

## 尖翅燕鱼仔稚鱼脊柱及附肢骨骼系统的发育观察

郭华阳<sup>1,2,3</sup>, 刘明鉴<sup>2,3,4</sup>, 高杰<sup>2,3</sup>, 朱克诚<sup>1,2,3</sup>, 刘宝锁<sup>1,2,3</sup>, 郭梁<sup>1,2,3</sup>, 张楠<sup>1,2,3</sup>,  
孙金辉<sup>2,4</sup>, 曾辰<sup>2,4</sup>, 杨静文<sup>2,3</sup>, 刘波<sup>2,3</sup>, 张殿昌<sup>1,2,3,4</sup>

1. 三亚热带水产研究院, 海南 三亚 572019
2. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300
3. 广东省海洋生物种业工程技术研究中心, 广东 广州 510300
4. 天津农学院 水产学院, 天津 300384

**摘要:** 掌握尖翅燕鱼 (*Platax teira*) 仔稚鱼脊柱及附肢骨骼系统的发育时序特征, 可为其苗种繁育、环境适应及分类鉴定提供理论依据。采用软骨-硬骨双染色法对尖翅燕鱼仔稚鱼 [0~30日龄 (dah)] 脊柱、胸鳍、腹鳍、背鳍、臀鳍以及尾鳍进行染色观察与分析。结果表明, 尖翅燕鱼有24枚脊椎骨, 尾部骨骼由5枚尾下骨和2枚尾上骨构成, 附肢支鳍骨的发育顺序为胸鳍、腹鳍、尾鳍、臀鳍和背鳍。尖翅燕鱼在初孵仔鱼已具备胸鳍支鳍骨原基和脊索, 4 dah仔鱼胸鳍和腹鳍最先发育; 7 dah仔鱼髓弓、脉弓开始出现; 13 dah仔鱼骨骼形态和数量基本稳定; 26 dah左右稚鱼开始骨化, 脊柱和脊椎最先完成骨化; 30 dah进入幼鱼阶段, 其外表形态已经固定, 与成鱼无异, 典型特征为头部、躯干部和尾部各有3条黑色条带, 身体呈雪白银色, 受到外界刺激时体色瞬间变为黑色。尖翅燕鱼脊柱及附肢骨的发育顺序与其他海水鱼基本一致, 但骨骼发育时间节点和数量有所不同。

**关键词:** 尖翅燕鱼; 骨骼染色; 仔稚鱼发育; 脊柱; 附肢骨骼

中图分类号: S 962

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Development of vertebral column and appendicular skeleton in larvae and juveniles of *Platax teira*

GUO Huayang<sup>1,2,3</sup>, LIU Mingjian<sup>2,3,4</sup>, GAO Jie<sup>2,3</sup>, ZHU Kecheng<sup>1,2,3</sup>, LIU Baosuo<sup>1,2,3</sup>, GUO Liang<sup>1,2,3</sup>,  
ZHANG Nan<sup>1,2,3</sup>, SUN Jinhui<sup>2,4</sup>, ZENG Chen<sup>2,4</sup>, YANG Jingwen<sup>2,3</sup>, LIU Bo<sup>2,3</sup>, ZHANG Dianchang<sup>1,2,3,4</sup>

1. Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572019, China
2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China
3. Guangdong Provincial Engineer Technology Research Center of Marine Biological Seed Industry, Guangzhou 510300, China
4. College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China

**Abstract:** Understanding the developmental time sequence characteristics of the spine and appendage skeletal system of *Platax teira* can provide a theoretical basis for its seedling breeding, environmental adaptation and classification. We stained and analyzed the spine, pectoral fin, pelvic fin, anal fin and caudal fin of *P. teira* larvae (0–30 dah) by the method of cartilagi-

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0901204); 国家海洋水产种质资源库—南海种质资源分库国家海洋水产种质资源库项目; 中国-东盟海洋生物活体种质资源库的构建和开发利用“中国-东盟海上合作基金”专项; 广东省省级科技计划项目“南海海洋生物种质资源库建设与共享服务” (2019B030316030)

作者简介: 郭华阳 (1987—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为水产遗传育种。E-mail: guohuayang198768@163.com

通信作者: 张殿昌 (1977—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为水产种质资源与遗传育种。E-mail: zhangdch@scafsri.ac.cn

nous and bony staining. The results show that there were 24 vertebrae, and the tail bone was composed of five subcaudal bones and two upper caudal bones. The development sequence of appendage branch fin bones was pectoral fin, abdominal fin, caudal fin, anal fin and dorsal fin. The first hatched fish already had pectoral branch fin bone primordium and notochord. At 4 dah, the pectoral fin and pelvic fin developed first; at 7 dah, medullary arch and vein arch appeared; at 13 dah, the morphology and number of larval bones were basically stable; at about 26 dah, ossification began in juvenile fish, and the spine and spine were the first to complete ossification; at 30 dah, the larvae entered the juvenile stage, and their appearance has been fixed. The typical characteristics were three black bands on the head, trunk and tail, and the body was white silver. When being stimulated or stressed by external stimulation, the body color changed to black instantly, and the shape had no difference from that of the juvenile. The developmental sequence of the spine and appendage bones was basically the same with that of other sea fish, but the time nodes and number of the development of bone were different.

**Keywords:** *Platax teira*; Bone staining; Larval and juvenile development; Spine; Appendicular skeleton

骨骼的形态和结构特征是研究鱼类进化和分类的重要依据,其构造和功能可为鱼类环境学研究提供理论基础。在鱼类胚后发育过程中,其行为、形态及代谢等均不断发生变化,其中以骨骼发育最为复杂。骨骼系统作为鱼类支撑身体、协调运动和保护内脏的重要组织,其形态、构造及发育时序在长期进化过程中均发生着改变<sup>[1]</sup>。特别是在鱼类早期发育阶段,骨骼发育与其摄食习性、游泳模式、外部形态及生长发育紧密相关,甚至骨骼是否正常发育直接影响鱼类苗种的成活率及畸形率。目前,国内外相关学者已对大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)<sup>[2]</sup>、金钱鱼(*Scatophagus argus*)<sup>[3]</sup>、卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)<sup>[4]</sup>和鞍带石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus*)<sup>[5]</sup>等多种海水鱼类的骨骼发育开展了系统研究,表明鱼类因种属差异,其骨骼发育方面存在显著差异。

尖翅燕鱼(*Platax teira*)又称长鳍蝙蝠鱼,属鲈形目、刺尾鱼亚目、白鲳科,原产于印度-太平洋,广泛分布于亚热带和热带沿海地区;其性情温顺,游动缓慢,属于杂食性鱼类,主要食物来源为藻类和小型底栖无脊椎动物<sup>[6]</sup>。幼鱼体色黑白相间,背鳍、臀鳍和腹鳍较长,形态优美,有较高的观赏价值;而成鱼肌肉蛋白含量高、肉质鲜美、生长较快,具有较高的经济价值<sup>[7]</sup>。随着人工繁育技术的发展,尖翅燕鱼在中国和东南亚等国成功实现人工养殖,成为深海网箱养殖最具发展潜力的鱼类之一。目前关于尖翅燕鱼的研究相对较少,仅见于消化器官发育<sup>[8]</sup>、肌肉成分<sup>[9]</sup>和幼鱼异速生长<sup>[7]</sup>等方面,而对其发育生物学相关研究尚未深入。本研究采用阿利新蓝-茜素红染色法对尖翅燕鱼仔稚鱼的骨骼进行染色,研究了不同发育阶段鱼体的脊柱及附肢骨骼的系统发生,旨在为硬骨鱼类进化与

分类等相关研究提供理论资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 亲鱼培育

实验亲鱼选自海南省陵水培育的 3 龄以上健康无伤、体表完整、活力好的尖翅燕鱼亲鱼。亲鱼经 45 d 营养强化后,挑选性腺发育成熟的雌鱼和雄鱼各 10 尾,利用丁香酚(30~50 mg·L<sup>-1</sup>)麻醉后,注射催产针进行人工催产。收集受精卵放入 500 L 锥形底孵化桶,充分曝气,筛选出漂浮的优质受精卵,放入 4 m×4 m 孵化袋中孵化。仔鱼孵化出膜后,解开孵化袋转入室外高位池培育。苗种培育条件:温度(28±2)℃、溶解氧质量浓度>6.5 mg·L<sup>-1</sup>、盐度和 pH 分别为 34‰~36‰和 7.8±0.5。饵料投喂策略见图 1。

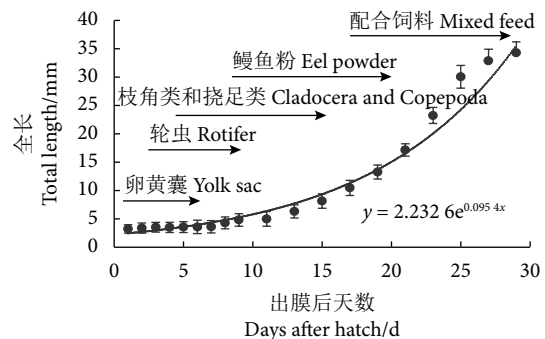


图1 尖翅燕鱼培养过程中的饲养方案和日龄与全长回归方程

Fig. 1 Feeding scheme and regression equation of age and full length during *P. teira* culture

### 1.2 样品的采集和处理

每天早上在投喂前从高位池随机取仔稚鱼 50 尾,观察并记录仔稚鱼形态变化和器官发育情况;同时利用丁香酚对仔稚鱼进行麻醉处理,待鱼

体完全麻醉后(仔稚鱼完全沉入烧杯底部)转入取样瓶, 并加入体积分数为 10% 的中性甲醛溶液 4 ℃ 保存备用。样品采集持续至 30 日龄(dah)。

### 1.3 骨骼染色方法

骨骼染色采用阿尔新蓝-茜素红染色法, 在郑

攀龙<sup>[10]</sup>的实验基础上稍做改进, 具体染色过程及方法见表 1。骨骼染色后的仔稚幼鱼样品根据鱼体大小选用光学显微镜(Nikon Eclipse E100)和体视显微镜(Olympus SZ40)进行拍照观察。

表1 阿尔新蓝-茜素红S染色法  
Table 1 Alcian blue and alizarin red S staining technique

染色步骤 Staining step	实验过程 Experimental process
样本处理 Sample treatment	将仔稚鱼麻醉, 测量体长和全长, 注意不要采集外形畸形的样品, 用10%的甲醛溶液浸泡样本, 4 ℃条件下浸泡超过24 h, 完成样品的固定。
脱水 Dehydration	取出固定样品后, 用纱布包裹样品, 蒸馏水浸泡至少24 h(中间多换几次蒸馏水), 或用自来水流水冲洗过夜, 以清除固定剂。再用不同浓度的乙醇梯度脱水, 乙醇溶液浓度依次为: 50%、75%、90%和100%, 脱水时间均为6 h。
软骨染色 Cartilage staining	从脱水中取出的样品, 直接浸入软骨染色液(将无水乙醇和冰醋酸1:1混合, 加入0.3 g阿利新蓝粉末, 配置成1 000 mL溶液)中, 染色24 h, 期间可以更换染液。
漂洗 Rinsing	在光线较强的环境下进行操作, 观察到样品染色好后, 从软骨染色液中取出样品放入漂洗液[将30%的过氧化氢(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )和蒸馏水按照1:5混合配制成1 000 mL溶液, 并加入8 g氢氧化钾(KOH)]中, 不间断用玻璃棒搅拌, 直到样品表面颜色变淡。
中和 Neutralize	将漂洗好的样品放入染色中和液[蒸馏水中加入过量硼砂(Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ), 得饱和硼砂溶液即可]中进行中和, 时间为20~24 h。
硬骨染色 Bone staining	将样品放入硬骨染色液(1 000 mL蒸馏水中加入8 g 氢氧化钾(KOH)完全溶解后, 再加入0.3~0.5 g茜素红粉末)中, 每隔12 h取出样品观察染色情况, 直至染色完成。
酶解 Zymolysis	将样本浸泡在酶溶液(将1.25 g重金属螯合剂EDTA-Na <sub>2</sub> 和4.5 g胰蛋白酶溶解于1 000 mL饱和硼砂溶液)中, 根据酶解程度调整消化时间, 直至稍见骨骼即可, 中间最好更换酶解液。
保存 Preservation	用蒸馏水清洗样本, 然后依次移入体积比为3:1、1:1、1:3的1% KOH-甘油合剂中, 最后保存于纯甘油中, 并加入3~4粒麝香草酚保存。

### 1.4 数据处理与分析

采用 Photoshop 2020 软件对尖翅燕鱼仔稚鱼发育照片进行处理, 使用 Image View 软件对其形态学指标进行测量; 利用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析, 以“平均值±标准差( $\bar{X} \pm SD$ )”表示; 利用 Excel 2020 软件对测量数据进行分析, 推算出尖翅燕鱼仔稚鱼全长与日龄的关系回归方程(图 1):  $y = 2.232 6e^{0.095 4x}$ ,  $R^2 = 0.968 7$ , 式中  $x$  为生长天数(d),  $y$  为全长(mm)。

## 2 结果

### 2.1 尖翅燕鱼生长阶段划分

尖翅燕鱼受精卵 [(1.29±0.09) mm] 在温度为 (26±0.3) ℃、盐度和 pH 分别为 34‰~36‰和 7.8±0.5 的条件下孵化, 历时 27 h 45 min 后仔鱼孵化出膜。根据其胚后发育卵黄囊、体色、鳍条、骨骼发育以及其他形态结构的变化, 划分为仔鱼期(0~17 dah)、稚鱼期(18~29 dah)和幼鱼期3个时期。仔鱼期和稚鱼期的划分以各鳍条是否形成为依据。尖翅燕鱼 30 dah 后进入幼鱼期, 其鳍棘和鳍条发育

完成, 骨骼数目稳定, 形态与成鱼无异, 典型特征为头部、躯干部和尾部各有 3 条黑色条带, 受到外界刺激时体色瞬间变为黑色(图 2)。

### 2.2 脊柱骨骼的发育

2 dah 仔鱼的脊柱骨骼处于未分化状态, 仅有 1 条呈管状的脊索(Nc), 此时身体呈现细长状态(图 3-a)。该阶段, 仔鱼仅依靠脊索来支撑身体结构。随着仔鱼的生长, 脊索开始发生自然弯曲, 头部与躯干部呈一定角度的弯曲。孵化后 7 dah 左右(图 3-b), 髓弓(Na)、脉弓(Ha)开始出现于表面, 临近头部的髓弓和靠近泄殖腔的脉弓优先发育, 此时尾下骨的出现也标志着脊柱发育的开始。髓弓最初以突起的形式出现, 随着仔鱼的生长, 突起逐渐愈合, 最后形成椎体背侧方的弓状结构。仔鱼 10 dah(图 3-c)时尾杆骨已形成, 位于尾部脊索上的脉弓、髓弓开始以软骨组织出现, 且髓弓比脉弓出现的时间点早一些。随着鱼类的生长, 脉弓和髓弓也随之延伸, 仔鱼发育至 15 dah 时尾杆骨末端开始上翘, 此时髓棘(Ns)、背肋(Dr)、腹肋(Pr)也开始以软骨组织的形式出现(图 3-d)。稚鱼在 23

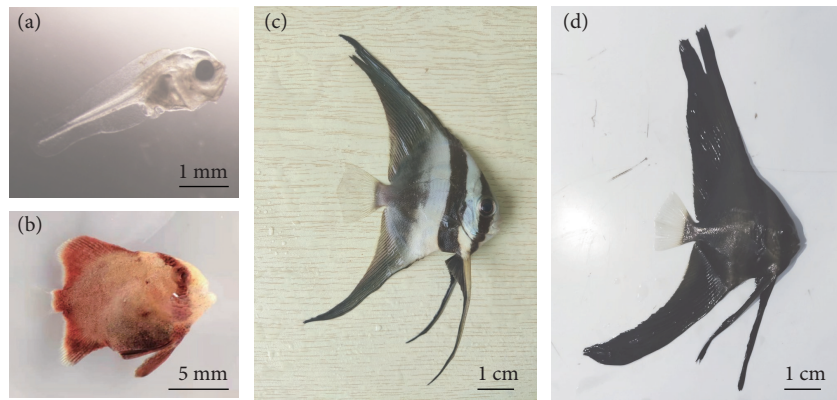
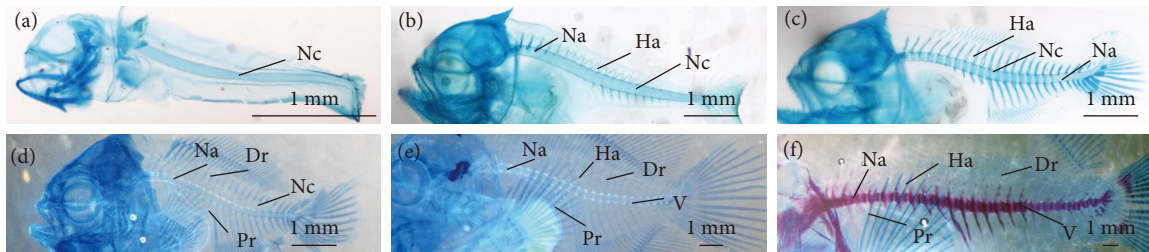


图2 尖翅燕鱼不同阶段发育的过程

注: a. 5日龄仔鱼; b. 21日龄稚鱼; c. 30日龄幼鱼; d. 30日龄幼鱼-应激后。

Fig. 2 Different developmental stages of *P. teira*

Note: a. 5 dah larva; b. 21 dah larva; c. 30 dah larva; d. 30 dah larva-after stress.



Nc. 脊索; Ha. 脉弓; Na. 髓弓; Dr. 背肋; Pr. 腹肋; V. 脊柱。

Nc. Notochord; Ha. Haemal arch; Na. Neural arch; Dr. Dorsal rib; Pr. Pleural rib; V. Vertebra.

图3 尖翅燕鱼部分脊柱发育的过程

注: a. 2日龄仔鱼; b. 7日龄仔鱼; c. 10日龄仔鱼; d. 15日龄仔鱼; e. 23日龄仔鱼; f. 30日龄稚鱼。

Fig. 3 Development of partial vertebral column in *P. teira*

Note: a. 2 dah larvae; b. 7 dah larvae; c. 10 dah larvae; d. 15 dah larvae; e. 23 dah larvae; f. 30 dah juvenile.

dah 左右时, 脊柱前后端开始出现硬骨环, 此阶段的稚鱼开始骨化, 且髓棘、背肋、腹肋、髓弓、脉弓都以基部向末梢方向开始硬骨化 (图 3-e)。30 dah 尖翅燕鱼进入幼鱼期, 胸鳍、背鳍、腹鳍、臀鳍及各附肢鳍条发育完整, 骨骼的发育过程基本完成 (图 3-f)。此阶段的幼鱼外表形态与成鱼无异。

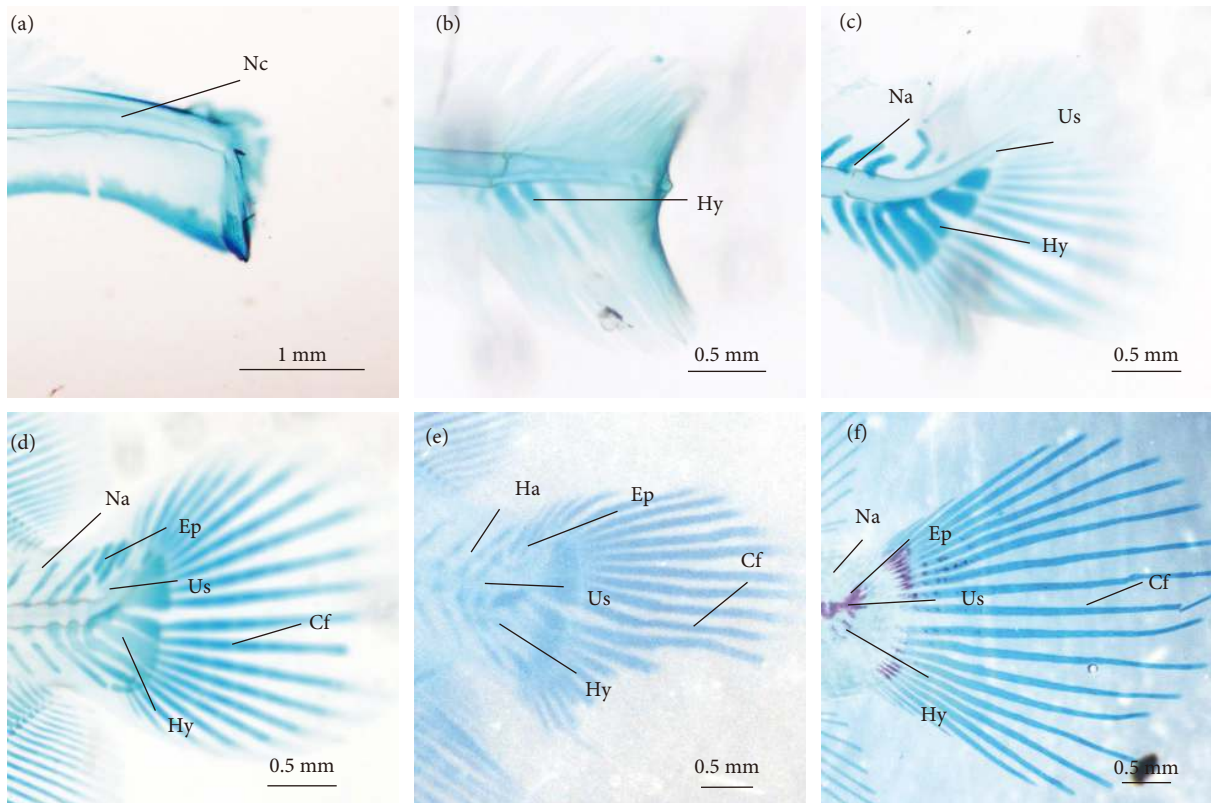
### 2.3 尾部骨骼的发育

尖翅燕鱼初孵仔鱼 (图 4-a) 到 6 dah 仔鱼尾部骨骼均未开始发育, 此期间尾板未出现且尾杆骨 (Us) 也未上翘。7 dah 仔鱼尾杆骨逐渐上翘且第一批尾下骨 (Hy1) 开始出现 (图 4-b)。9 dah 仔鱼的第二批尾下骨 (Hy2) 开始出现, 同时尾下骨也开始分化 (图 4-c)。13 dah 仔鱼尾杆骨上翘明显, 出现未骨化的脊髓; 尾下骨 (Hy) 数量开始增多, 尾下骨及尾旁骨也明显增大且边界逐渐模糊, 尾下骨之间呈现愈合趋势; 尾部骨骼被尾索分成上下两部分, 由 2 枚尾上骨 (Ep)、5 枚尾下骨和 1 枚尾杆骨组成; 尾索上部的鳍皱演变成鳍条软骨, 尾鳍 (Cf)

鳍条数量逐渐增加至 18 条; 尾部脊索的矿化还未开始 (图 4-d)。尖翅燕鱼发育到 18 dah 时, 尾部继续增大, 出现原始的叉尾, 尾杆骨继续上翘; 鳍条数量由 18 增加至 22 条, 鳍条附着于尾旁骨、尾上骨和尾下骨的末端 (图 4-e)。25 dah 稚鱼尾部骨骼发育基本完全, 且尾鳍鳍条数量基本稳定在 22 条。此阶段稚鱼的尾骨骨骼除未骨化外, 与成鱼基本无异 (图 4-f)。

### 2.4 背鳍和臀鳍的发育

尖翅燕鱼发育至 8 dah 时 (图 5-c), 背鳍出现 14 枚近端桡骨 (Rx), 这标志着背鳍开始发育。仔鱼发育至 9 dah 时 (图 5-d), 远端桡骨 (Rd) 清晰可见, 此时近端桡骨达到 29 枚并且往背下增长, 远端桡骨往上伸长。13 dah 时 (图 5-e), 背鳍的担鳍骨 (Pte) 开始出现, 远端桡骨达到 36 枚, 已初步形成背部鳍条 (Dfr), 鳍棘数目基本稳定。发育到 26 dah 时 (图 5-f), 背鳍呈扇形继续伸长, 此时近端桡骨从基部向末梢骨化, 远端桡骨仍为软骨。



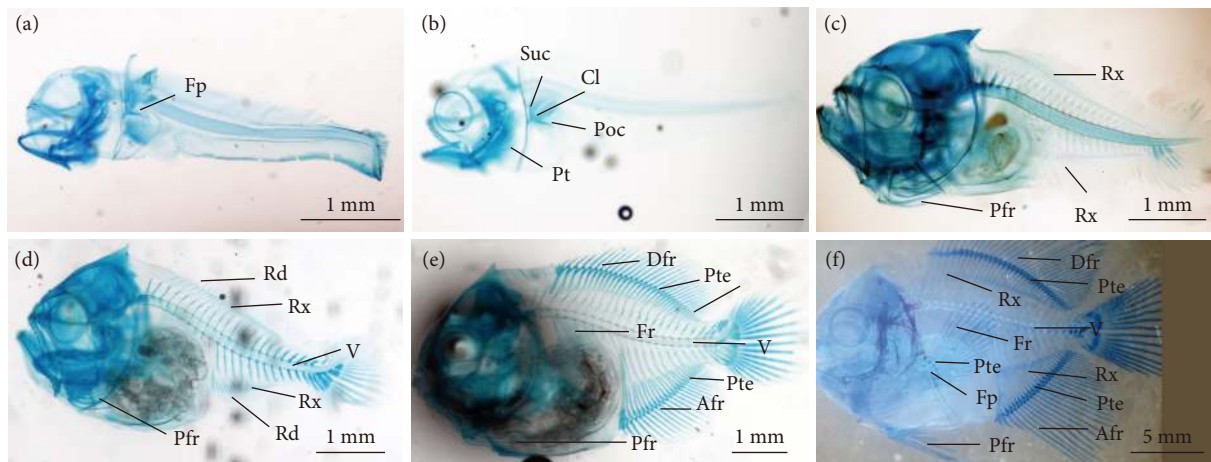
Nc. 脊索; Hy. 尾下骨; Na. 髓弓; Us. 尾杆骨; Ep. 尾上骨; Cf. 尾鳍。  
 Nc. Notochord; Na. Neural arch; Hy. Hypural; Us. Urostyle; Ep. Epural; Cf. Caudal fin.

图4 尖翅燕鱼尾鳍的发育过程

注: a. 2 日龄仔鱼; b. 7 日龄仔鱼; c. 9 日龄仔鱼; d. 13 日龄仔鱼; e. 18 日龄仔鱼; f. 25 日龄稚鱼。

Fig. 4 Development of caudal fin in *P. teira*

Note: a. 2 dah larva; b. 7 dah larva; c. 9 dah larva; d. 13 dah larva; e. 18 dah larva; f. 25 dah juvenile.



Fp. 胸鳍支鳍骨原基; Suc. 上匙骨; Poc. 后匙骨; Cl. 匙骨; Pt. 腹鳍支鳍骨原基; Pfr. 腹鳍条; Rx. 近端桡骨; Rd. 远端桡骨;  
 Pte. 担鳍骨; Afr. 臀鳍条; Dfr. 背鳍条; Fr. 胸鳍条; V. 脊柱。  
 Fp. Fin plate; Suc. Supracleithrum; Poc. Postcleithrum; Cl. Cleithrum; Pt. Pterygiophores; Pfr. Pelvic fin ray; Rx. Proximal radius;  
 Rd. Distal radial; Pte. Urostyle; Afr. Anal fin ray; Dfr. Dorsal fin ray; Fr. Fin ray; V. Vertebra.

图5 尖翅燕鱼背鳍、臀鳍、胸鳍和腹鳍的发育过程

注: a. 2 日龄仔鱼; b. 4 日龄仔鱼; c. 8 日龄仔鱼; d. 9 日龄仔鱼; e. 13 日龄仔鱼; f. 26 日龄稚鱼。

Fig. 5 Development of the dorsal, anal, pectoral and pelvic fins of *P. teira*

Note: a. 2 dah larva; b. 4 dah larva; c. 8 dah larva; d. 9 dah larva; e. 13 dah larva; f. 26 dah juvenile.

尖翅燕鱼在 8 dah 时 (图 5-c), 靠近泄殖孔处出现 10 枚近端桡骨, 这标志着臀鳍开始发育。仔鱼到 9 dah 时 (图 5-d), 近端桡骨达到 21 枚, 从泄殖孔向尾部伸长, 此时远端桡骨开始出现, 数量为 16 枚左右。同样在 13 dah 时 (图 5-e), 仔鱼臀部出现担鳍骨, 臀鳍近端桡骨维持在 26 枚左右, 远端桡骨往外伸展形成臀鳍 (Afr)。发育到 26 dah 时 (图 5-f), 臀鳍近端桡骨从基部向末梢骨化, 此阶段臀鳍远端桡骨仍为软骨。

## 2.5 胸鳍和腹鳍的发育

胸鳍为尖翅燕鱼最早发育的附肢骨骼, 初孵仔鱼可观察到胸鳍支鳍骨原基 (Fp), 主要为乌喙骨-肩胛软骨 (图 5-a)。仔鱼在 4 dah 时, 可清晰看到上匙骨 (Suc)、后匙骨 (Poc) 以及匙骨 (Cl), 支鳍骨原基中间出现一条明显的裂缝 (图 5-b)。随着匙骨和支鳍骨原基继续发育, 直至 13 dah 支鳍骨原基出现数条裂缝, 成为最初的胸鳍 (Fr) (图 5-e)。稚鱼发育至 26 dah 时, 其胸鳍骨骼呈扇形, 鳍条形态和数量与幼鱼相比基本没有差异 (图 5-f), 胸鳍发育直至实验结束尚未完全骨化。

尖翅燕鱼腹鳍支鳍骨原基 (Pt) 在 4 dah 时开始出现 (图 5-b)。8 dah 仔鱼的腹鳍支鳍骨已经开始着生腹鳍条 (Pfr), 此时鳍条数目为 4 枚, 并随着仔鱼的生长鳍条逐渐增长 (图 5-c)。发育至 26 dah 时, 腹鳍变得细长, 形态与幼鱼相比无异, 但仍未完成骨化 (图 5-f)。

## 3 讨论

鱼类的骨骼根据生长部位可划分为两大类: 附肢骨骼和主轴骨骼, 其中附肢骨骼根据奇偶鳍数分为奇鳍骨骼和偶鳍骨骼, 主轴骨骼分为脊柱和头骨<sup>[2]</sup>。鱼类早期骨骼发育会经历一系列的变化, 不同类型的骨骼发育时序也存在显著差异。不同种属间的鱼类骨骼发育差异明显, 大泷六线鱼从 27 dah 起脊柱骨骼开始骨化, 50 dah 时骨化完成<sup>[11]</sup>。卵形鲳鲹脊柱骨骼从 9 dah 时开始矿化, 直至 18 dah 时矿化完成<sup>[12]</sup>。本研究中尖翅燕鱼在 23 dah 时开始骨化, 直至发育至幼鱼骨骼矿化还未完成。不同种属鱼类脊椎骨骼的椎骨数量也不大相同, 王永梅等<sup>[13]</sup>对 157 种鲤形目鱼类的脊椎骨研究发现, 鲤形目鱼类总脊椎骨数为 30~52。本研究中尖翅燕鱼的脊椎骨数量与王秋荣等<sup>[14]</sup>报道的青石斑鱼 (*E.*

*awoara*) 相一致, 均为 24 枚。此外, 同科不同属鱼类的脊椎骨骼也存在明显差异, 李仲辉和杨太有<sup>[15]</sup>发现尖吻鲈 (*Lates calcarifer*) 和大口黑鲈 (*Micropodus salmoides*) 脊椎骨数目存在较大差异, 导致两者的生物学特征有很大区别, 这说明鱼类早期的脊椎骨数目与其生物学特性相关。

研究表明, 大多数鱼类的尾部骨骼结构和数量基本相同, 极少数鱼类的尾部骨骼存在差异<sup>[16]</sup>。大多数海水鱼类尾部骨骼由 5 枚尾下骨和 2 枚或以上的尾上骨构成<sup>[17-18]</sup>。如卵形鲳鲹<sup>[10]</sup>和大泷六线鱼<sup>[19]</sup>尾部骨骼均有 5 枚尾下骨, 金钱鱼<sup>[5]</sup>尾部骨骼由 3 枚尾上骨和 6 枚尾下骨构成, 而塞内加尔鲷 (*Solea senegalensis*)<sup>[20]</sup>尾部骨骼仅有 1 枚尾上骨, 且缺少尾神经骨。尖翅燕鱼和大部分海水鱼类一样, 尾部骨骼由 5 枚尾下骨和 2 枚尾上骨构成。

不同种类鱼的骨骼发育时序有所不同<sup>[21]</sup>。尖翅燕鱼与褐点石斑鱼 (*E. fuscoguttatus*)<sup>[22]</sup>、尖吻鲈<sup>[23]</sup>和黄姑鱼 (*Nibea albiflora*)<sup>[24]</sup>等其他海水鱼相比, 脊柱和胸鳍在出膜前已开始发育, 这与其受精卵卵径和油球较大、孵化时间较长有关。鱼类受精卵储存的营养物质和孵化时间为胚内骨骼发育提供物质基础。鱼类早期骨骼发育时序性也与生活习性和环境相关。例如, 鲹科鱼类游速较快、爆发性游泳能力强, 其脊柱和尾部骨骼发育相对较早, 能较快地适应环境<sup>[25]</sup>。大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 在孵化后 12~13 dah 脊柱和尾部骨骼开始发育, 此时底栖生活习性形成<sup>[26]</sup>。邓平等<sup>[27]</sup>在对褐菖鲈 (*Sebastes marmoratus*) 的研究中也得到相似的结果。

尖翅燕鱼初孵仔鱼已具备间歇性游泳能力, 孵化后卵黄囊勉强能支撑仔鱼存活 5~6 d, 所以在内源性营养消耗完之前, 必须具备游泳和捕食能力。胸鳍和尾鳍作为游泳器官, 可为鱼类摄食提供动力, 一般优先发育。刀鲚 (*Coilia ectenes*) 在油球完全消耗完之前具备自主摄食能力, 其胸鳍早在卵黄囊阶段便开始发育<sup>[28]</sup>。青鳞 (*Oryzias latipes*) 的胸鳍发育也发生在孵化成仔鱼之前<sup>[29]</sup>。尖翅燕鱼初孵仔鱼直接存在支鳍骨原基, 在 4 dah 时已具备在静水中平衡和左右摆动的能力; 7 dah 仔鱼尾部开始发育, 游泳能力明显增强, 摄食饵料和逃避天敌的能力也有所提高, 生存能力和生长速度增加; 仔鱼发育至 13 dah 时, 其骨骼数目基本稳定, 之后

开始不同程度的骨化。此外, 仔鱼骨骼发育直接影响鱼类饵料的转换过程, 早期骨骼发育有利于增强鱼体的游泳和摄食能力, 可显著提高饵料转换期间仔鱼的成活率。由此可见, 鱼类的骨骼发育除与其生活习性息息相关之外, 同时也受养殖环境的影响, 是其生理功能与环境适应的产物。本研究系统地开展了尖翅燕鱼仔稚鱼的骨骼发育研究, 掌握了鱼体早期发育过程中骨骼的系统发生, 为尖翅燕鱼苗种繁育、环境适应和分类鉴定等研究提供了理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 周胜杰, 马婷, 胡静, 等. 尖吻鲈仔鱼骨骼发育观察 [J]. 南方农业学报, 2018, 49(3): 592-598.
- [2] 韩明洋, 周胜杰, 马振华. 鱼类仔稚鱼骨骼及其畸形发生研究进展 [J]. 水产学杂志, 2021, 34(2): 94-100.
- [3] 邓平平, 施永海, 徐嘉波, 等. 金钱鱼仔稚鱼脊柱及附肢骨骼系统早期发育研究 [J]. 水产科学, 2021, 40(4): 596-602.
- [4] 郑攀龙. 卵形鲳鲹仔稚鱼骨骼发育及骨骼畸形研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015: 8-9.
- [5] 吕雪娇, 王雨浓, 刘清华, 等. 鞍带石斑鱼仔稚鱼骨骼发育与生长特性研究 [J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 116-121.
- [6] BILECENOGLU M, KAYA M. A new alien fish in the Mediterranean Sea: *Platax teira* (Forsskal, 1775) (Osteichthyes: Ehippiidae)[J]. Aquat Invasions, 2006, 1(2): 80-83.
- [7] ZENG C, LIU B S, ZHU K C, et al. Comparison of body height, body length, full length and body weight growth curves of the longfin batfish, *Platax teira*[J]. Pak J Zool, 2021, 53(2): 1-7.
- [8] ZENG C, LIU B S, ZHU K C, et al. Histological study on development of the digestive system of longfin batfish (*Platax teira*)[J]. Isr J Aquac-Bamidgeh, 2020, 72: 9.
- [9] LIU B, GUO H Y, ZHU K C, et al. Nutritional compositions in different parts of muscle in the longfin batfish, *Platax teira* (Forsskal, 1775)[J]. J Appl Anim Res, 2019, 47(1): 403-407.
- [10] 郑攀龙, 马振华, 郭华阳, 等. 卵形鲳鲹尾部骨骼胚后发育研究 [J]. 南方水产科学, 2014, 10(5): 45-50.
- [11] 张伟, 刘莹, 官曙光, 等. 大泷六线鱼仔稚鱼头部骨骼发育观察 [J]. 水生生物学报, 2021, 45(4): 898-905.
- [12] 郑珂, 岳昊, 郑攀龙, 等. 海水养殖鱼类仔、稚鱼骨骼发育与畸形发生 [J]. 中国水产科学, 2016, 23(1): 250-261.
- [13] 王永梅, 唐文乔. 中国鲤形目鱼类的脊椎骨数及其生态适应性 [J]. 动物学杂志, 2014, 49(1): 1-12.
- [14] 王秋荣, 毕建功, 林利民, 等. 青石斑鱼骨骼发育异常的形态特征 [J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(5): 417-421.
- [15] 李仲辉, 杨太有. 大口黑鲈和尖吻鲈骨骼系统的比较研究 [J]. 动物学报, 2001, 47(S1): 110-115.
- [16] 崔科. 红鳍笛鲷胚后发育的条件优化 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018: 8-22.
- [17] KOUMOUNDOUROS G, GAGLIARDI F, DIVANACH P, et al. Normal and abnormal osteological development of caudal fin in *Sparus aurata* L. fry[J]. Aquaculture, 1997, 149(3/4): 215-226.
- [18] 邓平平, 施永海, 徐嘉波, 等. 美洲鲈仔稚鱼脊柱及附肢骨骼系统的早期发育 [J]. 中国水产科学, 2017, 24(1): 73-81.
- [19] 于超勇, 官曙光, 于道德, 等. 大泷六线鱼仔稚鱼脊柱及附肢骨骼系统的发育观察 [J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(1): 47-55.
- [20] GAVAI A P J, DINIS M T, CANCELA M L. Osteological development and abnormalities of the vertebral column and caudal skeleton in larval and juvenile stages of hatchery-reared Senegal sole (*Solea senegalensis*)[J]. Aquaculture, 2002, 211(1/2/3/4): 305-323.
- [21] 王秋荣, 倪玥莹, 林利民, 等. 大黄鱼仔稚鱼脊柱、胸鳍及尾鳍骨骼系统的发育观察 [J]. 水生生物学报, 2010, 34(3): 467-472.
- [22] BAI L R, ZHAO Z Y. Study on embryonic development, larva, juvenile and young fish of *Epinephelus fuscoguttatus*[J]. Agric Sci Technol, 2016, 17(6): 1305-1314,1354.
- [23] 周胜杰, 胡静, 杨其彬, 等. 尖吻鲈胚胎发育及胚后发育观察 [J]. 水产研究, 2020, 7(1): 58-68.
- [24] 黄贤克, 单乐州, 闫茂仓, 等. 黄姑鱼胚胎发育及其与温度和盐度的关系 [J]. 海洋科学, 2017, 41(7): 44-50.
- [25] 韩明洋. 温度胁迫下卵形鲳鲹的转录响应及其脊椎的组织病理和分子表征研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 25-32.
- [26] 吕雪娇. 大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 和鞍带石斑鱼 (*Epinephelus lanceolatus*) 生长特性以及骨骼发育与畸形研究 [D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2018: 70-79.
- [27] 邓平平, 严银龙, 施永海. 褐菖鲉仔稚鱼脊柱及附肢骨骼系统的早期发育 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2018, 44(6): 735-742.
- [28] 张宗锋, 施永海, 张根玉, 等. 刀鲚脊柱及附肢骨骼早期发育研究 [J]. 水产科技情报, 2015, 42(4): 175-178.
- [29] LANGILLE R M, HALL B K. Development of the head skeleton of the Japanese medaka, *Oryzias latipes* (Teleostei)[J]. J Morphol, 1987, 193(2): 135-158.