

DOI: 10.12264/JFSC2025-0198

浅棕条鳅胚胎发育与早期发育特征

杨培灿^{1,2}, 张志明³, 苏奇², 贺凯², 张驰^{2*}, 隋丽英^{1*}

1. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457;
2. 西藏自治区农牧科学院水产科学研究所, 西藏 拉萨 850032;
3. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 湖北 武汉 430079

摘要: 为揭示雅鲁藏布江下游特有鱼类浅棕条鳅(*Schistura scaturigina*)的胚胎及仔鱼发育规律, 保护珍稀土著鱼类资源, 本研究从西藏墨脱县林贡日河和西莫河采集成熟亲鱼, 通过人工授精获得受精卵, 系统观察并描述其胚胎及早期仔鱼发育过程, 并结合部分条鳅亚科鱼类发育特征进行比较分析。结果显示, 浅棕条鳅成熟卵呈圆球形、淡黄色、沉性, 卵径为(1.08±0.03) mm, 具弱黏性, 吸水膨胀后卵径达(2.34±0.08) mm; 在(20.0±1.0) °C水温条件下, 受精卵历经 49 h 20 min 孵化出膜, 总积温为 986.65 h·°C; 胚胎发育可划分为受精卵、卵裂、囊胚、原肠胚、神经胚、器官形成及出膜 7 个阶段、共 33 个时期; 初孵仔鱼全长(4.18±0.30) mm, 半透明; 出膜 2 d 全身出现明显色素沉积; 出膜 5 d 卵黄囊基本吸收完毕; 出膜 15 d 仔鱼各功能器官基本发育形成。本研究首次报道了浅棕条鳅在人工繁殖条件下的胚胎及早期仔鱼发育的时序及特征, 为其人工繁育、苗种培育及资源保护和可持续利用提供理论依据与技术支撑。

关键词: 浅棕条鳅; 人工繁育; 胚胎发育; 仔鱼

中图分类号: S965

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2025)12–1734–15

浅棕条鳅(*Schistura scaturigina*, McClelland, 1839), 又名浅棕南鳅、阿萨姆南鳅, 隶属鲤形目(Cypriniformes)、鳅科(Cobitidae)、条鳅亚科(Noemacheilinae)、南鳅属(*Schistura*)^[1-2]。文献记载, 全球南鳅属鱼类超过 193 种^[1]。我国南鳅属鱼类共记录 37 种, 其中 31 种主要分布于云南^[3]。在雅鲁藏布江支流沪公河口以上江段分布有 1 种, 即浅棕条鳅^[2,4]。西藏地区除南鳅属外, 还分布有高原鳅属(*Triplophysa*)鱼类 13 种及阿波鳅属(*Aborichthys*)鱼类 1 种^[5-8]。墨脱阿波鳅(*Aborichthys kempfi*)与浅棕条鳅均为雅鲁藏布江下游特有鱼类, 但墨脱阿波鳅目前仅有文献记载, 近年来的资源调查中尚未见报道, 相关研究主要

由印度学者开展^[9-11]。浅棕条鳅属于杂食性小型鱼类, 野外环境下以水生昆虫和植物碎屑为食, 常栖息于支流河段的石砾缝隙或沙质溪流的深潭内^[5], 分布范围较为狭窄, 目前仅见于雅鲁藏布江下游墨脱段支流和察隅河流域^[12], 分布海拔可达 1300 m 以上^[9], 国外主要分布于印度、尼泊尔、不丹以及孟加拉国^[13-14]。浅棕条鳅体侧两边具有独特横向条带斑纹, 在人工驯养条件下可以摄食颗粒饲料, 具有作为观赏鱼类开发的潜力。作为西藏仅有的南鳅属鱼类, 浅棕条鳅在雅鲁藏布江下游水域生态系统中占据重要地位^[15], 但其生存现状目前面临着诸多威胁与挑战。

雅鲁藏布江大峡谷是全球生物多样性热点区

收稿日期: 2025-08-02; 修订日期: 2025-08-28。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1200703); 西南地区重点水域渔业资源与环境调查专项(CJW2023034); 西藏自治区重点科技计划项目(XZ202301ZY0012N)。

作者简介: 杨培灿, 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源与生态学. E-mail: yangpeican11@163.com

*通信作者: 张驰, 研究员, 研究方向为渔业资源与生态学, E-mail: zc0891@163.com; 隋丽英, 博士, 教授, 研究方向为卤水生态与生物资源利用, E-mail: suily@tust.edu.cn

域, 其独特的水体生态系统蕴藏着极为丰富且独特的鱼类资源^[9]。大峡谷地区地理环境复杂, 为不同适应性鱼类提供了多样化的生存空间。然而在全球变暖背景下, 叠加青藏高原东南地带特殊地质构造的影响, 雅鲁藏布江下游生态环境脆弱, 泥石流、滑坡、地震等地质灾害持续影响该流域鱼类资源的种群稳定。此外, 人类活动干扰、过度捕捞以及外来物种入侵等因素, 也会对该流域的鱼类种群资源构成威胁^[16-17]。因此, 在藏东南水力资源开发的大背景下, 加强对浅棕条鳅等特有鱼类的资源保护工作显得尤为重要。

鉴于雅鲁藏布江下游复杂的地理环境等因素, 有关浅棕条鳅的研究多集中于物种分类鉴定、形态特征描述以及资源评估等方面^[2,8,16], 而人工繁育以及胚胎发育等关键领域的研究处于空白。本研究采集野外浅棕条鳅亲鱼进行人工繁育实验, 旨在探明浅棕条鳅胚胎发育时序规律以及仔鱼生长模式, 填补相关繁育技术研究空白, 为规模化苗种繁育提供科学支撑。该成果对后续该鱼种的资源保护开发具有重要支撑作用, 对雅鲁藏布江下游特色鱼类资源可持续利用具有战略意义。

1 材料与方法

1.1 人工繁殖

1.1.1 亲鱼的选择 2024年4月在墨脱县林贡日河与西莫河河段通过地笼采集若干野生浅棕条鳅亲鱼。样本带回后, 使用稀释后浓度为 20 mg/L 的高锰酸钾溶液浸泡 1~3 min 进行消毒处理, 随后转移至消毒后的暂养池中驯养。经性腺发育检查, 符合繁殖标准的雌鱼表现为腹部膨大柔软, 肉眼可见腹腔内卵粒轮廓, 解剖后观察到淡黄色饱满卵粒; 雄鱼轻压腹部生殖孔即有乳白色精液流出。最终筛选标准为性腺发育良好、活力旺盛、体质健壮, 其中雌鱼体重 3~4 g, 雄鱼体重 2~3 g, 这些优质亲本被用于后续的人工繁殖工作。

1.1.2 催产剂注射 繁殖过程中, 部分雌性亲鱼需通过注射适量催产激素以诱导排卵并提升卵子质量。实验采用复合激素方案, 包括促黄体素释放激素类似物(LHRH-A₂)、绒毛膜促性腺激素(HCG)以及马来酸地欧酮(DOM)。雌鱼采用两针

注射法: 第一针注射 LHRH-A₂ 3 μg/kg+DOM 2 mg/kg。12 h 后第二针注射 LHRH-A₂ 10 μg/kg+DOM 8 mg/kg+HCG 2000 IU/kg。雄鱼仅注射一针, 与雌鱼第二针注射同步但注射剂量减半。操作时将亲鱼从水体中取出, 以干净无菌的毛巾包裹头尾防止跳动, 针头对准胸鳍基部行肌肉注射, 进针深度控制在 2~3 mm。本文所述的进针深度控制对于其他体型的鱼种可能并不适用, 实际操作中应合理调整进针深度, 避免刺入过深损伤内脏。注射完成后, 将雌雄亲鱼分开放回暂养池中。

1.1.3 人工授精 第二针催产注射 12 h 后观察催产情况。以干净的毛巾包裹亲鱼头背部, 保持鱼体垂直向上体位; 佩戴无菌手套, 沿腹中线向生殖孔方向轻柔施压, 使卵粒自然滑落至盆中, 残留于鱼体表或操作者手上的卵粒使用羽毛轻刮收集。采精操作参照雌鱼流程, 同步以生理盐水润洗生殖孔区域促进排精。采卵、采精完毕后, 亲鱼立即转移至恢复池。之后采用人工干法授精的方式, 使用羽毛将精卵轻柔混匀约 30~60 s, 操作力度以不产生大量泡沫且能确保精卵充分接触为宜, 随后注入曝气清水, 匀速搅拌 2~3 min 使受精卵激活并充分吸水膨胀, 对于明显未受精或质量较差的卵粒直接挑出避免污染。

1.1.4 孵化 采用人工干法授精获得受精卵约 2000 粒, 将其转入孵化筛中微流水孵化。孵化水取自雅鲁藏布江下游溪流水并经初步过滤沉淀, 水体参数为: 水温(20.0±1.0) °C、溶解氧 8.5 mg/L、pH 7.0~7.5。孵化期间每隔 3 h 虹吸清除霉变卵和坏死胚胎, 防止污染并维持水质稳定。

1.2 胚胎和仔鱼观察

1.2.1 胚胎观察 人工授精操作完成 1 min 后, 随机抽取部分受精卵置于玻璃培养皿进行胚胎发育观察, 每次取样时将培养皿经清水彻底冲洗, 并添加适量孵化用水覆盖受精卵以保持湿润。在胚胎发育至囊胚阶段之前每 10 min 取样观察, 后根据胚胎实际发育进程调整观察间隔, 每次随机从孵化筛的不同区域选取 30 枚胚胎样本。使用体视显微镜(奥斯微 HK-380)观察胚胎形态特征并拍摄各发育时期的图片, 同时记录发育时期的水温、形态变化并测量相关数据。由于胚胎个体发

育差异等原因,各发育时期划分按照 50%以上个体呈现特定阶段典型特征为标准^[18-23]。浅棕条鳅的胚胎发育阶段和时期划分参考部分鱼类发育特征^[18,21-25]。积温计算公式:胚胎发育各阶段积温=该阶段发育时间×水温。

1.2.2 仔鱼观察 仔鱼完成出膜后,立即将其转移至玻璃养殖缸进行培育,鱼缸规格 30 cm×20 cm×50 cm,配备曝气系统增氧,养殖密度控制在 300~500 尾/缸。每日随机抽取 3~5 尾样本,体视显微镜记录并测量仔鱼全长、肛后长、尾长数据。出膜约 15 d 后,随着仔鱼活动能力增强,采用 40~60 mg/L 的 MS-222 溶液进行麻醉处理。待样本进入麻醉稳定状态后,立即进行拍摄和数据记录,之后迅速使用清水复苏放归原养殖缸。

1.3 数据处理

使用 Excel 软件进行原始数据统计,使用 SPSS Statistics 27 对仔鱼数据进行数据统计学分析,使用 PhotoShop 2021 软件对拍摄图片进行修正与整合,使用 Origin 2024b 对仔鱼数据进行线性拟合和绘图。

2 结果与分析

2.1 卵及催产效果

浅棕条鳅未受精成熟卵呈标准球形,具淡黄色光泽及弹性特征,初始卵径为(1.08±0.03) mm。此次干法人工授精获得的受精卵不易沾染杂质,特征表现为弱黏性、沉性以及弹性,吸水膨胀后卵径达(2.34±0.08) mm。实验期间定期筛除发白、霉变死卵以防控水霉。本次实验获受精卵约 2000 粒,平均受精率 95.60%,平均孵化率 90.40%,最终健康仔鱼 1700 余尾。

2.2 胚胎发育过程

在水温(20±1) °C 的条件下,浅棕条鳅胚胎发育从受精卵到出膜历时 49 h 20 min,总积温 986.65 h·°C。浅棕条鳅胚胎发育全过程可以分为受精卵、卵裂、囊胚、原肠胚、神经胚、器官形成以及出膜共 7 个主要阶段,共 33 个可识别的具体时期。详细的发育时序数据见表 1 及图 1。

2.2.1 受精阶段 浅棕条鳅受精卵呈黄色,卵径在 30 min 内吸水膨胀至最大,卵间隙明显,卵膜透明(图 1-1)。

表 1 浅棕条鳅胚胎发育及特征

Tab. 1 Features of embryonic development in *Schistura scaturigina*

发育阶段 development stage	发育时期 embryonic development stage	发育期特征 developmental characteristics	发育时间 time after fertilization	积温/(h·°C) accumulated temperature	图序 figure ordinal
受精卵 fertilized eggs	受精卵 fertilized eggs	黄色,圆球状,卵黄物质丰富,吸水后膨胀,卵间隙较大,卵膜透明状	0 h	0	图 1-1
卵裂 cleavage	胚盘隆起 blastodisc stage	细胞质向动物极移动并逐渐隆起形成胚盘	1 h 10 min	23.33	图 1-2
	2 细胞期 2-cell stage	胚盘表面凹陷形成分裂沟,将胚盘分裂为大小相似的 2 个分裂球	1 h 30 min	6.67	图 1-3
	4 细胞期 4-cell stage	分裂球再次分裂,形成大小相似的 4 个细胞	1 h 40 min	3.33	图 1-4
	8 细胞期 8-cell stage	继续分裂形成 8 个细胞	1 h 50 min	3.33	图 1-5
	16 细胞期 16-cell stage	继续分裂形成 16 个细胞	2 h 10 min	6.67	图 1-6
	32 细胞期 32-cell stage	继续分裂形成 32 个细胞	2 h 23 min	4.33	图 1-7
	64 细胞期 64-cell stage	继续分裂形成 64 个细胞	2 h 50 min	9.00	图 1-8
	多细胞期 muti-cell stage	多次分裂后形成细胞团,细胞间隙尚且可见	3 h 15 min	8.33	图 1-9
囊胚 blastula	桑葚期 morula stage	细胞持续分裂,细胞之间界限逐渐模糊,呈桑葚状	4 h 10 min	18.33	图 1-10
	囊胚早期 early blastula	细胞团隆起形成囊胚,细胞界限更加模糊	5 h 06 min	18.67	图 1-11
	囊胚中期 middle blastula	囊胚高度下降,开始变扁下包,细胞间隙基本消失,呈小丘状	6 h 36 min	30.00	图 1-12
	囊胚晚期 late blastula	囊胚层继续下包至约 1/4 卵黄处	7 h 58 min	27.33	图 1-13

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

发育阶段 development stage	发育时期 embryonic development stage	发育期特征 developmental characteristics	发育时间 time after fertilization	积温(h·°C) accumulated temperature	图序 figure ordinal
原肠胚 gastrula	原肠早期 early gastrula stage	胚层沿卵黄下包, 位置约 1/2 处, 胚层两端出现凸起分化	9 h 06 min	22.67	图 1-14
	原肠中期 mid gastrula stage	胚层继续下包, 位置约 2/3 处	9 h 52 min	15.33	图 1-15
	原肠晚期 late gastrula stage	胚层继续下包且速度加快, 位置约 3/4 处	11 h 22 min	30.00	图 1-16
神经胚 neural	神经胚期 neurula stage	胚层下包达 4/5, 卵黄栓外露, 胚孔形成, 逐渐形成神经板	13 h 17 min	38.33	图 1-17
	胚孔封闭期 blastopore closing stage	卵黄被胚层完全包裹, 胚孔逐渐封闭至消失	14 h	14.33	图 1-18
器官形成 organ formation	肌节出现期 sarcomere stage	神经板两端不断形成肾形隆起, 可见眼泡雏形, 胚体中段出现形成肌节	15 h 06 min	22.00	图 1-19
	眼囊出现期 eye sac appearance	胚体头部变大, 脑泡中逐渐发育形成长椭圆形的眼囊	16 h 34 min	29.33	图 1-20
	耳囊出现期 ear capsule appearance	胚体 1/4 处出现半透明椭圆状的耳囊, 不断膨大成型	19 h 17 min	54.33	图 1-21
	尾泡出现期 caudal vesicle appearance	胚体尾部出现泡状结构的尾泡, 靠近胚体尾部的卵黄向内凹陷	20 h 32 min	25.00	图 1-22
	尾芽出现期 tail bud appearance	尾泡发育成尾芽, 胚体尾部继续向后弯曲, 卵黄凹陷明显	21 h 50 min	26.00	图 1-23
	晶体出现期 eye lens forming stage	眼囊继续发育, 膨大成型, 眼囊内部形成晶体, 尾部卵黄加快吸收	22 h 25 min	11.67	图 1-24
	肌肉效应期 muscle response stage	身体开始出现抽动, 平均 2~5 次/min, 胚体环绕卵黄约 2/3	22 h 50 min	8.33	图 1-25
	心脏原基出现期 cardiac primordium appearance	头部胚体与卵黄之间出现围心腔, 尾部卵黄基本吸收	25 h 10 min	46.67	图 1-26
	心跳期 stage of heart beating	心脏开始出现轻微且无规律的跳动	26 h 30 min	26.67	图 1-27
	嗅囊出现期 olfactory sac appearance	头部胚体形成嗅囊	27 h 40 min	23.33	图 1-28
	耳石形成期 otolith formation period	耳囊变大、轮廓更加清晰, 在椭圆形耳囊内部形成两个明显的小黑点即为耳石	29 h	26.67	图 1-29
	尾鳍褶皱出现期 caudal fin fold appearance	尾部胚体继续发育, 尾牙逐渐细化形成尾鳍褶皱	31 h 02 min	40.67	图 1-30
	血液循环期 blood circulation	心脏及胚体躯干可以观察到半透明液体流动, 身体扭动加剧	36 h	99.33	图 1-31
胸鳍原基出现期 pectoral fin primordium	耳囊后部出现胸鳍原基, 抱于卵黄之上, 扭动愈发加剧为出膜做准备	38 h 59 min	59.67	图 1-32	
出膜 hatching	出膜期 hatching	不断发生碰撞使得头部和尾部先出膜, 身体不再卷曲, 侧躺于水体下方	49 h 20 min	207.00	

2.2.2 卵裂阶段 受精 50 min 后, 随着细胞质向动物极的定向移动开始逐渐隆起, 出现胚盘雏形, 植物极内部与动物极连接处有明显的放射丝线状纹路。受精 1 h 10 min 后, 胚盘高度达到最大, 进

入胚盘隆起期(图 1-2)。受精 1 h 30 min 后, 胚盘中间出现分裂沟, 随后逐渐分裂为 2 个大小相近的细胞, 大小约占整个卵黄的 1/3, 进入 2 细胞期(图 1-3)。受精 1 h 40 min 后, 胚盘发生第二次卵

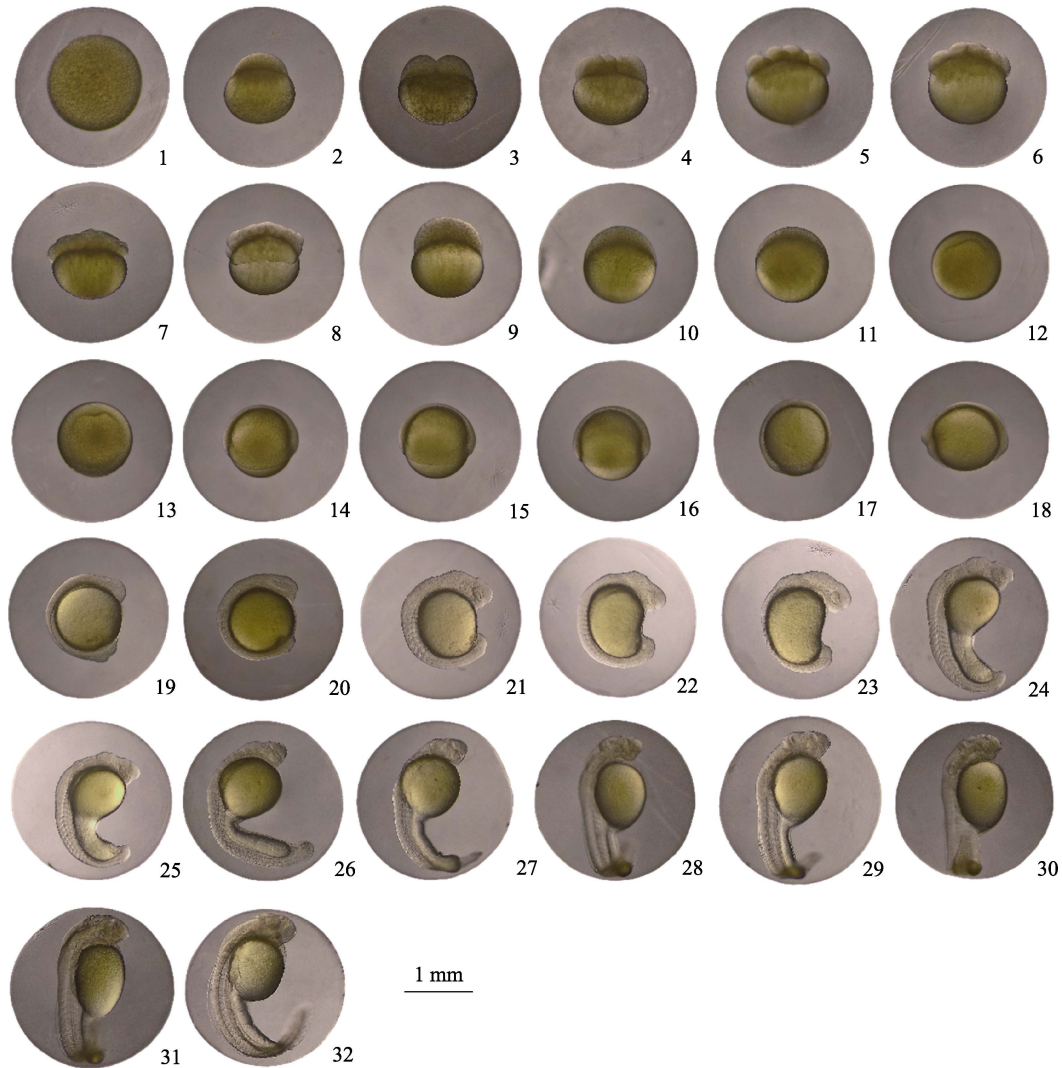


图 1 浅棕条鳅胚胎发育情况

1. 受精卵; 2. 胚盘隆起期; 3. 2 细胞期; 4. 4 细胞期; 5. 8 细胞期; 6. 16 细胞期; 7. 32 细胞期; 8. 64 细胞期; 9. 多细胞期; 10. 桑葚期; 11. 囊胚早期; 12. 囊胚中期; 13. 囊胚晚期; 14. 原肠早期; 15. 原肠中期; 16. 原肠晚期; 17. 神经胚期; 18. 胚孔封闭期; 19. 肌节出现期; 20. 眼囊出现期; 21. 耳囊出现期; 22. 尾泡出现期; 23. 尾芽出现期; 24. 晶体出现期; 25. 肌肉效应期; 26. 心脏原基出现期; 27. 心跳期; 28. 嗅囊出现期; 29. 耳石形成期; 30. 尾鳍褶皱出现期; 31. 血液循环期; 32. 胸鳍原基出现期。
比例尺: 1 mm.

Fig. 1 Embryonic development of *Schistura scaturigina*

1. Fertilized eggs; 2. Blastodisc stage; 3. 2-cell stage; 4. 4-cell stage; 5. 8-cell stage; 6. 16-cell stage; 7. 32-cell stage; 8. 64-cell stage; 9. Multi-cell stage; 10. Morula stage; 11. Early blastula; 12. Middle blastula; 13. Late blastula; 14. Early gastrula stage; 15. Mid gastrula stage; 16. Late gastrula stage; 17. Neurula stage; 18. Blastopore closing stage; 19. Sarcomere stage; 20. Eye sac appearance; 21. Ear capsule appearance; 22. Caudal vesicle appearance; 23. Tail bud appearance; 24. Eye lens forming stage; 25. Muscle response stage; 26. Cardiac primordium appearance; 27. Stage of heart beating; 28. Olfactory sac appearance; 29. Otolith formation period; 30. Caudal fin fold appearance; 31. Blood circulation; 32. Pectoral fin primordium. Scale bar: 1 mm.

裂, 分裂面垂直于 2 细胞期的分裂沟, 形成 4 个空间对称的细胞, 进入 4 细胞期(图 1-4)。受精 1 h 50 min 后, 第三次卵裂垂直于前一阶段, 形成两排并排的细胞, 进入 8 细胞期(图 1-5)。受精 2 h 10 min 后, 形成 16 个细胞, 进入 16 细胞期

(图 1-6)。受精 2 h 23 min 后, 形成 32 个细胞, 因竞争导致发育不均, 细胞体积异质性显著, 进入 32 细胞期(图 1-7)。受精 2 h 50 min 后, 形成 64 个细胞, 进入 64 细胞期(图 1-8)。受精 3 h 15 min 后, 细胞继续分裂, 但排列不再规整, 细胞变小, 密

度增大,聚集成细胞团,进入多细胞期(图 1-9)。该阶段整体发育较快,基本变化时间在 10~20 min,总积温为 64.99 h·°C。

2.2.3 囊胚阶段 受精 4 h 10 min 后,随着细胞持续分裂,细胞间界限逐渐模糊,细胞团隆起形成典型桑葚状结构,进入桑葚胚期(图 1-10)。随后细胞团高度逐渐降低,细胞间界限进一步模糊,至受精 5 h 06 min 后进入囊胚早期(图 1-11)。受精 6 h 36 min 后,囊胚高度持续下降并开始扁平化,同时向卵黄下包,但仍保持与卵黄周隙的明显界限,进入囊胚中期(图 1-12)。受精 7 h 58 min 后,囊胚下包至卵黄的 1/4 处,与卵黄仅存颜色差异而无形态界限,进入囊胚晚期(图 1-13)。该阶段总积温为 94.33 h·°C。

2.2.4 原肠胚阶段 受精 9 h 06 min 后,胚胎外包过程推进至卵黄约一半的位置,胚胎外层组织增厚并开始形成胚环,进入原肠早期(图 1-14)。受精 9 h 52 min 后,包裹范围扩展至卵黄的约 2/3 处,可见胚盾结构形成,首尾两端呈现异质性的膨大特征,进入原肠中期(图 1-15)。受精 11 h 22 min 后,外包过程继续深入,胚层下包覆盖卵黄约 3/4,进入原肠晚期(图 1-16)。该阶段总积温为 68.00 h·°C。

2.2.5 神经胚阶段 受精 13 h 17 min 后,胚层继续下包至约 4/5 处,出现卵黄栓外露、胚孔形成等特征,进入神经胚期(图 1-17)。受精 14 h 后,胚层完成对卵黄的包裹,胚孔启动闭合并最终完全关闭,进入胚孔封闭期(图 1-18)。该阶段总积温为 52.66 h·°C。

2.2.6 器官形成阶段 受精 15 h 06 min 后,胚体锥形显现,两端形成不对称的肾形隆起,头部出现眼泡原基,胚体中段形成肌节,进入肌节出现期(图 1-19)。受精 16 h 34 min 后,肌节数量增加,眼囊呈现清晰的椭圆形轮廓,进入眼囊出现期(图 1-20)。受精 19 h 17 min 后,肌节继续增多,在胚体前 1/4 处出现耳板内陷,形成半透明耳囊,进入耳囊出现期(图 1-21)。受精 20 h 32 min 后,胚体尾部出现尾泡结构,同时卵黄在尾部区域呈现豆状凹陷,进入尾泡出现期(图 1-22)。受精 21 h 50 min 后,尾泡分化为尾芽,卵黄凹陷加深,头

部轮廓显著,眼区晶状体板增厚,进入尾芽期(图 1-23)。受精 22 h 25 min 后,眼囊膨大并形成晶体,尾部吸收加速,胚体增厚且肌节明显,进入晶体出现期(图 1-24)。受精 22 h 50 min 后,胚体开始微弱抽动,胚体舒展开,环绕卵黄约 2/3,进入肌肉效应期(图 1-25)。受精 25 h 10 min 后,胚体与卵黄囊之间分裂出间隙,形成围心腔,进入心脏原基出现期(图 1-26)。受精 26 h 30 min 后,围心腔中心脏开始出现轻微且无规律的跳动,胚体尾部卵黄吸收完毕,胚体尾鳍褶板分化形成,进入心跳期(图 1-27)。受精 27 h 40 min 后,在胚体头部眼囊前方出现较小的椭圆轮廓,即为嗅囊,进入嗅囊出现期(图 1-28)。受精 29 h 后,耳囊体积增大,内部可见 2 对水平排列的耳石,进入耳石形成期(图 1-29)。受精 31 h 02 min 后,尾芽延伸并分化出尾鳍褶,胚体运动频率增加,进入尾鳍褶皱出现期(图 1-30)。受精 36 h 后,心管及胚体可见微弱血液循环,胚体运动显著,进入血液循环期(图 1-31)。受精 38 h 59 min 后,耳囊后部出现半透明的胸鳍原基并抱于卵黄之上,此时尚未具有运动能力,只能靠身体的扭动为出膜做准备,进入胸鳍原基出现期(图 1-32)。进入器官形成期后,胚体发育进一步放缓,在器官发育后期,随着身体抽动、心跳、血液循环的发育,为出膜的准备时间逐渐加长,确保出膜前器官发育的完成。该阶段总积温为 499.67 h·°C。

2.2.7 出膜阶段 受精 41 h 11 min 后,观察到个别开始出膜,出膜时躯体开始出现频繁且剧烈的来回扭动,胚体头部和尾部不断与卵膜发生碰撞并率先出膜,出膜后躯体慢慢不再弯曲,同时侧躺卧于水体下方。受精 49 h 20 min 后,近 50%完成出膜。该阶段总积温为 207.00 h·°C。

2.3 仔鱼期

2.3.1 早期仔鱼形态发育特征 初孵仔鱼全长(4.18±0.30) mm,鱼体呈半透明色,视网膜无色素沉积;头部呈向腹部弯曲状,围心腔紧贴卵黄囊;躯干及尾部完全伸直;卵黄依旧较大,未完全吸收,末端紧贴肛门且肛突明显;血液循环系统可见,为透明色;仔鱼静息时呈侧卧位沉于水体底部,间歇性肌节收缩(图 2A)。

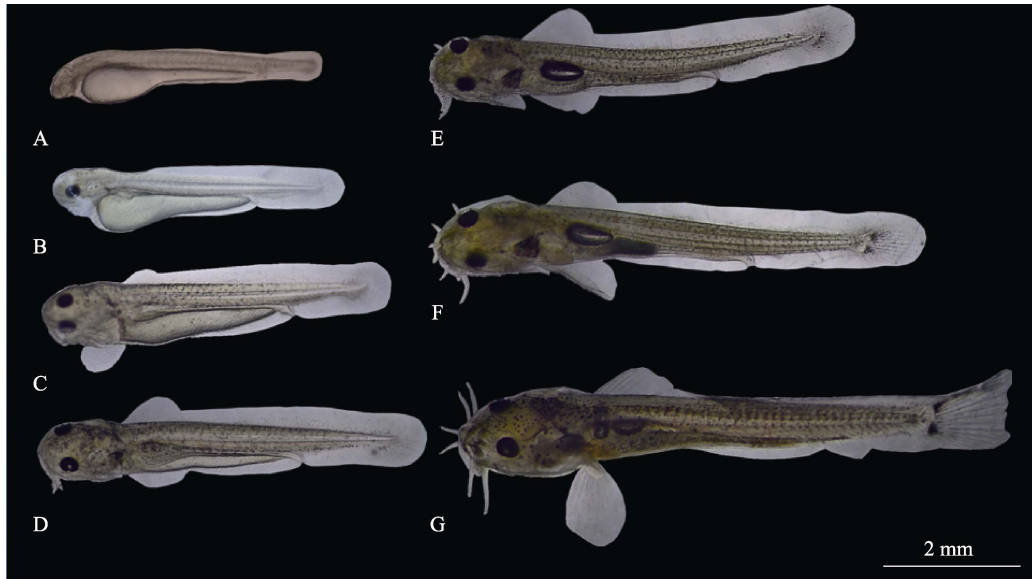


图 2 浅棕条鳅卵黄囊仔鱼发育情况

A. 初孵仔鱼; B. 1 日龄仔鱼; C. 2 日龄仔鱼; D. 3 日龄仔鱼; E. 5 日龄仔鱼; F. 10 日龄仔鱼; G. 15 日龄仔鱼. 比例尺: 2 mm.

Fig. 2 Development of yolk-sac larvae of *Schistura scaturigina*

A. First hatchlings; B. 1-day-old larvae; C. 2-day-old larvae; D. 3-day-old larvae; E. 5-day-old larvae; F. 10-day-old larvae; G. 15-day-old larvae. Scale bar: 2 mm.

1 日龄仔鱼全长(4.51 ± 0.39) mm, 躯体保持半透明色, 视网膜出现黑色素沉积, 可见口凹; 头部弯曲程度减小, 与躯干、尾部趋于直线排列; 血液循环整体呈淡红色; 仔鱼活动频率提升, 偶尔出现爆发式冲游(图 2B)。

2 日龄仔鱼全长(5.41 ± 0.13) mm, 躯体两侧的胸鳍清晰可辨; 头部及躯干黑色素持续沉积, 背部排布较明显黑色梅花素斑; 卵黄囊前部吸收近半且呈瘪状, 后部仍维持饱满状态; 头部触须出现凸起和锥形, 躯体血液循环信号显著增强, 心脏部位血液循环呈红色, 躯干主体血液循环仍为淡红色; 可短时平游(图 2C)。

3 日龄仔鱼全长(5.63 ± 0.20) mm, 头部轮廓呈现近椭圆, 前后端圆弧形、两侧扁直, 且较前日有更明显的黑色素沉积; 触角出现初级分叉结构; 背鳍出现不规则齿痕状基质; 卵黄囊经进一步吸收, 整体呈现瘪状; 躯体消化道雏形基本显现; 多数仔鱼在水底做平游运动, 活动状态显著活跃(图 2D)。

5 日龄仔鱼全长(6.24 ± 0.25) mm, 头部变得更加宽厚, 触须出现锯齿状分化, 鳃弧初步形成但鳃丝尚未明显分化, 头部和躯干黑色素沉积增加,

胸鳍面积扩大, 卵黄囊基本完成吸收; 躯体内部可见明显椭圆形空泡状膜质鳔, 消化道呈透明细管状; 尾鳍基处出现 2 块竖向排列的不连续黑色素积累; 此时仔鱼进入混合营养阶段, 可主动摄食粉末混合饲料, 且可见肠道内容物; 游动能力增强, 在水中垂直浮动(图 2E)。

10 日龄仔鱼全长(7.20 ± 0.22) mm, 头部发育出明显的 3 对短须状触角; 体色因色素沉积整体呈现棕黄色, 鳃开始分化; 膜质鳔前部发育出 1 对小球状骨质鳔, 呈哑铃状; 胸鳍进一步发育扩展至微张状态, 通过规律性拍打辅助游泳, 支鳍骨形成, 尾鳍基部出现鳍条骨原基; 摄食强度显著增强, 以卤虫无节幼体为生物饵料; 张口明显, 消化道内可见明显饵料团块, 肛口区域频繁排出代谢物(图 2F)。

15 日龄仔鱼全长(8.85 ± 0.54) mm, 头部上方的点状沉积色素逐渐加深并聚集成颗粒状, 6 条触角随着发育持续延长; 背鳍和臀鳍发育成型且鳍条明显, 胸鳍与尾鳍鳍条呈辐射状褶皱; 摄食频繁且游动活跃(图 2G)。

2.3.2 早期仔鱼生长情况 对浅棕条鳅出膜后早期仔鱼的全长、肛后长以及尾长进行测量和记录,

并通过多项式线性回归方程拟合其生长情况(图 3)。结果表明,三类体长指标的生长发育总体均呈上升趋势,且变化趋势较为一致。但发育速率存在阶段性变化:0~8 日龄生长速率逐渐降低,8 日龄后显著回升。作者认为,5 日龄前仔鱼主要依赖卵黄囊内源营养维持生长,随着卵黄囊消耗殆尽,内源营养供给减少,生长速率随之下降。

5~8 日龄已进入外源性摄食,但此阶段三类体长的生长速率仍呈现同步降低趋势,可能与摄食器官发育不完善、摄食效率低下以及摄食行为的学习成本有关。8 日龄后,随着消化系统结构和功能的成熟,摄食效率显著提升,驱动生长速率显著回升,该趋势在全长、肛后长和尾长指标中均体现一致。

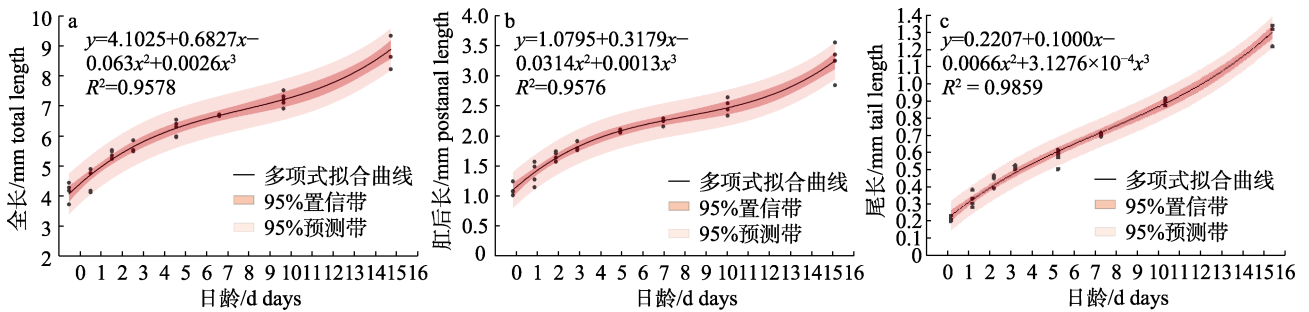


图 3 浅棕条鳅早期仔鱼生长指数

a. 仔鱼全长随日龄增长关系; b. 仔鱼肛后长随日龄增长关系; c. 仔鱼尾长随日龄增长关系。

Fig. 3 Early larval growth indexes of *Schistura scaturigina*

a. Relationship between the total length of larvae and days growth; b. Relationship between the postanal length of larvae and days growth; c. Relationship between the tail length of larvae and days growth.

3 讨论

鳅科(Cobitidae)的系统分类迄今仍存在学术争议。部分学者支持将鳅科划分为条鳅亚科(Nemacheilinae)、沙鳅亚科(Botiinae)和花鳅亚科(Cobitinae),还有的学者则将沙鳅亚科和花鳅亚科归为鳅科,条鳅亚科和平鳍鳅亚科归为平鳍鳅科(Balitoridae)^[26-27]。目前国内鳅科发育生物学研究多聚焦于高原鳅属(*Triplophysa*),本研究以雅鲁藏布江下游墨脱段分布的浅棕条鳅为研究对象,对比同亚科 7 种高原鳅属鱼类以及须鳅属(*Barbatula*)的北方须鳅(*Barbatula barbatula nuda*)的胚胎发育特征,结果如表 2 所示。

3.1 浅棕条鳅与其他条鳅亚科鱼类的胚胎发育特征比较

本研究参考其他淡水鱼类胚胎发育相关结果,对浅棕条鳅胚胎发育进行形态特征记录,将胚胎发育时序划分为 7 个阶段共 33 个时期,符合“受精-卵裂-胚体形成-器官形成-出膜”的顺序^[18,21-25]。浅棕条鳅成熟受精卵呈淡黄色,遇水后表现出的

轻微黏性以及沉性特征与表 2 中的鳅科鱼类基本相似。弱黏性和沉性的特征可以帮助卵粒更好地附着在溪流砂石底质上面,体现了浅棕条鳅的环境适应性。浅棕条鳅成熟卵径(1.08±0.03) mm,与高原鳅属鱼类相近,但显著小于同亚科的北方须鳅(2.15±0.07) mm。这种跨属卵径差异可能反映了不同的繁殖适应策略:北方须鳅卵径大、卵膜厚且强黏性,适于附着在缓流或静水基质表面;而浅棕条鳅卵径本身较小,吸水膨胀后可达(2.34±0.08) mm,显著高于同属鱼卵,这些差异可能与物种特异性以及生境异质性有关。浅棕条鳅的卵径和卵周隙都较大,较大的卵周隙使其可以像拉萨裂腹鱼鱼卵一样随水流轻微滚动或沉入缓水区的沙子砾石间隙,为受精卵提供规避捕食者的场所并提升孵化率^[29]。

鱼类的胚胎发育会受到各自遗传多样性的影响,同时也会受到众多外在和环境因子的影响,例如受精前母体的应激水平、孵化时的温度、pH、溶氧、光照、水流速度等^[18-19,23-25,30-35]。其中水温无疑是关键因素,适宜的孵化温度是保证胚胎

表 2 浅棕条鳅与其他条鳅亚科鱼类胚胎发育特点比较
Tab. 2 Comparison of embryonic developmental characteristics between *Schistura scaturigina* and other Noemacheilinae fish species

物种名称 species name	浅棕条鳅 <i>Schistura scaturigina</i>	贝氏高原鳅 ^[18] <i>Triplophysa bleekeri</i>	安氏高原鳅 ^[19] <i>Triplophysa angeli</i>	叶尔羌高原鳅 ^[20] <i>Triplophysa yarkandensis</i>	西昌高原鳅 ^[21] <i>Triplophysa xichangensis</i>	东方高原鳅 ^[22] <i>Triplophysa orientali</i>	秀丽高原鳅 ^[23] <i>Triplophysa venusta</i>	长身高原鳅 ^[23] <i>Triplophysa tenui</i>	北方须鳅 ^[23] <i>Barbatula barbatula nuda</i>
卵色 color of egg	淡黄色	淡黄色	金黄色, 少数淡黄色	淡黄色	淡黄色	淡黄色	黄色	灰色透明	浅黄色
卵粒性状 egg trait	微黏性, 沉性	遇水强黏性	弱黏性, 沉性	微黏性, 略有沉性	遇水强黏性	遇水微黏性, 沉性	黏性	黏性, 沉性	遇水强黏性, 弹性
卵径/mm	1.08±0.03	1.02±0.22	0.87-1.05	0.60±0.052	0.9±0.1	0.97-1.11	1.03	1.07±0.10	2.15±0.07
egg diameter									
吸水后卵径/mm	2.34±0.08	1.18±0.05	1.24-1.41	0.81±0.093	-	1.14±0.05	1.33	1.50±0.09	2.35±0.05
egg diameter after absorbing water									
水温/°C	20.0±1.0	9.0-12.8	16.3-18.1	20.0±1.0	15.0-17.0	16.0±0.5	17.5±1.0	20.0±1.0	8.5-25.0
water temperature									
孵化时间 time from fertilization to hatching	49 h 20 min	405 h 03 min	119 h 44 min	65 h 34 min	72 h	132 h 09 min	77 h 45 min	86 h 56 min	98 h 54 min
孵化积温/(h·°C)	986.67	3646-5185	2083.4	1311.3	1080-1224	2113.6	1360.6	1826	1656.6
accumulated temperature from fertilization to hatching									
出膜时仔鱼全长/mm	4.18±0.30	4.32±0.23	4.58	2.23	4.2	4.86±0.09	3.66	4.81±0.17	4.9±0.8
newly hatched larvae size									
出膜时仔鱼心跳次数/min	-	95	95-98	-	-	-	120	-	-
heartbeat of newly hatched larvae									

注: -代表没有数据。
Note: - indicates no data.

正常发育以及提高孵化率的关键^[24]。李岑等^[32]认为可能存在相关受温控的分子途径调节着胚胎发育进程,同时这一途径也受到其他环境因子及遗传因素的影响,进而表现出了个体差异。本研究浅棕条鳅孵化用水为雅鲁藏布江下游天然水源,对其进行初步过滤和沉淀除杂,在微流水孵化筛中孵化,温度为 (20.0 ± 1.0) °C,与浅棕条鳅繁殖期自然水体温度接近以模拟最佳孵化条件。作者认为,在进行鱼类胚胎养护的过程中,应尽可能保证水温、溶氧、pH 等环境因子与自然条件下接近可以促进胚胎内部分子调控机制的运行,使胚胎顺利发育。

浅棕条鳅孵化时长 49 h 20 min,明显短于表 2 中的高原鳅属鱼类及北方须鳅,但稍长于春夏季孵化的一些鳅科鱼类。譬如泥鳅在 19.5~22.0 °C 下孵化时间 24 h 20 min^[31],大鳞副泥鳅在 21~23 °C 下孵化时间 38 h 10 min^[36]。高原鳅属胚胎发育普遍迟缓,表 2 中贝氏高原鳅在 9.0~12.8 °C 的相对低温条件下所需的发育时间长达 405 h 03 min^[18],这与高原环境水体温度较低密切相关,同时溶氧的不均匀分布以及个体遗传差异也会影响胚胎发育时长^[18-19]。何德奎等^[9]指出加热萨-帮辛段为雅鲁藏布江青藏高原和东洋区的分界。雅鲁藏布江下游墨脱江段支流众多,不同于中上游典型的高原冷水气候,更适合喜温、暖水的南亚山地鱼种。浅棕条鳅适宜水温为 (20.0 ± 1.0) °C,与叶尔羌高原鳅和长身高原鳅相同。但同为春夏季产卵鱼类,在孵化时长上更偏向泥鳅等内陆温水鱼类。浅棕条鳅总积温 986.65 h·°C,相较表 2 其他条鳅亚科的鱼类积温要低,胚胎的代谢和发育受环境和遗传因素的双重调控^[32]。

浅棕条鳅和其他条鳅亚科鱼类胚胎发育时序基本相同。神经胚期之前发育进程同源性显著,器官形成初期出现差异。鱼类胚胎器官形成初期大多以肌节和眼囊形成为标志;浅棕条鳅后续发育时序为肌肉效应期-心跳期-耳石形成期,而贝氏高原鳅、安氏高原鳅、叶尔羌高原鳅、东方高原鳅、长身高原鳅都是耳石形成期早于心跳期,且两个特征出现的时期接近(东方高原鳅除

外)^[18-20,22,23]。在具肌肉效应期记录的东方高原鳅、秀丽高原鳅、长身高原鳅 3 种高原鳅属鱼类研究中:东方高原鳅该期介于耳石形成期与心跳期之间,秀丽高原鳅与长身高原鳅肌肉效应期则早于两者^[22-23,25]。上述鱼类器官形成的发育时序差异主要归因于种间差异,同时可能受研究者采用的记录标准或观察方法等因素的影响。此外,浅棕条鳅分布于雅鲁藏布江下游的中低海拔地区,其水温、溶氧等环境条件与典型分布于高海拔冷水环境的高原鳅属鱼类存在显著差异。这些环境因子作为外部选择压力,很可能驱动鱼类发育节律的演化,进而影响胚胎发育进程及其关键器官的形成顺序。浅棕条鳅在器官形成 8 h 50 min 进入肌肉效应期,部分胚胎幼体出现间歇性抽动,为之后出膜做准备。间隔 13 h 10 min 进入血液循环期,再经 13 h 20 min 开始出膜。同其他条鳅亚科相似,浅棕条鳅器官形成至最后出膜都耗时较长,出膜时已完成部分器官和系统的构建以更好地适应自然环境^[29]。与表中的高原鳅属鱼类相比,浅棕条鳅出膜时器官分化程度相对较低,这一特征与泥鳅等春季繁殖类群趋同^[31]。

3.2 浅棕条鳅与其他条鳅亚科鱼类的仔鱼发育特征比较

浅棕条鳅胚胎在受精 49 h 20 min 后,胚体通过持续性卵膜碰撞完成出膜。初孵仔鱼通体半透明色,眼睛和体表均无色素沉积,与叶尔羌高原鳅特征类似^[20];安氏高原鳅和东方高原鳅眼色素沉积而体表基本透明^[19,22];贝氏高原鳅、西昌高原鳅、秀丽高原鳅以及长身高原鳅则呈现眼睛和身体同步着色特征^[18,21,23,25]。浅棕条鳅初孵仔鱼在出膜前 2 天启动快速色素沉积机制:出膜 1 d 已有显著眼色素沉积,出膜 2 d 头部和躯体也开始着色。虽然浅棕条鳅出膜时形态发育较为落后,但出膜后的发育速率在不同程度上高于其他高原鳅属鱼类,这种早期快速发育的机制有助于浅棕条鳅更好地适应复杂的自然环境。

卵黄囊初期仔鱼通常未开口,躯体携带明显卵黄囊结构组织,依赖内源性营养物质维系生命。特别是在外界饵料生物缺乏的情况下,为仔

鱼新陈代谢提供能量,提高仔鱼成活率^[29]。浅棕条鳅初孵仔鱼卵黄囊呈前端椭圆饱满后端紧贴鱼体腹部向后渐缩状态,与高原鳅属物种相似,显著区别于沙鳅属的中华沙鳅、宽体沙鳅等的棒球状卵黄囊结构^[22]。这表明浅棕条鳅及高原鳅属鱼类初孵时卵黄囊吸收率相对较低,这种卵黄囊形态差异反映了种间环境适应性的进化差异。随着仔鱼的发育,浅棕条鳅卵黄囊吸收产生形态变化,前端的椭圆状短径不断减小,整体形似棒球状,之后继续吸收整体呈现为细棒或细丝状并紧贴腹腔内壁;出膜第 5 天,卵黄囊消失。通常水温的升高会加快鱼体的新陈代谢^[20],对于卵黄囊仔鱼来说,则会加快对卵黄囊内部营养物质的吸收。与其他高原鳅鱼类相比,浅棕条鳅吸收卵黄囊的速度相对较快。作者认为,一方面是因为相较于高原鳅属鱼类,浅棕条鳅所处的雅下溪流环境水温相对较高且食物充足,加快了卵黄囊的吸收;另一方面浅棕条鳅自身卵黄囊体积较小,内源性物质有限,无法维持较久的内源性摄食。浅棕条鳅出膜后各体征的快速发育和外源性摄食的建立也佐证了这一点。随着卵黄囊的不断吸收,仔鱼会逐渐从内源性摄食最终转化为外源性摄食。浅棕条鳅在出膜 4~5 d 出现开口迹象,此时卵黄囊还未完全吸收但已进入混合摄食阶段,这与其他高原鳅属鱼类表现一致^[20]。

在器官发育时期,鱼类各器官组织诸如眼、耳、鳃、鳍条、心脏、消化道等进一步发育成型^[29]。卵黄吸收完毕后逐渐转向外源性营养阶段,浅棕条鳅在出膜 5 d 时形成膜质鳃,在出膜 10 d 时尾鳍逐渐细化出骨质鳍条并在体内形成骨质鳃,出膜 15 d 各鳍发育成型且鳍条明显,器官基本完善,仔鱼的游泳和摄食能力进一步增强。仔鱼后期各器官的形成与其他高原鳅属鱼类同样存在差异,包括形成的先后顺序以及器官形成的形状位置等,这主要受外在环境条件如水环境参数以及食物组成等组合调控^[37]。条鳅亚科鱼类腹腔内部会生成椭圆形泡状的膜质鳃后室以及哑铃状的骨质鳃前室,以适应底栖、急流特征水域环境,且成体骨质鳃钙化程度更高^[26]。该物种仔鱼时期即形成封闭

型骨质鳃结构,具有这种结构的种类多生活在流水以及急流的浅水水域,通过猛冲式的水平运动藏匿于石砾缝隙等隐蔽处,兼具躲避敌害与摄食的功能^[26]。

3.3 浅棕条鳅资源保护建议

本研究首次系统描述了浅棕条鳅胚胎及仔鱼发育时序,并与条鳅亚科等近缘鱼类进行对比分析。相关结果可为该物种的资源保护与规模化人工养殖提供理论依据。研究发现,浅棕条鳅胚胎发育阶段划分与其他鱼类基本一致,但在受精卵特征、器官发育进程、初孵仔鱼形态等具体发育特征上表现出差异。这些独特的发育特征可能反映其对雅鲁藏布江下游独特水体环境的适应性演化。雅鲁藏布江下游支流河段流速适中,底质多以砾石和粗沙为主,水体溶氧充足,透明度较高。浅棕条鳅产弱黏性沉性卵,可在一定程度上避免被水流持续冲刷,同时也易于在石隙间稳定发育。此外,初孵仔鱼表现出快速色素沉积的特点,眼部和背部色素较早出现且密度较高,这可能与雅鲁藏布江下游相对较高的水温环境促进色素细胞分化与代谢发育有关,该特性也有助于仔鱼在清澈水体中进行伪装,从而降低被捕食压力。

浅棕条鳅的野外分布范围十分狭窄,目前国内研究报道仅分布于西藏墨脱县背崩乡泸公河河口及以上的支流溪流中^[9,16,38],其栖息地多为山间溪流,依赖砾石、沙子底质进行生活和产卵(图 4)。其中地东村至西让村河段,尤其是干支流交汇口区域可能是当前资源相对丰富的关键区域^[9],亟需优先保护。2019 年设立的墨脱德尔贡河国家级水产种质资源保护区承担着该物种及其栖息地保护的重要任务。建议保护区在强化巡护监测、遏制非法捕捞的基础上,针对浅棕条鳅偏好石砾缝隙及深潭等特殊栖息环境的生态习性,结合墨脱地区复杂的水文条件,开展水体底质修复和河道结构优化为主的生态修复。在生境退化河段人工铺设适宜粒径的砾石基质并合理调控局部河道形态和深度,模拟自然产卵场结构。具体措施包括:将河道水深控制在 <1 m,铺设粒径 0.1~10 cm 的天然砾石,按上细下粗原则分层布置,同时控制



图 4 浅棕条鳅自然生境

Fig. 4 Natural ecological environment of *Schistura scaturigina*

流速低于 0.3 m/s, 以模拟其自然产卵场环境, 满足浅棕条鳅沉性弱黏性卵的发育需求, 从而实现针对性的生态修复目标。未来需要开展系统的资源调查, 明确浅棕条鳅的产卵场分布; 建立长期监测机制, 持续评估种群动态及栖息地状况, 为制定全流域保护策略提供科学依据。

参考文献:

- [1] Kottelat M. Conspectus cobitidum: An inventory of the loaches of the world (Teleostei: Cypriniformes: Cobitoidei)[J]. Raffles Bulletin of Zoology, 2012, Suppl. 26(6): 117.
- [2] Zhang C G, Zhao Y H. Species Diversity and Distribution of Inland Fishes in China[M]. Beijing: Science Press, 2016. [张春光, 赵亚辉. 中国内陆鱼类物种与分布[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [3] Chen X Y. Checklist of fishes of Yunnan[J]. Zoological Research, 2013, 34(4): 281-337. [陈小勇. 云南鱼类名录[J]. 动物学研究, 2013, 34(4): 281-337.]
- [4] Jiang Z G, Jiang J P, Wang Y Z, et al. Red list of China's vertebrates[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(5): 500-551. [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 中国脊椎动物红色名录[J]. 生物多样性, 2016, 24(5): 500-551.]
- [5] Zhang C, Wang W L, Zhou J S. Study on fish primary color atlas and mitochondrial genome in Yarlung Zangbo River Basin[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023. [张驰, 王万良, 周建设. 雅鲁藏布江流域鱼类原色图鉴及其线粒体基因组研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.]
- [6] Zuo S, Zhu F Y, Chen D Q, et al. Fish community structure and diversity in the Xizang section of Nujiang River[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(4): 73-81. [左硕, 朱峰跃, 陈大庆, 等. 怒江西藏段鱼类群落结构及多样性研究[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(4): 73-81.]
- [7] Zhu T B, Hu F F, Gong J L, et al. Community structure and species diversity of fishes in the Tibet reach of the Lancang River, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(2): 304-313. [朱挺兵, 胡飞飞, 龚进玲, 等. 澜沧江西藏段鱼类群落结构及多样性[J]. 中国水产科学, 2022, 29(2): 304-313.]
- [8] Liu M D, Zhu F Y, Zhu T B, et al. Status of aquatic organisms resources and their environments in Xizang (2017—2021)[J]. Journal of Fisheries of China, 2024: 1-23. [刘明典, 朱峰跃, 朱挺兵, 等. 西藏水生生物资源与环境本底状况调查(2017—2021)[J]. 水产学报, 2024: 1-23.]
- [9] He D K, Chen J N, Ding L Y, et al. The status and distribution pattern of fish diversity in the Yarlung Tsangpo River[J]. Biodiversity Science, 2024, 32(11): 224-239. [何德奎, 陈晋南, 丁刘勇, 等. 雅鲁藏布江鱼类多样性现状与分布格局[J]. 生物多样性, 2024, 32(11): 224-239.]
- [10] Kumar R. Habitat features of loach *Aborichthys kempfi* (Chaudhuri, 1913) from Rono Hills, Arunachal Pradesh, India[J]. Trend in Fisheries Research, 2018, 7(2): 46-52.
- [11] Ering O, Abujam S, Das D N. Food and Feeding Habits of *Aborichthys kempfi* (Chaudhuri, 1913) from Arunachal Pradesh, India[J]. International Journal of Ecology and Environmental Sciences, 2020, 46(1): 41-48.
- [12] Li H C, Gong J H. Study on species composition and fauna resources distribution characteristics of indigenous fish in Yarlung Zangbo River[J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2023, 45(3): 63-69. [李洪池, 龚君华. 雅鲁藏布

- 江土著鱼类种类组成及区系资源分布特征研究[J]. 西藏农业科技, 2023, 45(3): 63-69.]
- [13] Menon A. Check list: fresh water fishes of India[C]. Record of Zoological Survey of India, Miscellaneous Publication, Occasion Paper No. 175, 1999: 366.
- [14] Hussain M G. Freshwater fishes of Bangladesh: Fisheries, biodiversity and habitat[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2010, 13(1): 85-93.
- [15] Liang J. Fruitful Achievements in Fishery Aid to Tibet: Joint Efforts to Open a New Chapter[N]. China Fishery News, 2023-10-16. [梁璟. 渔业援藏结硕果 携手同心开新局[N]. 中国渔业报, 2023-10-16.]
- [16] Li L, Ma B, Jin X, et al. Structural and diversity characteristics of fish communities in the Motuo reach of the Yarlung Zangbo Grand Canyon[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(9): 1326-1336. [李雷, 马波, 金星, 等. 西藏雅鲁藏布江大峡谷墨脱江段鱼类群落结构及多样性的空间分布特征[J]. 中国水产科学, 2022, 29(9): 1326-1336.]
- [17] Hu G, Du X, Cheng L, et al. Current situation, major problems and countermeasures of fishery resources in Xizang autonomous region[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2019, 32(3): 58-64. [户国, 都雪, 程磊, 等. 西藏渔业资源现状、存在问题及保护对策[J]. 水产学杂志, 2019, 32(3): 58-64.]
- [18] Li Z L, Yan T M. Morphological development of *Triplophysa bleekeri* (Sauvage et Dabry de thiersant, 1874) embryo and larvae[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(4): 636-642. [李忠利, 严大明. 贝氏高原鳅胚胎和仔鱼的形态发育[J]. 水生生物学报, 2009, 33(4): 636-642.]
- [19] Wang H, Guo Y S, Zuo L, et al. Embryonic and larval development of *Triplophysa angeli*[J]. Fisheries Science, 2009, 28(12): 721-725. [王华, 郭延蜀, 左林, 等. 安氏高原鳅胚胎和仔鱼发育的观察[J]. 水产科学, 2009, 28(12): 721-725.]
- [20] Chen S A, Song Y, Niu Y J, et al. Embryonic and post-embryonic development of *Triplophysa (Hedinichthys) yarkandensis* (Day)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(4): 597-607. [陈生熬, 宋勇, 牛玉娟, 等. 叶尔羌高原鳅胚胎发育与胚后发育观察[J]. 中国水产科学, 2015, 22(4): 597-607.]
- [21] Wu X X, Li Y F, Wu S Y, et al. Embryonic development of *Triplophysa xichangensis*[J]. Freshwater Fisheries, 2016, 46(4): 44-48. [吴湘香, 李云峰, 吴世勇, 等. 安宁河西昌高原鳅胚胎发育初步研究[J]. 淡水渔业, 2016, 46(4): 44-48.]
- [22] Wang F, Yang R B, Fan Q X. Embryonic and post-embryonic development of *Triplophysa orientalis* (Herzenstein)[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(6): 89-98. [汪帆, 杨瑞斌, 樊启学. 东方高原鳅的胚胎与胚后发育观察[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(6): 89-98.]
- [23] Liu M C, Xu X, Nie Z L, et al. Embryonic development of *Triplophysa tenuis* from Kaidu River Basin[J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(2): 72-78. [刘茂春, 徐筱, 聂竹兰, 等. 开都河流域长身高原鳅胚胎发育观察[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(2): 72-78.]
- [24] Han H X, Lian J, Jin H Y, et al. Developmental characteristics of embryos and early larvae of *Carassius carassius* in the Irtysh River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2024, 31(6): 684-692. [韩豪祥, 廉杰, 金洪宇, 等. 额尔齐斯河黑鲫胚胎及早期仔鱼发育特征[J]. 中国水产科学, 2024, 31(6): 684-692.]
- [25] Liang X, Zhong W W, Leng Y, et al. Observation of embryonic development of *Triplophysa venusta*[J]. Fisheries Science, 2018, 37(1): 79-84. [梁祥, 钟文武, 冷云, 等. 秀丽高原鳅胚胎发育观察[J]. 水产科学, 2018, 37(1): 79-84.]
- [26] Chen J X, Zhu S Q. Phylogenetic relationships of the subfamilies in the loach family Cobitidae (Pisces)[J]. Acta Zootaxonomica Sinica, 1984, 9(2): 201-208. [陈景星, 朱松泉. 鳅科鱼类亚科的划分及其宗系发生的相互关系[J]. 动物分类学报, 1984, 9(2): 201-208.]
- [27] Kottelat M. *Botia kubotai*, a new species of loach (Teleostei: Cobitidae) from the Ataran River basin (Myanmar), with comments on botiine nomenclature and diagnosis of a new genus[J]. Zootaxa, 2004, 401(1): 1-18.
- [28] Luo X N, Duan Y J, Guo T, et al. Key artificial propagation technology and embryonic development of wild loach *Barbatula barbatula* Nuda[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(2): 187-194. [骆小年, 段友健, 郭童, 等. 北方须鳅人工繁殖与胚胎发育研究[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(2): 187-194.]
- [29] Xu B, Zhu X Y, Wei K J, et al. Morphological development of embryos and larvae of *Schizothorax waltoni* Regan[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(5): 663-670. [徐滨, 朱祥云, 魏开金, 等. 拉萨裂腹鱼的胚胎及仔稚鱼发育特征[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(5): 663-670.]

- [30] Yin M C. Fish Ecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995. [殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.]
- [31] Zheng W B. Observations on the embryonic and larval development of *Misgurnus anguillicaudatus* (Cantor)[J]. Journal of Fisheries of China, 1985, 9(1): 37-47. [郑文彪. 泥鳅胚胎和幼鱼发育的研究[J]. 水产学报, 1985, 9(1): 37-47.]
- [32] Li C, Jiang Z Q, Liu Q K, et al. Embryonic development and temperature effects in fighting fish *Betta splendens*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2011, 26(5): 402-406. [李岑, 姜志强, 刘庆坤, 等. 泰国斗鱼的胚胎发育及温度对胚胎发育的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(5): 402-406.]
- [33] da Silva Rodrigues M, Toledo V P B, Nóbrega R H, et al. Effects of maternal stress on the development of the somatotropic axis during the larval and juvenile stages in zebrafish (*Danio rerio*)[J]. Fishes, 2025, 10(2): 37.
- [34] Zhang X B, Wang J F, Li G, et al. From spawn to survival: Decoding the hydraulic conditions for successful silver carp egg incubation[J]. PLoS One, 2025, 20(4): e0320798.
- [35] Velmurugan A, Chidambaram P, Velmurugan P, et al. Influence of water pH and temperature on breeding and embryo development of Indian spiny loach (*Lepidocephalichthys thermalis*)[J]. Animal Reproduction Science, 2025, 278: 107859.
- [36] Zhang H Y. Embryonic development of *Paramisgurnus dabryanus*[J]. Freshwater Fisheries, 2001, 31(5): 20-21. [张恒远. 大鳞副泥鳅胚胎发育观察[J]. 淡水渔业, 2001, 31(5): 20-21.]
- [37] Tan G. Taxonomic revision of *Triplophysa xichangensis*, *T. daqiaensis*, *T. xiqiensis*, *T. yaopeizhii* and *T. aquaeaeeruleae*, with a description of a new species of the genus *Triplophysa*[D]. Nanchong: China West Normal University, 2017. [谭刚. 西昌高原鳅、大桥高原鳅、西溪高原鳅、姚氏高原鳅和巴塘高原鳅的分类厘定及高原鳅属鱼类一新种的描述[D]. 南充: 西华师范大学, 2017.]
- [38] Li Z F, Jiang X M, Wang J, et al. Species diversity and driving factors of benthic macroinvertebrate assemblages in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River[J]. Biodiversity Science, 2022, 30(6): 123-135. [李正飞, 蒋小明, 王军, 等. 雅鲁藏布江中下游底栖动物物种多样性及其影响因素[J]. 生物多样性, 2022, 30(6): 123-135.]

Developmental characteristics of embryos and early larvae of *Schistura scaturigina*

YANG Peican^{1,2}, ZHANG Zhiming³, SU Qi², HE Kai², ZHANG Chi^{2*}, SUI Liying^{1*}

1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;
2. Institute of Aquatic Sciences, Xizang Autonomous Region Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China;
3. Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China

Abstract: *Schistura scaturigina*, endemic to the lower reaches of the Yarlung Zangbo River, holds considerable ecological and economic value. In this study, we presented the first systematic report on its embryonic and early larval development under artificial breeding conditions to clarify its developmental chronology and characteristics. These findings fill a critical research gap and provide important implications for the conservation and sustainable utilization of this species. We conducted experiments in April 2024. Hormonal induction was performed using a mixture of luteinizing hormone-releasing hormone analog (LHRH-A₂), human chorionic gonadotropin (HCG), and domperidone (DOM). Females received a two-injection protocol: the first injection consisted of LHRH-A₂ (3 µg/kg)+DOM (2 mg/kg), followed 12 h later by a second injection of LHRH-A₂ (10 µg/kg)+DOM (8 mg/kg)+HCG (2000 IU/kg). Males received a single injection at the time of the female's second injection, at half the female dosage. Approximately 2,000 fertilized eggs were obtained via artificial dry fertilization, yielding average fertilization and hatching rates of 95.60% and 90.40%, respectively. Over 1,700 healthy larvae were ultimately obtained. The results showed that mature eggs were spherical, light yellow, and lustrous, with slight adhesiveness and a tendency to sink upon contact with water. Egg diameter measured 1.08±0.03 mm, expanding to (2.34±0.08) mm after water absorption. At a water temperature of (20.0±1.0) °C, fertilized eggs completed intra-membrane hatching in 49 h 20 min, requiring an accumulated temperature of 986.65 h·°C. Embryonic development was divided into 33 phases across seven stages: fertilized egg, cleavage, blastula, gastrula, neurula, organogenesis, and hatching. Newly hatched larvae measured (4.18±0.30) mm in total length, exhibiting transparent bodies and no pigmentation on the eyes or skin. Distinct pigmentation appeared across the body at 2 days post-hatching. The yolk sac was nearly absorbed at 5 days post-hatching, coinciding with the development of an oval, vacuole-like, and membranous swim bladder. At 10 days post-hatching, a pair of small spherical bony swim bladders had formed, exhibiting a dumbbell-like shape. Functional organs were essentially fully developed at 15 days post-hatching. Overall growth and development of early larvae demonstrated an increasing trend, albeit with stage-specific variations in developmental rate. Our findings reveal that while embryonic developmental chronology of *S. scaturigina* aligns with that of phylogenetically close species, specific traits observed in its organogenesis progression and newly hatched larval morphology may reflect adaptations to the unique torrential environment of the lower Yarlung Zangbo River. Given its current restricted distribution, enhanced management within protected areas is recommended. Future efforts should prioritize systematic resource surveys and long-term monitoring to provide a scientific foundation for basin-wide conservation strategies.

Key words: *Schistura scaturigina*; artificial breeding; embryonic development; fish larvae

***Corresponding author:** ZHANG Chi, E-mail: zc0891@163.com; SUI Liying, E-mail: suily@tust.edu.cn