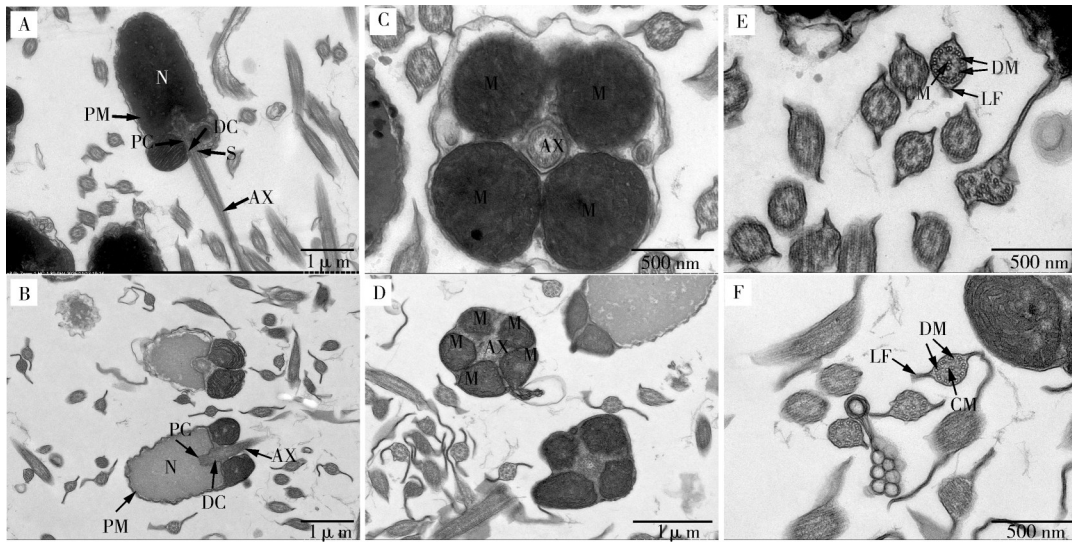
在精子中段,2种鲢的中段均紧邻头部,连接处可见浅凹的环沟结构。中段主要由线粒体与少量细胞质构成,外层由质膜包裹形成线粒体鞘结构。前臀鲢精子中段长度为( $0.54\pm 0.05$ )  $\mu\text{m}$ ,宽度为( $1.22\pm 0.07$ )  $\mu\text{m}$ ;贡山鲢精子中段长度为( $0.52\pm 0.05$ )  $\mu\text{m}$ ,宽度为( $1.41\pm 0.11$ )  $\mu\text{m}$ 。前臀鲢中段较为紧凑,内部可观察到4个体积较大的近球形线粒体,呈对称环状排列,线粒体电子致密度高,内膜折叠形成清晰嵴结构(图3C)。在纵切面上可见线粒体呈对称分布。贡山鲢精子中段由相对较薄的细胞质和4~5个近圆球形线粒体构成,线粒体排列紧密,可呈对称结构或五角星状分布(图3D);线粒体围绕轴丝排列形成线粒体鞘,其内侧轴丝与线粒体鞘之间存在明显间隙。

前臀鲢与贡山鲢的精子均为单鞭毛类型。鞭毛由远端中心粒发出,近端较粗,向远端逐渐变细。前臀鲢鞭毛长度为( $35.70\pm 0.97$ )  $\mu\text{m}$ ,贡山鲢的鞭毛长( $32.25\pm 0.57$ )  $\mu\text{m}$ 。2种鲢精子鞭毛内部均呈典型的“9+2”微管结构,由9对外周双联微管和中央2条单微管组成。鞭毛外层由质膜包裹的细胞质向两侧扩展形成侧鳍结构,左右对称分布。前臀鲢侧鳍较小,单侧宽度约为轴丝直径的1/5~1/4;贡山鲢侧鳍明显更宽,单侧可达轴丝直径的1/3~1/2(图3E、F)。

精子形态定量分析结果显示,前臀鲢与贡山鲢精子在多个形态指标上存在显著差异。统计分析结果表明,前臀鲢精子全长显著大于贡山鲢( $P<0.01$ ) (图4A)。在精子头部的形态差异较大,前臀鲢精子头长显著大于贡山鲢( $P<0.001$ ),而头部宽度显著小于贡山鲢( $P<0.01$ ),导致前臀鲢精子头部长宽比(1.51)显著高于贡山鲢(1.08),呈现更为细长的头部形态(图4B、C)。在中段结构方面,2种鲢精子中段的长度差异不显著(图4D)。此外,前臀鲢精子的轴丝长度显著大于贡山鲢( $P<0.01$ ),但轴丝直径无显著差异(图4E、F)。总体而言,前臀鲢精子表现为细长型特征,而贡山鲢精子则相对较短。

### 2.2 前臀鲢和贡山鲢精子运动学参数比较分析

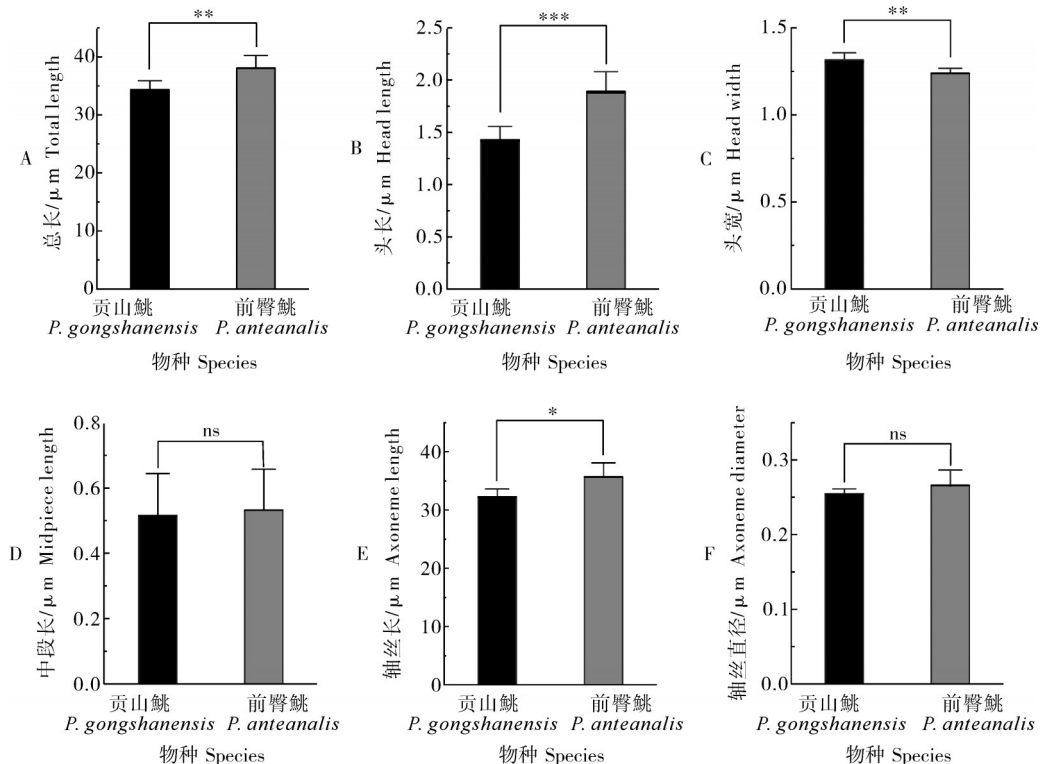
前臀鲢和贡山鲢的精液在自然状态下均呈乳白色黏稠液体,其中前臀鲢的精液相对较稀薄。稀释后采用CASA计算机辅助精子分析系统进行检测,结果显示,2种鲢科鱼类精子均表现出即时的运动



A: 前臀鮡精子头部纵切; B: 贡山鮡精子头部纵切; C: 前臀鮡精子中段横切; D: 贡山鮡精子中段横切; E: 前臀鮡精子鞭毛横切; F: 贡山鮡精子鞭毛横切。N: 细胞核, PM: 细胞膜, PC: 近端中心粒, DC: 远端中心粒, S: 袖套腔, AX: 轴丝, M: 线粒体, LF: 侧鳍, DM: 二联微管, CM: 中央微管。A: Longitudinal section of *P. anteanalis* sperm head; B: Longitudinal section of *P. gongshanensis* sperm head; C: Cross-section of *P. anteanalis* sperm midpiece; D: Cross-section of *P. gongshanensis* sperm midpiece; E: Cross-section of *P. anteanalis* sperm flagellum; F: Cross-section of *P. gongshanensis* sperm flagellum. N: Nucleus, PM: Plasma membrane, PC: Proximal centriole, DC: Distal centriole, S: Sheath cavity, AX: Axoneme, M: Mitochondrion, LF: Lateral flagellum, DM: Doublet microtubules, CM: Central microtubules.

图 3 前臀鮡和贡山鮡精子透射电镜图

Fig. 3 Transmission electron micrographs of sperm from *P. anteanalis* and *P. gongshanensis*



\*、\*\*、\*\*\* 分别表示两物种在对应指标上的差异显著 ( $P < 0.05$ )、非常显著 ( $P < 0.01$ ) 和极显著 ( $P < 0.001$ ); ns 表示差异无统计学意义。  
\*, \*\*, \*\*\* indicate significant ( $P < 0.05$ ), highly significant ( $P < 0.01$ ), and extremely significant ( $P < 0.001$ ) differences between the two species in the corresponding metrics, respectively; ns indicates no statistically significant difference.

图 4 前臀鮡和贡山鮡精子形态数据显著性分析

Fig. 4 Significance analysis of sperm morphology data in *P. anteanalis* and *P. gongshanensis*

活性响应,但其运动模式存在明显差异(表1)。前臀鲢精子的轨迹则较为弯曲,常呈弧形或环状运动模式。臀鲢精子的运动轨迹相对较直,方向性较强;贡山鲢模式。

表1 前臀鲢和贡山鲢精子的运动学参数

Table 1 Sperm kinematic parameters of *P. anteanalis* and *P. gongshanensis*

运动参数 Movement parameter	前臀鲢 <i>P. anteanalis</i>	贡山鲢 <i>P. gongshanensis</i>	P值P value
平均路径速率/( $\mu\text{m/s}$ ) VAP	164.57 $\pm$ 26.48	200.32 $\pm$ 19.78	0.321
直线速率/( $\mu\text{m/s}$ ) VSL	157.66 $\pm$ 28.23	171.80 $\pm$ 13.92	0.669
曲线速率/( $\mu\text{m/s}$ ) VCL	170.16 $\pm$ 25.78	213.00 $\pm$ 22.36	0.256
前向性/% STR	93.65 $\pm$ 2.76	85.57 $\pm$ 1.68	0.047*
直线性/% LIN	89.68 $\pm$ 3.50	81.06 $\pm$ 2.42	0.090
头部侧摆幅度/ $\mu\text{m}$ ALH	4.45 $\pm$ 0.48	8.95 $\pm$ 1.27	0.016*
鞭打频率/Hz BCF	23.06 $\pm$ 1.35	17.70 $\pm$ 1.33	0.030*
摆动性/% WOB	95.03 $\pm$ 1.22	93.63 $\pm$ 1.25	0.452

注:\*表示前臀鲢与贡山鲢在相应指标上差异显著( $P<0.05$ )。Note: \* indicates that the difference between *P. anteanalis* and *P. gongshanensis* in the corresponding indicators is significant ( $P<0.05$ ).

运动学参数分析结果显示,前臀鲢和贡山鲢在平均路径速率(velocity average path, VAP)、直线速率(velocity straight line, VSL)、曲线速率(velocity curvilinear line, VCL)、直线性(linearity, LIN)以及摆动性(wobble, WOB)之间差异不显著( $P>0.05$ )。然而,前臀鲢精子的前向性(straightness, STR)显著高于贡山鲢( $P<0.05$ ),显示其运动方向更加集中。贡山鲢精子的头部侧摆幅度(amplitude of lateral head displacement, ALH)显著高于前臀鲢( $P<0.05$ ),表明其游动时摆动幅度更大。与此同时,前臀鲢精子的鞭打频率(beat cross frequency, BCF)显著高于贡山鲢( $P<0.05$ ),反映其精子头部运动轨迹的交叉频率更高,显示出不同的运动动力学特征。

### 3 讨论

#### 3.1 精子超微结构和动力学差异及其与授精方式的对应关系

本研究通过对前臀鲢与贡山鲢的精子超微结构进行比较,发现两者在精子头部、中段、鞭毛结构及动力学特征方面存在显著差异,并且这些差异与其所采取的授精方式密切相关。

在精子头部结构方面,前臀鲢精子的头部呈细长形状,无顶体,头部长宽比为1.51,这一特征与卢氏喉鳍鲂(*Trachelyopterus lucenai*)<sup>[16]</sup>、许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)<sup>[17]</sup>和单宝莲鱼属(*Monotocheirodon*)<sup>[18]</sup>等典型的体内授精鱼类具有高度的趋同性。流体力学研究和理论模型指出,细长的精子头部有助于降低在高黏度介质中的水动力阻力,从而

提高精子在受限空间内的推进效率,且当头部长宽比接近2:1时,其阻力最小<sup>[19]</sup>。前臀鲢的头部比例接近这一理论最优值,表明其精子形态适应在雌性生殖道或卵巢液等黏稠环境中维持有效、定向的运动能力。而贡山鲢精子头部呈近球形,头部长宽比为1.08,符合典型体外授精鱼类的精子形态特征<sup>[20]</sup>。这种精子头部形态在黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)<sup>[21]</sup>、鳊(*Siniperca chuatsi*)<sup>[22]</sup>、南美伊林油鲂(*Iheringichthys labrosus*)<sup>[23]</sup>及斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)<sup>[24]</sup>等体外受精鱼类中普遍存在。体外受精鱼类在繁殖期间直接将精子释放到水体中,球形头部所带来的多方向摆动和快速扩散反而有助于在短时间内扩大搜索范围,提高精卵相遇概率。

精子中段作为驱动鞭毛摆动的“能量中心”,在2种鲢中超微结构出现分化。尽管前臀鲢与贡山鲢的中段长度相近,且均有4~5个线粒体呈环状排列,但前臀鲢单个线粒体的直径更大,代表着其几何体积更为占优。线粒体作为能量代谢的枢纽,其容积的增加往往意味着更发达的线粒体嵴及更高密度的氧化磷酸化酶系,这在生物能量学上构成了支撑体内授精储存及高耗能环境所需的结构基础<sup>[25]</sup>。相比之下,贡山鲢精子线粒体体积较小,可能反映了其在体外受精模式下对长期持续运动能力需求较低的特点。

在鞭毛结构与精子整体尺寸方面,前臀鲢精子展现出显著更长的鞭毛及更大的总长度,并伴随较窄的对称侧鳍结构。这种特征被认为是针对高黏滞介质或长程定向推进的一种力学适配<sup>[26]</sup>。理论模型

分析与比较研究均表明,较长的鞭毛能够产生更大的推进力并提高能量利用效率,体内授精鱼类的精子长度通常显著大于体外受精鱼类<sup>[27-28]</sup>。而体外受精物种则通常面临更显著的精子数量选择压力,其排出的精子在水体中迅速被稀释,精子面临严峻的稀释效应与短暂的受精窗口,因此更倾向于增加精子数量而非精子长度<sup>[29-30]</sup>。贡山鮡相对较短的鞭毛形态与其在开放水体中依赖快速扩散、但无须维持长距离或长时间推进的运动需求相契合。

精子运动动力学分析进一步为上述形态差异提供了功能层面的支持。前臀鮡精子展现出显著的定向推进优势,表现为极高的前向性与鞭打频率,其运动轨迹以近直线型推进为主,但贡山鮡精子则以大幅度的头部摆动和明显的弯曲路径为特征,呈现出短程快速扩散的运动方式。这种差异与体内和体外授精物种不同的生殖策略高度契合。已有研究证实,体内授精环境通常伴随着高黏滞力和复杂的物理屏障,这迫使精子进化出极强的定向能力,从而确保精子能够精准抵达受精位点<sup>[19,31]</sup>。而体外受精鱼类的精子被排入开放水体后即面临剧烈的稀释效应,此时顺利与卵结合完成受精成为最大选择压力<sup>[32]</sup>。贡山鮡精子这种大振幅、高弯曲度的运动模式,能够在短暂的寿命内显著提升覆盖率,增加与雌鱼同时在水体中排出的卵粒的接触机会,有效提高受精率。

### 3.2 精子表型与不同激流微生境的繁殖生态背景

前文已揭示前臀鮡和贡山鮡在精子头部、中段、鞭毛结构及动力学特征上的显著差异,实质上反映了2种鮡对其特定栖息生境的深度适应。

前臀鮡主要分布于金沙江、雅砻江、安宁河、大渡河、青衣江及岷江、沱江、涪江上游等河段<sup>[33]</sup>。这些河段地形跌宕,河道狭窄并常伴激流和浅滩,水流湍急,具有较强的剪切力和不规则湍流结构<sup>[34-35]</sup>。体外受精面临巨大的物理风险:配子一经释放便会被水流冲散并高度稀释,导致有效的受精窗口期被极度压缩。因此,演化出能够规避水动力干扰、在相对封闭稳定的微环境中完成配子结合的体内授精方式,成为前臀鮡的一种生存优势。

相比之下,贡山鮡所处的怒江段虽同属山地河流,但其河道深槽结构提供了相对稳定的流场<sup>[36-37]</sup>。贡山鮡的产卵场主要位于急流与缓流的过渡带、峡谷型河段及水流湍急的江段,底质以巨石或卵石为主<sup>[38]</sup>。这类底质形成局部洄水区、跌

水下方缓流带及巨石遮蔽的深潭微环境,从而降低卵粒被冲刷的风险。在这种背景下,贡山鮡精子采取的大振幅摆动与快速扩散策略,能以较低的推进成本换取更高的空间搜索效率,从而维持体外受精的高效能。

### 3.3 基于精子结构与运动特征的人工繁育策略优化及其意义

基于本研究揭示的精子构型与动力学差异,可针对性地优化2类物种的人工繁育技术。对于采取体内授精策略的前臀鮡,其细长化的头部与大体积线粒体赋予了精子极强的定向破阻能力。这一特征暗示,传统的低渗淡水激活可能仅触发了其运动潜能的基础水平,而未能诱导其达到最佳生理状态。因此,在人工授精实践中,适宜模拟雌性生殖道或卵巢液的微环境,通过调节激活介质的动态黏度、渗透压及关键离子(如 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ )浓度,以维持精子在高阻力介质中的能量代谢水平,从而延长其定向推进的有效窗口期。

针对贡山鮡这一体外受精物种,其球形头部与短鞭毛构型更适应于开放水体中的瞬时扩散。相应的授精方案应侧重于“空间覆盖效率”:宜采用低黏度的激活介质,并严格控制精液的稀释梯度。这种配置有助于精子在激活瞬间迅速启动高振幅摆动,在开放的授精容器内形成最大化的搜索轨迹,从而在短促的精子寿命内提升精卵碰撞的统计学概率。

综上所述,本研究阐明了前臀鮡与贡山鮡在精子超微结构及运动学特征上的显著分化,并揭示了其配子表型与授精策略间的协同进化关系。前臀鮡精子通过细长的头部形态、扩张的线粒体能量系统及高效的鞭毛推进装置,实现了对高黏滞、空间受限的体内生殖微环境的功能适配;而贡山鮡精子则以近球形头部配合短程弯曲轨迹,展现出在开放水域中追求空间探索效率的最大化。这些性状差异为理解鮡科鱼类在复杂激流环境下的繁殖适应性提供了核心生物学证据。尽管本研究在统一激活条件下揭示了不同授精策略精子的运动学差异,但在生理情境模拟方面仍存在一定局限。目前的实验体系主要基于标准化外源激活条件,尚未纳入雌性生殖道分泌物等微环境因素对精子运动行为的调控作用。此外,运动学参数与实际受精成功率之间的定量关系仍有待通过控制授精实验进一步验证。

未来研究可结合雌性生殖道环境的理化参数测

定(如渗透压、离子组成及分泌物黏度),构建更具生理相关性的激活体系,并通过精子运动特征与受精率之间的功能关联分析,进一步阐明体内授精型精子的适应机制。这将有助于提升人工繁育技术的精准性,并为激流生态型鱼类的种质资源保护提供更坚实的实验依据。

## 参考文献 References

- [1] TEVES M E, ROLDAN E R S. Sperm bauplan and function and underlying processes of sperm formation and selection[J]. *Physiological reviews*, 2022, 102(1): 7-60.
- [2] BUFFONE M G. Sperm acrosome biogenesis and function during fertilization[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [3] CHRISTOPHER L R, BARRATT E B C J. The sperm cell: production, maturation, fertilization, regeneration[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [4] GINSBERG J R, HUCK U W. Sperm competition in mammals[J]. *Trends in ecology & evolution*, 1989, 4(3): 74-79.
- [5] OLITO C, BODE M, MARSHALL D. Evolutionary consequences of fertilization mode for reproductive phenology and asynchrony[J]. *Marine ecology progress series*, 2015, 537: 23-38.
- [6] TORATI L S, LOPES J T, LIMA A F, et al. Feasibility of *in vivo* semen collection and description of the morphology and ultrastructure of the spermatozoa of *Arapaima gigas* (Schinz, 1822)[J/OL]. *Fishes*, 2024, 9(1): 24[2026-01-22]. <https://doi.org/10.3390/fishes9010024>.
- [7] MATTEI X. Spermatozoon ultrastructure and its systematic implications in fishes[J]. *Canadian journal of zoology*, 1991, 69(12): 3038-3055.
- [8] JAMIESON B G M. Reproductive biology and phylogeny of fishes (agnathans and bony fishes): phylogeny, reproductive system, viviparity, spermatozoa[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [9] BURNS J R, WEITZMAN S H, GRIER H J, et al. Internal fertilization, testis and sperm morphology in Glandulo-caudinae fishes (Teleostei: Characidae: Glandulo-caudinae)[J]. *Journal of morphology*, 1995, 224(2): 131-145.
- [10] BURNS J R, MEISNER A D, WEITZMAN S H, et al. Sperm and spermatozeugma ultrastructure in the inseminating catfish, *Trachelyopterus lucenai* (Ostariophysi: Siluriformes: Auchenipteridae)[J]. *Copeia*, 2002, 2002(1): 173-179.
- [11] 郭宪光. 中国鲃科鱼类分子系统发育和石爬鲃属物种有效性的研究[D]. 重庆: 西南师范大学, 2003. GUO X G. Molecular phylogeny of Sisoridae and species validity of *Euchiloglanis* in China[D]. Chongqing: Southwest University, 2003 (in Chinese with English abstract).
- [12] 何舜平, 曹文宣, 陈宜瑜. 青藏高原的隆升与鳅鲃鱼类(鲃形目: 鲃科)的隔离分化[J]. *中国科学(C辑: 生命科学)*, 2001, 31(2): 185-192. HE S P, CAO W X, CHEN Y Y. Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and isolation and differentiation of fishes (Siluriformes: Carpidae)[J]. *Scientia sinica (vitae)*, 2001, 31(2): 185-192 (in Chinese).
- [13] 李红敬. 黑斑原鲃个体生物学及种群生态研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008. LI H J. Studies on the biology and population ecology of *Glyptosternum maculatum* (Regan) in the Brahmaputra River, China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [14] WANG H, YANG X F, LIU J S, et al. Telomere-to-telomere gap-free genome assembly of *Euchiloglanis kishinouyei* [J/OL]. *Scientific data*, 2025, 12: 757 [2026-01-22]. <https://www.nature.com/articles/s41597-025-05068-8>.
- [15] 黄寄夔, 杜军, 王春, 等. 黄石爬的繁殖生境、两性系统和繁殖行为研究[J]. *西南农业学报*, 2003, 16(4): 119-121. HUANG J K, DU J, WANG C, et al. Reproduction environment, sexual system and reproduction behavior of *Euchiloglanis kishinouyei* Kimura[J]. *Southwest China journal of agricultural sciences*, 2003, 16(4): 119-121 (in Chinese with English abstract).
- [16] MEISNER A D, BURNS J R, WEITZMAN S H, et al. Morphology and histology of the male reproductive system in two species of internally inseminating South American catfishes, *Trachelyopterus lucenai* and *T. galeatus* (Teleostei: Auchenipteridae)[J]. *Journal of morphology*, 2000, 246(2): 131-141.
- [17] 赵海霞, 王学颖, 杜腾飞, 等. 体内受精许氏平鲃(*Sebastes schlegelii*)和体外受精大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)精子结构及生理特性比较[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(6): 1513-1519. ZHAO H X, WANG X Y, DU T F, et al. Sperm ultrastructural and physiological differences between internally fertilized black rockfish (*Sebastes schlegelii*) and externally fertilized turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. *Oceanologia et limnologia sinica*, 2020, 51(6): 1513-1519 (in Chinese with English abstract).
- [18] BURNS J R, WEITZMAN S H. Intromittent organ in the genus *Monotocheirodon* (Characiformes: Characidae)[J]. *Copeia*, 2006, 2006(3): 529-534.
- [19] ITO T, MORITA M, OKUNO S, et al. Fertilization modes and the evolution of sperm characteristics in marine fishes: paired comparisons of externally and internally fertilizing species [J/OL]. *Ecology and evolution*, 2022, 12(12): e9562 [2026-01-22]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ece3.9562>.
- [20] 刘雪珠, 杨万喜. 硬骨鱼类精子超微结构及其研究前景[J]. *东海海洋*, 2002, 20(3): 32-37. LIU X Z, YANG W X. Recent progresses of study on spermatozoon structure of teleost and its application in reproductive evolution studies[J]. *Donghai marine science*, 2002, 20(3): 32-37 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [21] 龙永隆, 林丹军. 黄颡鱼(*Pseudobagrus fulvidraco*)精子的超微结构[J]. 实验生物学报, 1996(3): 235-245. LONG Y L, LIN D J. The ultrastructure of spermatozoon of the teleost *Pseudobagrus fulvidraco* [J]. Acta biologiae experimentalis sinica, 1996(3): 235-245 (in Chinese with English abstract).
- [22] LUO D, SUN J J, LU X, et al. Comparative sperm ultrastructure of three species in *Siniperca* (Teleostei: Perciformes: Sinipercaidae) [J]. Micron, 2011, 42(8): 884-891.
- [23] DOS SANTOS J E, MARCON L, GUEDES BRITO M F, et al. Reproductive biology of the Neotropical catfish *Iheringichthys labrosus* (Siluriformes: Pimelodidae), with anatomical and morphometric analysis of gonadal tissues [J/OL]. Animal reproduction science, 2019, 209: 106173 [2026-01-22]. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2019.106173>.
- [24] JASPERS E J, AVAULT J W, ROUSSEL J D. Spermatozoal morphology and ultrastructure of channel catfish, *Ictalurus punctatus* [J]. Transactions of the American fisheries society, 1976, 105(3): 475-480.
- [25] CARDULLO R A, BALTZ J M. Metabolic regulation in mammalian sperm: mitochondrial volume determines sperm length and flagellar beat frequency [J]. Cell motility, 1991, 19(3): 180-188.
- [26] KAHRL A F, SNOOK R R, FITZPATRICK J L. Fertilization mode drives sperm length evolution across the animal tree of life [J]. Nature ecology & evolution, 2021, 5(8): 1153-1164.
- [27] MORISAWA M. Adaptation and strategy for fertilization in the sperm of teleost fish [J]. Journal of applied ichthyology, 2008, 24(4): 362-370.
- [28] DE OLIVEIRA A G, LOPES T M, ANGULO-VALENCIA M A, et al. Relationship of freshwater fish recruitment with distinct reproductive strategies and flood attributes: a long-term view in the upper Paraná River floodplain [J/OL]. Frontiers in environmental science, 2020, 8: 577181 [2026-01-22]. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.577181>.
- [29] ITO T, KINOSHITA I, TAHARA D, et al. Fertilization modes drive the evolution of sperm traits in Baikal sculpins [J]. Journal of zoology, 2021, 314(1): 20-30.
- [30] HUMPHRIES S, EVANS J P, SIMMONS L W. Sperm competition: linking form to function [J/OL]. BMC evolutionary biology, 2008, 8(1): 319 [2026-01-22]. <https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2148-8-319>.
- [31] SANCHEZ-RODRIGUEZ A, SANSEGUNDO E, TOURMENTE M, et al. Effect of high viscosity on energy metabolism and kinematics of spermatozoa from three mouse species incubated under capacitating conditions [J/OL]. International journal of molecular sciences, 2022, 23(23): 15247 [2026-01-22]. <https://doi.org/10.3390/ijms232315247>.
- [32] DE BARROS F J T, YASUI G S, SOARES A X, et al. Characterization of semen of *Baryancistrus xanthellus* Rapp Py-Daniel, Zuanon & Ribeiro de Oliveira, 2011 (Siluriformes, Loricariidae), an endemic catfish species from the Xingu River, Pará, Brazil [J/OL]. Theriogenology wild, 2025, 7: 100138 [2026-01-22]. <https://doi.org/10.1016/j.therwi.2025.100138>.
- [33] 褚新洛, 郑葆珊, 戴定远. 中国动物志: 硬骨鱼纲鲈形目 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 162-163. CHU X L, ZHENG B S, DAI D Y. Fauna sinica, Osteichthys, Siluriformes [M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese).
- [34] 姚景龙, 陈毅峰, 李莹, 等. 中华鲃与前臀鲃的形态差异和物种有效性 [J]. 动物分类学报, 2006, 31(1): 11-17. YAO J L, CHEN Y F, LI K, et al. Morphological variations and species validity of *Pareuchiloglanis sinensis* and *P. anteanalis* in southwestern of China [J]. Acta zootaxonomica sinica, 2006, 31(1): 11-17 (in Chinese with English abstract).
- [35] 王中敏, 张登成, 陈锋, 等. 金沙江上游苏洼洼至虎跳峡江段鱼类群落结构及分布特征 [J]. 生态学杂志, 2025, 44(9): 2999-3007. WANG Z M, ZHANG D C, CHEN F, et al. The structure and distribution characteristics of fish communities in the Suwalong to Hutiaoxia section of the upper reaches of Jinsha River [J]. Chinese journal of ecology, 2025, 44(9): 2999-3007 (in Chinese with English abstract).
- [36] 褚小帅, 和珊, 黄莹, 等. 高黎贡山怒江片区以地名命名的物种状况分析 [J]. 西部林业科学, 2025, 54(5): 119-126. CHU X S, HE S, HUANG Y, et al. Species named by the place name in the Nujiang section of the Gaoligong Mountains [J]. Journal of West China forestry science, 2025, 54(5): 119-126 (in Chinese with English abstract).
- [37] 胡俊宏, 赵晓彦, 龙睿馨, 等. 青藏高原东南缘怒江上游流域地貌特征及其构造意义 [J]. 地质科学, 2025, 60(5): 1281-1297. HU J H, ZHAO X Y, LONG R X, et al. Geomorphic features of the upper Nujiang River Basin and their tectonic significance in the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese journal of geology, 2025, 60(5): 1281-1297 (in Chinese with English abstract).
- [38] 王龙涛. 怒江上游水电开发对鱼类栖息环境影响分析及保护 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. WANG L T. Analysis of fish habitat environment impact in Nujiang River upstream hydroelectric power development and protection [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).

## Comparative study on sperm ultrastructure and kinematic parameters in *Pareuchiloglanis anteanalis* and *Pareuchiloglanis gongshanensis*

WANG Hao<sup>1</sup>, XIONG Hao<sup>2</sup>, JIN Yang<sup>1</sup>, FAN Yawen<sup>1</sup>, YANG Xuefen<sup>1</sup>, ZHAO Heng<sup>2</sup>, YANG Ruibin<sup>1</sup>

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Yebatan Branch of Huadian Jinshajiang Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Ganzi 627153, China

**Abstract** To investigate the sperm ultrastructure and kinematic characteristics of *Pareuchiloglanis anteanalis* and *Pareuchiloglanis gongshanensis*, a systematic comparative analysis was conducted using scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and a computer-assisted sperm analysis (CASA) system. The results revealed that, although the spermatozoa of both species consist of an acrosome-less head, a midpiece, and a single flagellum, they exhibit significant divergences in morphological configuration and swimming patterns. The spermatozoa of *P. anteanalis* were relatively longer, characterized by a slender head (length-to-width ratio: 1.51), a midpiece containing four umbrella-shaped, tightly arranged mitochondria, and a flagellum with symmetrical lateral fins. In contrast, the spermatozoa of *P. gongshanensis* were shorter, featuring a nearly spherical head (ratio: 1.08), a midpiece with 4-5 smaller mitochondria, and a shorter flagellum with more developed lateral fins. CASA measurements revealed no significant differences in average path velocity (VAP), straight-line velocity (VSL), or curvilinear velocity (VCL) between the two species. However, *P. anteanalis* sperm exhibited significantly higher straightness (STR) and beat-cross frequency (BCF) ( $P < 0.05$ ), resulting in a more linear swimming trajectory. Conversely, *P. gongshanensis* sperm showed a significantly greater amplitude of lateral head displacement (ALH) ( $P < 0.05$ ) and a more curved movement path. This study indicates that *P. anteanalis* sperm exhibit the classic “introsperm” phenotype adapted for internal fertilization, whereas *P. gongshanensis* sperm display traits characteristic of “aquesperm”, reflecting an adaptation to external fertilization.

**Keywords** *Pareuchiloglanis anteanalis*; *Pareuchiloglanis gongshanensis*; sperm ultrastructure; kinematic parameters; insemination strategy

(责任编辑:边书京)