水产学报
JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA
DOI: 10.11964/jfc.20250114832
Science Press

李文升, 郭晓丽, 杨传军, 等. 豹纹鳃棘鲈工厂化室内繁育及早期生长发育特征 [J]. 水产学报, 2026, 50(1): 019605.
Li W S, Guo X L, Yang C J, *et al*. Industrial indoor breeding, early growth and development characteristics of *Plectropomus leopardus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(1): 019605 (in Chinese).

豹纹鳃棘鲈工厂化室内繁育及早期生长发育特征

李文升[1]，郭晓丽[2,3]，杨传军[4]，贺新磊[4]，庞尊方[4]，马文辉[4]，张英光[4]，孙芳芳[4]，张佳伟[4]，原松柱[4]，张全启[1*]，陈松林[2*]

(1. 中国海洋大学水产学院，山东 青岛　266071；
2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所，海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室，山东 青岛　266071；
3. 青岛大学生命科学学院，山东 青岛　266071；
4. 莱州明波水产有限公司，山东 烟台　261418)

摘要：【目的】实施豹纹鳃棘鲈全工厂化室内繁育，查明在北方室内工厂化车间豹纹鳃棘鲈胚胎及胚后早期发育的特征和规律。【方法】采用显微镜摄像和形态度量方法追踪了北方工厂化室内培养、自然繁殖获得的豹纹鳃棘鲈受精卵早期生长发育过程和特征。【结果】豹纹鳃棘鲈受精卵为透明浮性圆球形，平均卵径 (887.08±10.28) μm；含单油球，油球平均直径 (166.60±10.81) μm。胚胎发育历经受精卵期、胚盘期、卵裂期、囊胚期、原肠胚期、神经胚期、器官形成期与孵化出膜期等 8 个阶段，包括 27 个发育时期。受精后 27 h 13 min 孵化出膜，进入仔鱼阶段。初孵仔鱼全长 (2.156 ± 0.281) mm，前仔鱼期为孵化后 0~3 d，卵黄囊未完全吸收；后仔鱼期为孵化后 4~30 d，卵黄囊完全吸收。出膜后第 4 天油球储备耗尽，第 8 天形成鳔。孵化后第 28 天，全长 (15.32±1.98) mm，第二背鳍棘长 (8.04±1.06) mm，腹鳍棘长 (5.97± 1.37) mm，伸长至最大值，此后开始缩短。孵化后 35 d 稚鱼背鳍棘收缩至最小值 (3.26±1.13) mm 时，各鳍鳍条形成，鳞片和体色开始出现进入稚鱼期。孵化后 71 d 进入幼鱼期，全长 (40.21±1.33) mm，体型与成鱼相似，全身覆盖鳞片和浅蓝色斑点。【结论】本研究首次在北方工厂化车间实现了豹纹鳃棘鲈自然繁殖产卵和苗种人工培育，揭示了其早期生长发育特征与规律，为豹纹鳃棘鲈苗种全工厂化批量培育奠定了理论和技术基础。

关键词：豹纹鳃棘鲈；受精卵；胚胎发育；胚后发育
中图分类号：S 965.334　　**文献标志码：**A

豹纹鳃棘鲈 (*Plectropomus leopardus*) 隶属鲈形目 (Perciformes) 石斑鱼科 (Serranidae) 鳃棘鲈属 (*Plectropomus*)。因其盛产于我国南海的东沙群岛，周身遍布宛若星辰的斑点，故俗称东星斑。豹纹

收稿日期：2025-01-02　　**修回日期：**2025-05-25
资助项目：国家生物育种重大项目 (2023ZD0405502)；山东省重点研发计划项目 (2023ZLYS02)；中国水产科学研究院创新团队项目 (2023-TD-20)；山东省泰山学者攀登计划项目；海南省科技专项 (ZDYF2024XDNY278)；海南省陈松林院士工作站 (YSGZZ2023001)；海南省院士创新平台科研项目 (YSPTZX202402)
第一作者：李文升，从事鱼类繁育与增养殖研究，E-mail：18753565597@139.com；
郭晓丽，从事海水鱼类遗传育种研究，E-mail：2536086829@qq.com
通信作者：张全启，从事海水鱼类遗传育种研究，E-mail：qzhang@ouc.edu.cn；
陈松林，从事海水鱼类遗传育种研究，中国工程院院士，E-mail：chensl@ysfri.ac.cn

鳃棘鲈主要分布于西太平洋地区，包括澳大利亚北部、日本南部和中国南方海域，在我国，特别是南海和台湾海峡分布最广。它喜栖息于热带与亚热带中的珊瑚礁地区，擅于在珊瑚礁的掩护下突袭其他鱼类，是一种中大型肉食性鱼类，游泳能力强，成群活动，因其体型延长且颜色艳丽，特别是具有独特的新月形尾鳍使其在水中游动时非常美丽。豹纹鳃棘鲈肉质嫩滑鲜美，外皮纤薄，营养丰富，这些特征使得豹纹鳃棘鲈具有较高的经济价值和观赏价值，深受国内外消费者喜爱，具有广阔的市场需求，已成为石斑鱼种类中的名贵品种之一。

我国豹纹鳃棘鲈的人工养殖以海南地区的海水网箱和室内海水循环水养殖为主。国外最早开展了豹纹鳃棘鲈生态学鉴定[1-2]、繁殖生理[3-5]、仔鱼生活行为[6-7]等方面的研究，而国内则在豹纹鳃棘鲈的生长性能[8-11]、体色调控[12-17]、营养需求[18-19]、肌肉品质[20]及病害免疫[21-28]等方面进行了深入的研究。虽已有学者早在2008—2010年分析了海南地区网箱养殖的豹纹鳃棘鲈经人工催产获得的受精卵胚胎发育及其在露天池塘中的仔、稚、幼鱼发育特征[29-32]，但由于我国南北地区存在培育条件、养殖模式、水温等气候条件的明显差异，导致南北地区鱼类的早期生长发育差异性较大，且豹纹鳃棘鲈在北方地区工厂化条件下的生殖生理特性以及胚胎发育过程等研究尚未见报道。因此，为实施豹纹鳃棘鲈在北方室内工厂化条件下自然繁殖和批量化苗种培育，本研究使用显微拍摄技术对室内自然繁殖的受精卵的胚胎发育和胚后发育过程进行了观察研究，阐明了不同发育阶段的形态特征及生长规律，为该种名贵石斑鱼的苗种批量化培育和养殖提供基础。

1　材料与方法

1.1　亲鱼培育与产卵调控

项目团队在2024年6—12月，于山东莱州明波水产有限公司开展了本实验研究。豹纹鳃棘鲈亲鱼年龄为3龄，来自我国南海海域捕捞的野生群体，经驯化培育后用于人工繁殖。雌鱼和雄鱼亲本在工厂化室内水泥池 (6.35 m×6.35 m×2.00 m) 进行流水培育。培育环境条件：温度24.0~26.0 ℃，盐度28~30，pH值8.0~8.2，DO≥7.0 mg/L，日换水率200%，接收自然光照 (光强1 000~1 500 lx)。亲鱼饵料为冰鲜的日本鲭 (*Scomber japonicus*)、小黄鱼 (*Larimichthys polyactis*) 和中国枪乌贼 (*Loligo chinensis*) 的混合饵料 (40∶40∶20，重量比)，投喂率为体重的3%~4%，每2日投喂1次。同时，在混合饵料中添加由卵磷脂、虾青素和复合维生素组成的营养强化剂 (40∶40∶20，重量比)，按照混合饵料投喂量的5‰添加，混合搅拌至冰鲜鱼表面，用于增加亲鱼营养，提高配子质量。每日严格记录水温的变化，通过不断摸索调控水温，促使亲鱼性腺自然发育成熟，在室内流水池中自然产卵。

本研究中所涉及的动物操作均遵循《中国海洋大学动物伦理规范》及《中国水产科学研究院黄海水产研究所动物伦理规范》。

1.2　受精卵孵化、胚胎发育及胚后发育观察

在亲鱼培育池外安装收卵槽，收集受精卵后置于500 L长方型PE塑料框架中的60目筛绢内进行孵化。使用流水孵化的方法，保持连续充气，将水温保持在25.0~27.0 ℃。每日观察亲鱼发情追尾行为及产卵时间，当发现亲鱼培育池水面上有受精卵时，立即取样观察。在同一亲鱼池内水面上取同批受精卵800~1 000粒，放入小型玻璃缸中孵化观察，控制其孵化条件与亲鱼室内培育池条件一致，每次从小型孵化缸中随机取样30粒胚胎放到显微镜下观察。胚胎发育观察利用B302生物显微镜，通过显微图像系统拍摄图片，记录卵径、油球大小及各时期特征。

将出膜前的受精卵放入直径6.6 m，水深1.2 m的室内圆形水泥池内 (体积40 m^3) 进行苗种培育，初孵仔鱼放养密度为2×10^3尾/m^3，培育条件：温度保持在26.0~27.0 ℃，盐度28~30，pH值7.8~8.2，微充气，DO≥5.0 mg/L。胚后发育时间以日龄dph (孵化后时间) 计算，定义初孵仔鱼为0日龄，以此类推[33]。初孵仔鱼第4天开始投喂小球藻藻液 (3×10^5个/mL) 和SS型褶皱臂尾轮虫 (*Brachionus plicatilis*)，投喂密度3~5个/mL，日投喂2次；第7~8天开始营养强化，将SS轮虫替换成L轮虫投喂 (密度3个/mL)；第11~12天进入过渡期，开始添加卤虫投喂，根据苗种实际摄食情况按照增加卤虫密度、减少轮虫密度的驯化转饵方式，每日投喂不同比例的L轮虫+卤虫；第18~20天停止投喂小球藻和轮虫，开始投喂卤虫无节幼

体，投喂密度 0.5~1.0 个/mL；第 38~40 天开始添加配合饲料投喂，根据苗种实际摄食情况按照增加配合饲料，减少卤虫投喂量的驯化转饵方式，每日投喂不同比例的卤虫+配合饲料；第 47 天开始，有少数苗种可完全摄食配合饲料；至第 65 天时，苗种均可完全摄食配合饲料，最终完成配合饲料的完全转换。自布卵日开始，光照周期为全天光照 (24 L∶0 D)，光照强度 6 000 lx，待到第 20 天时，光照周期仅在投喂时进行开灯，其余时间均为黑暗期。在前 10 d 保持育苗池内水体不动，在第 10~20 天，针对池内水量缺少的情况，添加少量新鲜海水进行补水，第 20 天开始可进行长流水培育，日补水量 5%，后期根据池内鱼苗数量变化及投喂量情况及时调整水量，并适当增加溶解氧含量。胚后发育观察为随机抽取 30 尾健康仔鱼，在奥特光学 SZ650 体视显微镜下拍照，显微图像系统测量记录全长、体高、卵黄囊大小及鳍棘长等。

1.3　数据分析

受精卵及仔、稚、幼鱼的可测量特征及性状数据均以平均值±标准差 (mean±SD) 的形式表示。

2　结果

2.1　自然产卵与受精卵特征

按照上述亲鱼培育和生殖调控方法，实现了豹纹鳃棘鲈在北方工厂化车间的自然产卵。本研究记录了豹纹鳃棘鲈室内自然产卵的温度范围，产卵期为 2024 年 5—11 月，图 1 所示为每个月调控的最低水温与最高水温。豹纹鳃棘鲈的受精卵为透明圆形浮性卵，受精率高达 95%。受精卵平均卵径为 (887.08±10.28) μm，包含单一油球，平均直径约 (166.60±10.81) μm。上浮卵如图 2 所示。

2.2　胚胎发育规律

受精卵在水温 (26.4±0.2) ℃，盐度 30，pH 8.0~8.2，DO≥6.5 mg/L，光照强度约为 1 200 lx 的海水养殖环境中孵化，历经 27 h 13 min，受精卵开始破膜。豹纹鳃棘鲈胚胎发育分期及特征见表 1。

胚盘期　豹纹鳃棘鲈的受精卵 (图版Ⅰ-1) 在受精后 17 min，细胞质与细胞核开始从植物极定向流到动物极，形成盘状的胚盘隆起 (图版Ⅰ-2)。

卵裂阶段　豹纹鳃棘鲈的受精卵在受精后 29 min 进行第 1 次卵裂，这标志着胚胎发育进入了 2 细胞期。此时胚盘中央区域均等分成 2 个分裂球，这是整个胚胎发生过程中的首次细胞分裂 (图版Ⅰ-3)。在受精 48 min 后，胚胎开始进行第 2 次卵裂，均分为 4 个细胞，进入 4 细胞期阶段 (图版Ⅰ-4)。在受精后 1 h 8 min，分裂为 2 排，共 8 个细胞，进入 8 细胞期 (图版Ⅰ-5)。受精后 1 h 26 min，依然可观察到排列整齐规则的 4 排共 16 个细胞，随后进入 16 细胞期 (图版Ⅰ-6)。在受精后 1 h 53 min 时，分裂面开始失去规则，开始进入 32 细胞期 (图版Ⅰ-7)。受精后 2 h 20 min，分裂面的界逐渐变得模糊，进入 64 细胞期 (图版Ⅰ-8)。受精后经过 2 h 33 min，细胞继续快速分裂，进入 128 细胞期 (图版Ⅰ-9)。受精后 2 h 44 min，细胞大小开始不均，排列变得杂乱无章，进入多细胞期 (图版Ⅰ-10)。受精后 2 h 55 min，细胞体积缩小，细胞之间的界限变得不规则且难以辨认，进入桑椹胚期 (图版Ⅰ-11)。细胞在这一阶段完成

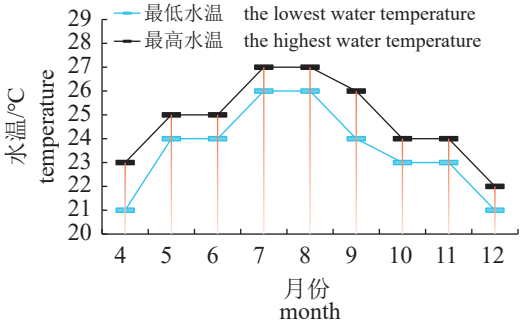
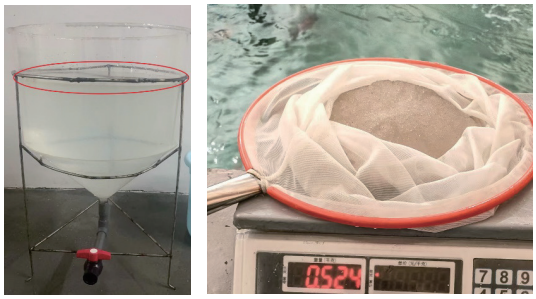


图 1　不同月份下豹纹鳃棘鲈亲鱼培育的水温变化

Fig. 1　Change of water temperature for the cultivation of *P. leopardus* in different months



(a)　(b)

图 2　豹纹鳃棘鲈的上浮受精卵

(a) 自制简易浮卵装置，圈起的红色上层即为受精卵投入到装置中，在该高盐环境中上浮的受精卵；(b) 上浮得到的受精卵。

Fig. 2　Floating fertilized eggs of *P. leopardus*

(a) a self-made simple floating egg device, the circled red upper layer represents the fertilized egg that was placed into the device and floated up in the high salt environment; (b) the floating fertilized eggs.

表 1　豹纹鳃棘鲈胚胎发育特征

Tab. 1　Embryonic development characteristics of *P. leopardus*

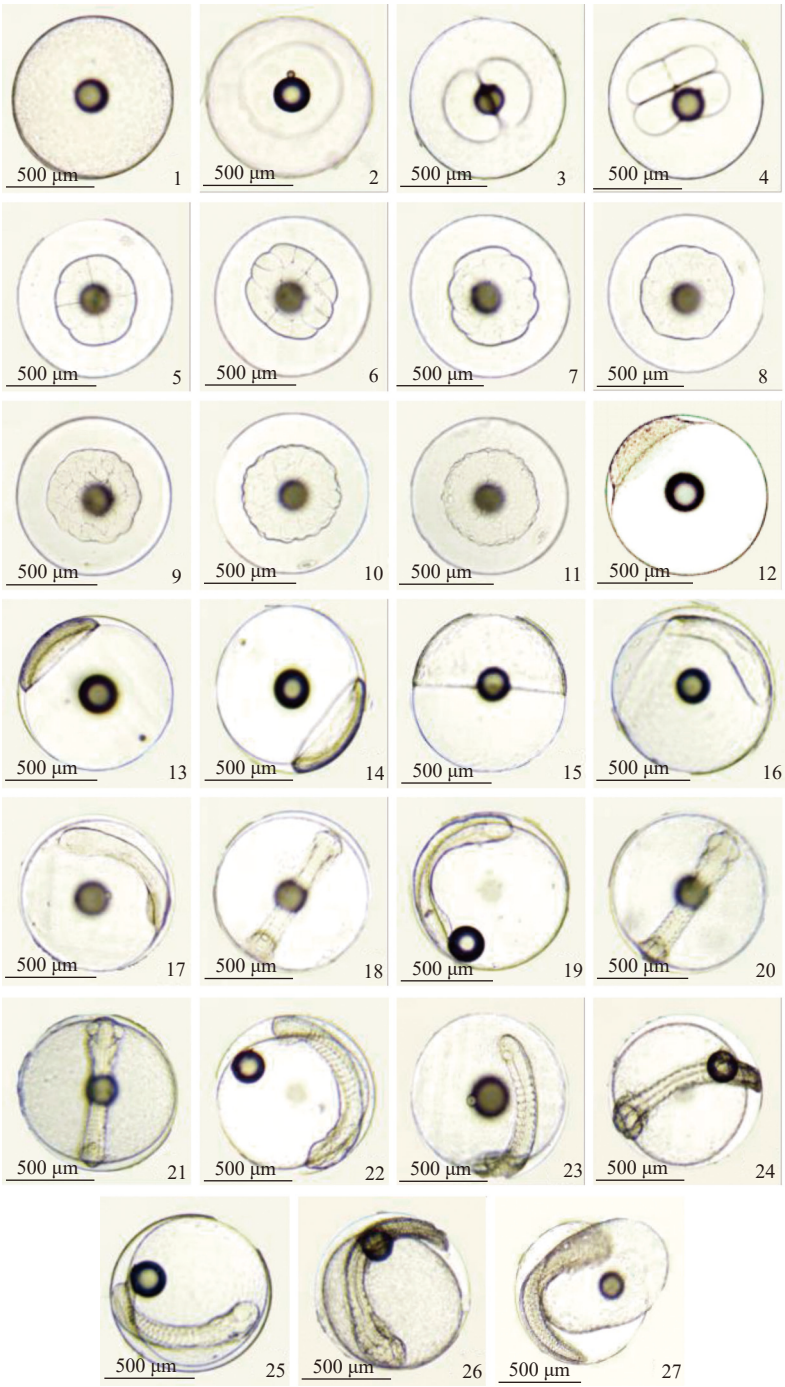
发育时期 embryonic development stage	主要特征 main characteristics	受精后时间 time after fertilization
受精卵　fertilized eggs	圆形、无色透明、浮性卵、单油球	0 min
胚盘形成　blastodisc formation	受精卵内形成隆起的胚盘	17 min
2细胞期　2-cell stage	胚盘上方分裂成为2个对等大小的细胞	29 min
4细胞期　4-cell stage	分裂面与第1次垂直，形成4个对等细胞	48 min
8细胞期　8-cell stage	继续分裂成8个细胞	1 h 8 min
16细胞期　16-cell stage	继续分裂成16个细胞	1 h 26 min
32细胞期　32-cell stage	继续分裂成32个细胞	1 h 53 min
64细胞期　64-cell stage	继续分裂成64个细胞	2 h 20 min
128细胞期　128-cell stage	继续分裂成128个细胞	2 h 33 min
多细胞期　muti-cell stage	细胞持续分裂变小，聚集成团，排列不规则	2 h 44 min
桑椹胚期　morula stage	细胞更小，形似桑葚球	2 h 55 min
高囊胚期　high blastula stage	囊胚隆起，呈冒状	4 h 50 min
低囊胚期　low blastula stage	囊胚隆起下降，囊胚变低	6 h 40 min
原肠胚早期　early gastrula stage	胚盘细胞扩展变薄，并逐渐向植物极方向包裹	8 h 36 min
原肠胚中期　middle gastrula stage	胚层细胞覆盖卵黄囊的1/2，形成胚环，胚盾增厚	11 h 2 min
原肠胚晚期　late gastrula stage	胚层细胞覆盖卵黄囊超过2/3，胚盾变窄	11 h 56 min
胚体形成期　embryogenesis period	胚层即将下包整个卵黄	12 h 58 min
神经胚期　neurula stage	神经板形成，神经脊索可见	13 h 28 min
克氏泡出现　Kupffer's vesicles appeared	胚体前端出现视囊，胚体末端腹面出现克氏泡	13 h 58 min
视囊形成期　optic capsule stage	胚体前端视囊轮廓增大，出现7对肌节	14 h 15min
脑泡形成期　otocyst stage	胚体头部背面两个视囊之间出现椭圆形板状脑泡	16 h 29min
心脏形成期　cardiac onsets	心脏出现在头部末端下方，出现16对肌节	18 h 05 min
肌肉效应期　muscular contraction period	胚体开始颤动，脑泡分为左右两室	18 h 59 min
尾芽期　tail bud stage	尾芽开始与卵黄囊分离	20 h 20 min
心脏跳动期　heart-beating stage	心脏开始有节律地跳动	22 h 34 min
出膜前期　pre-hatching stage	胚体扭动幅度、频率增大而有力，即将出膜	24 h 46 min
孵化期　hatching stage	头部先破膜而出，尾部在胚体内	26 h 34 min
初孵仔鱼　pre-hatching stage (side)	胚体部分破膜，已孵出50%的仔鱼，身体伸展	27 h 13 min

了初步分化过程，胚胎发育进入了下一个阶段。

囊胚阶段　受精后 4 h 50 min，豹纹鳃棘鲈的受精卵到达囊胚发育阶段。胚盘细胞层开始绝大程度缩小，由此在卵黄与胚盘之间形成囊胚腔，标志着胚胎进入高囊胚期 (图版Ⅰ-12)。在受精后 6 h 40 min，囊胚的隆起部分向四周展开，囊胚腔显现，进入低囊胚期 (图版Ⅰ-13)。

原肠胚阶段　受精后 8 h 36 min，原肠胚发育进入早期，此阶段可观察到两层胚层中的外层细胞开始向原卵黄囊 1/3 区域发育、扩张，侧面胚层顶端现一新月形胚盾，背面现胚环，进入原肠胚早期 (图版Ⅰ-14)。受精后 11 h 2 min 时，原肠胚发展到中期，胚层继续下包，胚环位于中间，胚环边界清晰可辨，进入原肠胚中期 (图版Ⅰ-15)。受精后 11 h 56 min，原肠胚进入晚期，胚层下方环绕卵黄 3/4，胚盾逐渐变长，头部也随之增大，标志着原肠胚的发育完成 (图版Ⅰ-16)。

神经胚阶段　受精后 12 h 58 min，胚胎发育进入胚体形成期，胚层即将下包到整个卵黄，胚体头部变大，在胚盾外层可见神经板细胞出现分化，神经芽的雏形出现，同时胚孔接近闭合 (图版Ⅰ-17)。受精后 13 h 28 min，胚层细胞已经几乎完全覆盖整个卵黄囊，胚孔封闭，胚体尾部出现原基，胚胎从单层的胚盘发育成了柱状胚体结构，



图版 Ⅰ　豹纹鳃棘鲈受精卵至孵化期阶段的发育情况

1. 受精卵，2. 胚盘形成，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. 128 细胞期，10. 多细胞期，11. 桑椹胚期，12. 高囊胚期，13. 低囊胚期，14. 原肠胚早期，15. 原肠胚中期，16. 原肠胚末期，17. 胚体形成期，18. 神经胚期，19. 克氏泡出现，20. 视囊形成期，21. 脑泡形成期，22. 心脏形成期，23. 肌肉效应期，24. 尾芽期，25. 心脏跳动期，26. 出膜前期，27. 孵化期。

Plate Ⅰ　Photos of *P. leopardus* from fertilized eggs to hatching stage

1. zygote, 2. oil globule, 3. protuberant blastoderm, 4. 2-cell stage, 5. 4-cell stage, 6. 8-cell stage, 7. 16-cell stage, 8. 32-cell stage, 9. 128-cell stage, 10. mult-icell stage, 11. morula stage, 12. high-blastula stage, 13. low-blastula stage, 14. early gastrula stage, 15. middle gastrula stage, 16. late gastrula stage, 17. embryo body stage, 18. neural embryo stage, 19. Kupffer′s vesicles appeared, 20. optic capsule stage, 21. otocyst stage, 21. brain vesicle stage, 22. heart appeared, 23. embryo body twisting stage, 24. tail bud formed, 25. heart-beating stage, 26. pre-hatching stage, 27. hatching stage.

神经板形成，神经脊索可见 (图版 Ⅰ-18)。

器官形成阶段　受精后 13 h 58 min，豹纹鳃棘鲈胚胎发育进入眼原基形成期，头部明显增大，前脑两侧出现眼原基，在末端腹面 (近卵黄处) 出现 1 个液泡样结构即克氏泡 (图版 Ⅰ-19)。在受精后的 14 h 15 min，眼原基逐渐膨胀凸出而形成眼囊，轮廓增大，这标志着视觉器官的关键分化已经开始，并出现 7 对肌节 (图版 Ⅰ-20)。受精后 16 h 28 min，在胚体头部背面的 2 个视囊之间，出现未分隔的椭圆形板状脑泡，这标志着脑泡开始形成 (图版 Ⅰ-21)。受精后 18 h 5 min，心脏作为血液循环器官出现，呈现简单的管状结构位于头部末端略为下方，并出现 16 对肌节 (图版 Ⅰ-22)。受精后 18 h 59 min 时，胚体开始出现轻微而不规则的颤动，不过尾芽仍旧与卵黄囊相连；与此同时，脑泡已经分成左右两个部分 (图版 Ⅰ-23)。受精后 20 h 20 min，胚体的尾部开始逐渐变尖，与卵黄囊的分离更加明显，这标志着尾牙期的开始 (图版 Ⅰ-24)。至 22 h 34 min 心脏由最初的轻微搏动开始逐渐变得快而有力，有自主节律地收缩和舒张，这标志着已经建立有效的血液循环系统 (图版 Ⅰ-25)。24 h 46 min 进入出膜前期，胚体扭动幅度、频率增大而有力，即将迎来破膜孵化的最后阶段 (图版 Ⅰ-26)。受精后 26 h 34 min，可观察到胚体剧烈扭动，首先破膜的是胚体头部，尾部弯曲但仍在卵内，标致着此时进入孵化期。

2.3　胚后发育

卵黄囊前仔鱼期　初孵仔鱼全长 (2.156±0.281) mm (图 3)，全身透明且细长，呈微弯曲状态，无色素沉积。鱼体前端可以看到一呈椭圆形的结构，为卵黄囊，长径 (0.815±0.182) mm，短径 (0.434±0.214) mm，占鱼体部分约 1/2，内有一油球，油球位于卵黄囊中部或中后端，直径 (0.157±0.195) mm，鱼体无游泳能力，尾部偶有抽动，脊索清晰可见，稍向下弯曲 (图版 Ⅱ-1)。

1 dph 仔鱼：全长 (2.472±0.311) mm，身体透明，仔鱼的头部增大，变得更加立体，逐渐脱离卵黄囊，同时卵黄囊的体积缩小，长径 (0.782±0.063) mm，短径 (0.326±0.082) mm，卵黄囊前端与眼部连接，后端与鱼体 1/3 处连接。油球体积也略为缩小，鱼体前 1/3 端有少量色素沉积，口裂未形成，脊索略微变粗加宽且均匀，仔鱼大多在水体表面，尾部偶尔呈现快速旋转运动(图版 Ⅱ-2)。

2 dph 仔鱼：全长 (2.573±0.674) mm，卵黄囊仍有一部分，脊索明显；眼窝加深，胸鳍原基长出，消化道开始膨大，肛门形成，末端向外弯曲，但还未与外界连接 (图版 Ⅱ-3)，仔鱼大多倒挂在鱼体中上层，游动能力弱。

3 dph 仔鱼：全长 (2.672±0.596) mm，卵黄囊大部分被消耗，油球仅剩残迹，口裂已形成，但未开口，脊索稍微弯曲，眼部黑色素加深，消化道发育更加明显 (图版 Ⅱ-4)。

卵黄囊后仔鱼期　4 dph 仔鱼：全长 (2.773±0.483) mm，卵黄囊已完全消耗，油球消失，口裂增大，开始出现开闭动作，吻端向前突出，上颌较短，下颌较长，口部已完成开口，逐渐由内源性营养阶段过渡到外源性营养阶段，消化道明显增粗；肛门与外界连接，脊索逐渐被脊柱代替；在眼部、消化道附近黑色素明显加深，胸鳍上缘变厚，黑色素显著加深，呈张开状，尾部扇形，仔鱼由在水中的倒挂状态逐渐转变为游泳能力增强 (图版 Ⅱ-5)。

5 dph 仔鱼：全长 (2.813±0.451) mm，进入外源性营养阶段，部分仔鱼开始进食，清晰可见消化道上方的黑色素聚集，消化道内可见饵料食物痕迹，且完全贯通，肠道表面已经开始出现褶皱，眼囊中的黑色素逐渐加深，尾椎骨下方颗粒状黑色素向上环包，同时头顶出现下凹特征，胸鳍有力灵活摆动，仔鱼的游泳能力显著增强，开始出现集群行为并具备躲避的行为能力 (图版 Ⅱ-6)。

7 dph 仔鱼：全长 (3.348±0.735) mm，口裂继续增大，第二背鳍棘和一对腹鳍棘开始长出，第二背鳍棘长约 (0.292±0.380) mm，腹鳍棘长约 (0.552±0.690) mm (图 4)，棘末端出现黑色素点，内脏团消化道黑色素继续沉着，尾椎骨下方黑色素斑面积增大且数量增多 (图版 Ⅱ-7)。

8 dph 仔鱼：全长 (3.841±0.614) mm，其第二背鳍棘和一对腹鳍棘均开始明显增长，背鳍第二鳍棘长 (1.149±0. 676) mm，腹鳍棘长 (1.174±0.132) mm。体内消化道上方可见鱼鳔形成，与孵化初期相比，其游泳和避障能力获得明显提高，能够主动在水体中活动 (图版 Ⅱ-8)，并倾向到水体中下层游动。

10 dph 仔鱼：全长 (4.163±0.445) mm，第二背鳍棘和一对腹鳍棘继续伸长，但相比之下，第二背鳍棘的增长速率明显快于腹鳍棘，第二背鳍棘的长度为 (2.268±0.473) mm，腹鳍棘长

图版 Ⅱ　豹纹鳃棘鲈仔、稚、幼鱼形态发育特征

1. 初孵仔鱼，2. 1 d 仔鱼，3. 2 d 仔鱼，4. 3 d 仔鱼，5. 4 d 仔鱼，6. 5 d 仔鱼，7. 7 d 仔鱼，8. 8 d 仔鱼，9. 10 d 仔鱼，10. 16 d 仔鱼，11. 19 d 仔鱼，12. 28 d 仔鱼，13. 30 d 稚鱼，14. 35 d 稚鱼，15. 42 d 稚鱼，16. 46 d 稚鱼，17. 54 d 稚鱼，18. 64 d 稚鱼，19. 71 d 幼鱼，20. 79 d 幼鱼。

Plate Ⅱ　Morphological development of larvae, juvenile, and young fish of *P. leopardus*

1. newly hatched larve, 2. 1 dph larvae, 3. 2 dph larvae, 4. 3 dph larve, 5. 4 dph larve, 6. 5 dph larve, 7. 7dph larve, 8. 8 dph larve, 9. 10 dph larvae, 10. 16 dph larvae, 11. 19 dph larvae, 12. 28 dph larvae, 13. 30 dph juvenile, 14. 35 dph juvenile, 15. 42 dph juvenile 16. 46 dph juvenile, 17. 54 dph juvenile, 18. 64 dph juvenile, 19. 71 dph young fish, 20. 79 dph young fish.

(1.932±0.196) mm，棘末端黑色素更深，开始出现锯齿尖刺 (倒钩状)，眼睛下后方开始有红色鳃丝形成，尾鳍开始长出鳍棘和鳍条 (图版 Ⅱ-9)。

16 dph 仔鱼：全长 (7.12±1.23) mm，第一背鳍的原基开始显现，第二背鳍棘和一对腹鳍棘的长度仍在延伸，第二背鳍棘长 (5.32±0.97) mm，腹鳍棘长 (4.15±0.65) mm，鳍棘上长有大量排列规则的锯齿尖刺 (倒钩状)；头部发育成型，头顶出

现黑色素点，鳃盖骨边缘明显，消化道加粗且褶皱增多，眼睛下后方鳃丝红色更深，面积更大，腹部表面色彩加深，脊柱下方清晰可见红色血管，鱼体前端贯通 (图版Ⅱ-10)。

19 dph 仔鱼：全长 (8.47±1.59) mm，第一背鳍的原基出现第一背鳍的伸长，此时第二背鳍基的鳍棘长 (5.53±1.34) mm，腹鳍棘长 (4.20±1.08) mm，头部及腹部红色血流信号更加明显，头顶部出现雪花状黑色素斑，臀鳍原基出现，尾鳍呈扇形，辐射状鳍条丝明显 (图版Ⅱ -11)。

28 dph 仔鱼：全长 (15.32±1.98) mm，头部发育较好，脊椎末端略微上翘，体表色素有所增加，第二背鳍棘和一对腹鳍棘达到了最大长度，第二背鳍棘长 (8.04±1.66) mm，腹鳍棘长 (95.97±1.37) mm，之后，第二背鳍棘和一对腹鳍棘开始收缩。背鳍出现第三鳍棘，臀鳍出现鳍棘 (图版Ⅱ-12)。

30 dph 仔鱼：全长 (17.15±2.23) mm，第二背鳍棘与一对腹鳍棘开始缩短，第二背鳍棘长度为 (5.26±0.58) mm，腹鳍棘 (4.81±0.69) mm，鳍棘上的倒刺逐渐缩回，数量变少，各鳍鳍条基本形成。鱼的头部形状变得更尖，鱼体表面开始长出细小鳞片，颜色开始微微变红，并具有反光效果 (图版Ⅱ-13)。

稚鱼期　35 dph 稚鱼：全长 (19.79±2.45) mm，第二背鳍棘和腹鳍棘均收缩减少至其最低值，此时第二背鳍棘的棘长为 (3.26±1.13) mm，腹鳍棘 (3.11±1.49) mm，体表及体内色素点增多并加深 (图版Ⅱ-14)。

42 dph 稚鱼：全长 (23.39±1.75) mm，鳍棘经收缩已退化为背鳍与腹鳍鳍条，全身通体及眼部呈橙红色，体表长出较多鳞片，各鳍鳍条进一步舒展，完成变态发育 (图版Ⅱ-15)。

46 dph 稚鱼：全长 (25.18±1.49) mm，鳃盖加厚，体表橙红色有所加深，体表大部分覆盖鳞片，自体表中部及上方出现特有的黑色素斑点 (图版Ⅱ-16)。

54 dph 稚鱼：全长 (28.43±1.65) mm，鱼体表面斑点颜色加深，且数量增多，头部鳃盖表面也长出斑点，体表大部分覆盖鳞片，侧线明显，鱼群喜聚群于隐蔽区 (图版Ⅱ-17)。

64 dph 稚鱼：全长 (34.01±1.27) mm，鱼体表面斑点颜色进一步加深，数量进一步增多，头部鳃盖表面及尾鳍基部均有斑点分布，鳞片基本覆盖鱼体，形态特征与幼鱼相似 (图版Ⅱ-18)。

幼鱼期　71 dph 幼鱼：全长 (40.21±1.33) mm，鱼体色更加明显，呈现微粉红色，原先的黑色素斑点已变为浅蓝色 (图版Ⅱ-19)。

79 dph 幼鱼：全长 (45.56±1.39) mm，浅蓝色斑点进一步变为蓝色圆形斑点，颜色加深为星空蓝色。进入此时期的幼鱼可观察到清晰可见的侧线，各器官、皮肤黏液形成完好，生活习性与形态已发育为与成鱼相近，较喜欢在池底遮蔽阴暗处成群游动，人工投喂时会出现抢食现象，活力状态佳 (图版Ⅱ-20)。

3　讨论

3.1　豹纹鳃棘鲈亲鱼在北方工厂化室内的强化培育和自然产卵育苗效果分析

迄今，在人工养殖条件下，大多数种类的石斑鱼均很难实现在工厂化室内批量化、规律化地自然产卵受精，即使有过自行产卵的记录，但产卵量和规律性均难以预测。长期以来，豹纹鳃棘鲈的苗种培育主要依靠在海南自然海区网箱中自

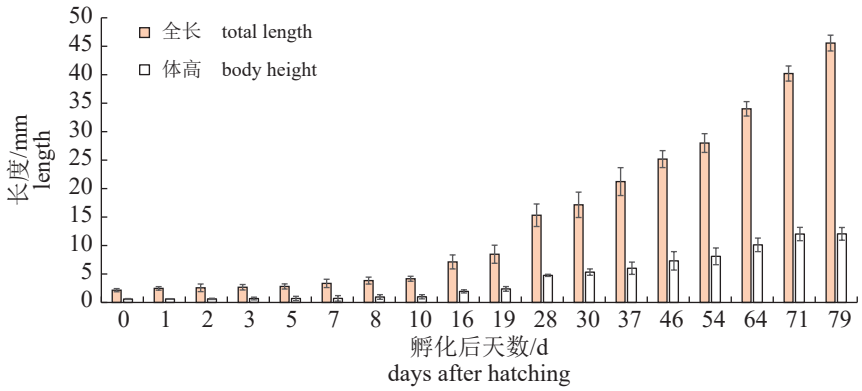


图 3　豹纹鳃棘鲈仔、稚、幼鱼的生长情况

Fig. 3　The growth of larval, juvenile and young fish of *P. leopardus*

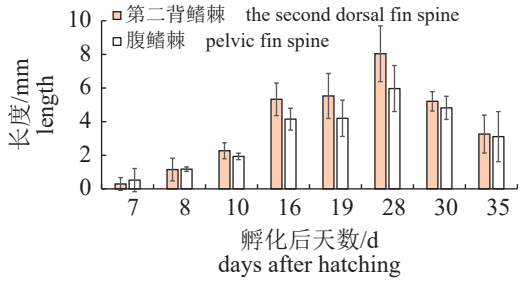


图 4　豹纹鳃棘鲈第二背鳍棘和腹鳍棘的长度

Fig. 4　The length of the second dorsal fin spine and pelvic fin spine of *P. leopardus*

行产卵或激素注射诱导产卵，然后将受精卵转移到露天外塘中进行孵化和育苗，由于受水温变化、风浪、暴雨、外塘病原微生物等环境条件的影响，导致豹纹鳃棘鲈外塘育苗成活率很低，育苗效果不稳定，阻碍规模化繁育进程，严重影响产业发展。

本研究采用自然光照及流水刺激的培育方式使亲鱼在工厂化车间内实现自然产卵，并在全工厂化车间培育出豹纹鳃棘鲈苗种。本研究中的豹纹鳃棘鲈在水温 26.4 ℃、盐度 30 的流水培育和营养强化的人工调控条件下所产受精卵的卵径为 (887.08±10.28) μm，显著高于鞍带石斑鱼 (*Epinephelus lanceolatus*)[34]、赤点石斑鱼 (*E. akaara*)[35]、云纹石斑鱼 (*E. moara*) [36]、七带石斑鱼 (*E. septemfasciatus*)[37]、斜带石斑鱼 (*E. coioides*)[38]、棕点石斑鱼 (*E. fuscoguttatus*)[39]。王永波等[29] 研究表明，在海南自然海区网箱进行人工催产获得的豹纹鳃棘鲈受精卵卵径为 816.000±0.015) μm，明显小于本研究中豹纹鳃棘鲈的受精卵卵径，这表明本研究中通过对亲鱼进行强化培育和人工调控后所获的自然繁殖的受精卵卵径较大，卵质佳，且统计受精率≥95%。另一方面，有研究表明点带石斑鱼也实现了在人工养殖条件下，通过强化培育能够自然产卵，产卵量大且受精卵质量较好[40]。这表明工厂化室内亲鱼强化培育和自然产卵的质量优于海南网箱中人工催产获得的受精卵。本研究通过为豹纹鳃棘鲈亲鱼提供适宜比例的优质蛋白质、脂肪 (卵磷脂)、虾青素、复合维生素，控制摄入量，防止脂肪过度积累，促进性腺同步发育，最终提高配子质量。虾青素作为一种活性物质，进入细胞核后被激素受体接收，从而诱导性激素释放，促进卵母细胞的加速发育[41]。已有研究表明，饲料中添加虾青素可提高水产动物的生长繁殖性能，并提高机体免疫力，减少炎症发生[42]。而卵磷脂为甘油磷脂混合物，在卵巢发育过程中，对脂类物质从肝胰腺经血淋巴转运到卵巢起着重要作用[43]。维生素 E 则能有效去除体内各种有害自由基，保证卵膜结构完整性和卵中 DNA 不被氧化破坏，从而改善亲鱼繁殖性能[44]。例如，在施氏鲟 (*Acipenser schrenckii*) 饲料中添加 2% 的卵磷脂，可提高施氏鲟亲鱼血清 E_2 和 Vg 的浓度，从而提高施氏鲟亲鱼的繁殖性能[45]。在真鲷 (*Pagrus major*) 饲料中添加适量维生素 E 后，亲鱼的浮卵率、孵化率和正常仔鱼的比例显著提高[46]。而本研究中采用的亲鱼强化培育的措施，可能是实现豹纹鳃棘鲈亲鱼工厂化室内自然产卵的关键因素之一，具有重要的应用价值和推广前景，对推进豹纹鳃棘鲈全室内规模化人工繁育具有重要的现实意义。

3.2　豹纹鳃棘鲈在北方工厂化室内胚胎发育的特征分析

本研究详细观察和记录了豹纹鳃棘鲈在中国北方地区工厂化室内养殖条件下自然繁殖的受精卵及胚胎发育的形态特征及时序变化。本研究表明豹纹鳃棘鲈在北方工厂化室内 26.4 ℃ 的水温条件下历经 27 h 13 min 完成孵化，整个胚胎发育包括 8 个发育时期 (受精卵期、胚盘期、卵裂期、囊胚期、原肠胚期、神经胚期、器官形成期、孵化出膜期)。这与鞍带石斑鱼[34]、赤点石斑鱼[35]、云纹石斑鱼[36]、七带石斑鱼[37]、斜带石斑鱼[38]、棕点石斑鱼[39] 和驼背鲈 (*Chromileptes altivelis*)[47] 大体一致。尽管一些学者对各阶段的命名或具体描述存在细微差异，但总体发育历程是高度一致的。

王永波等[29] 报道了海南地区网箱养殖人工催产豹纹鳃棘鲈所获的受精卵在 30~31 ℃ 的自然海区水温下孵化时间为 16 h 32 min，较本研究中发育速率明显加快，这表明同一鱼种在国内南北地区不同孵化温度下的胚胎发育所需时间差异非常明显。本研究中的豹纹鳃棘鲈与赤点石斑鱼[35]、斜带石斑鱼[38]、驼背鲈[47] 在 25.5~26.5 ℃ 孵化温度下所经历的发育时间较一致。而云纹石斑鱼[36]、七带石斑鱼[37] 在 23~24 ℃ 的孵化时间分别为40 h 37 min 和 31 h 5 min，表现为更长的胚胎发育时间。这是由于鱼类的胚胎发育与孵化水温密切相关，温度作为影响胚胎发育进程最主要的因子，在适温范围内，水温越高，胚胎发育越快[48-49]。另有相关研究表明，鱼卵的大小不仅对早期发育具有

重要意义，鱼卵的直径对其发育速率亦有显著的影响，一般卵径越大，发育速率越慢[50-51]，这可能均是导致本研究中豹纹鳃棘鲈在北方工厂化室内养殖条件下胚胎发育时间较长的原因。

3.3　豹纹鳃棘鲈在北方工厂化室内胚后发育的特征分析

目前关于鱼类早期生长发育阶段的划分方式尚未统一，参考国内外石斑鱼早期发育阶段的划分方式[40,52-53]及结合本研究中对豹纹鳃棘鲈的形态发育观察，依据卵黄囊消耗情况、鳞片覆盖水平、体色变化以及第二背鳍棘和腹鳍棘的伸缩变化，实验将其胚后发育过程划分为卵黄囊前仔鱼期、后仔鱼期、稚鱼期和幼鱼期，这也与驼背鲈 (♀) × 黑斑石斑鱼 (*E. tukula*，♂) 杂交子代[54]，鞍带石斑鱼 (♀)×云纹石斑鱼 (♂) 杂交子代[55]的划分方式基本一致。

通过分析本研究北方地区豹纹鳃棘鲈与前所述 7 种石斑鱼类[34-39]和豹纹鳃棘鲈在海南地区[29]胚后发育特征，发现豹纹鳃棘鲈在工厂化室内孵化的初孵仔鱼平均全长为 (2.156±0.281) mm，体型明显更大，再次反映出本研究中豹纹鳃棘鲈自然繁殖产卵卵质更好。另有报道指出，初孵仔鱼的体型越大，其口裂也越大，更有利于获取开口饵料[56]，因此本研究人工繁育实验的豹纹鳃棘鲈仔鱼在前期开口阶段可摄取更多的饵料，以获取尽可能多的能量，促进鱼体各组织器官的发育及分化。在本研究中，豹纹鳃棘鲈发育至 4 日龄时，卵黄囊吸收完全，进入仔鱼后期，这一时间点与鞍带石斑鱼[34]和云纹石斑鱼[36]一致，但与斜带石斑鱼[38]、驼背鲈[47]等的仔鱼开口摄食时间不同，这一异同点与鱼的种类、水温的差异均有关系。4~8 日龄为营养来源适应期，是由卵黄囊吸收转向外界摄食的关键时期，死亡率很高，主要原因是营养方式之间的转化不适应[57]，及由于先天性畸形导致无法开口进食或摄食量不足，因此在最初生长发育的 7~8 d，仔鱼的生长并不显著。自第 7~8 天开始进行营养强化，由投喂 SS 轮虫替换为 L 型轮虫，自第 18~20 天开始转化为卤虫幼体以及自第 38~40 天开始投喂配合饲料，每个阶段投喂饵料的种类转化都会促使鱼体获得更多的能量，导致鱼体生长速率加快。从图 3 中可看出豹纹鳃棘鲈在北方地区的早期生长发育前期 (1~10 日龄) 的生长速率较慢，后期 (19~79 日龄) 的生长速率明显加快，呈现典型的异速生长模式，在其他硬骨鱼类的早期发育阶段也出现类似的现象[56, 58-59]，因此推测这种两段式生长策略可提高鱼苗在早期发育关键阶段的适应性和存活率，是鱼类适应自然生态环境的重要生存方式。此外，本研究中豹纹鳃棘鲈在前 10 d，仔鱼体表色素以黄褐黑色素为主，在 28~42 d，以头部和胸腹部着色为主，自 42 日龄开始，体色显著由橙变红，颜色分布趋于均匀，整体呈现红色调。这也表明体表色素沉积模式与个体生长存在高度相关性。

此外，在石斑鱼早期发育中，第二背鳍与腹鳍棘的伸长、收缩变化是最显著的特征，同时也是石斑鱼类特有的变态发育现象，1 条背鳍棘与 2 条腹鳍棘伸展呈三叉状，俗称“三叉戟”[54]。三叉戟的长出，可为鱼苗在水中活动提供更大的推力，也可在逆流中保持平衡，摄食和抵御敌害能力也明显增强[58]。本研究中，豹纹鳃棘鲈仔鱼在 7 日龄时开始发育长出第二背鳍棘和腹鳍棘，起初时腹鳍棘的长度超过第二背鳍棘，但随着鱼体生长，第二背鳍棘的发育快于腹鳍棘，在 10 日龄时，第二背鳍棘的长度逐渐超过腹鳍棘；在 28 d 时第二背鳍与腹鳍棘伸长到仔、稚鱼阶段最大值，同时也是各鳍基本形成的时间，在第 35 天“三叉戟”绝对长度收缩到最小值，鳍棘退化为鳍的组成部分。这一变态发育的整体趋势与其他石斑鱼一致，但“三叉戟”的长出、伸缩长度变化的时间点各有不同，这可能与其种类及发育水温相关。例如，豹纹鳃棘鲈[29]在海南地区 31.2 ℃ 的水温条件下，第 16 天“三叉戟”即发育达到绝对长度最高值，第 28 天收缩到最低值，完成变态发育时间显著缩短，但其与培育水温相近的驼背鲈[47]鱼苗“三叉戟”的生长发育时间节点较为近似，这是由于适宜范围内的水温升高可加速鱼体的发育和生长，完成变态发育的时间更快。鳍棘的发育对于捕食饵料与保持平衡具有重要作用，尤其在“三叉戟”的伸长期，应保证其能够摄食足够的食物以供给生长，同时也是生产育苗期间的危险期，需加强关注营养的供给。但石斑鱼鳍棘变化背后涉及的再生与凋亡的分子生物学机制及生物学意义目前还不明确，有待今后进一步探究。

总之，本研究实现了豹纹鳃棘鲈亲鱼在工厂化室内自然产卵繁殖，查明了自然繁殖的胚胎和胚后发育规律和特征，揭示了早期鱼苗的生长特

性和规律，填补了豹纹鳃棘鲈在工厂化室内自然产卵和育苗的研究空白，为今后的规模化人工繁殖和苗种批量化生产打下良好基础，对于推动豹纹鳃棘鲈等名贵石斑鱼的工厂化养殖和产业发展具有重要意义和推广价值。

（作者声明本文无利益冲突）

参考文献 (References)：

[1] Lou D C, Mapstone B D, Russ G R, *et al*. Using otolith weight-age relationships to predict age based metrics of coral reef fish populations across different temporal scales[J]. Fisheries Research, 2007, 83(2-3): 216-227.

[2] Zhu Z Y, Yue G H. The complete mitochondrial genome of red grouper *Plectropomus leopardus* and its applications in identification of grouper species[J]. Aquaculture, 2008, 276(1-4): 44-49.

[3] Adams S. Morphological ontogeny of the gonad of three plectropomid species through sex differentiation and transition[J]. Journal of Fish Biology, 2003, 63(1): 22-36.

[4] Frisch A, Anderson T. Physiological stress responses of two species of coral trout (*Plectropomus leopardus* and *Plectropomus maculatus*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2005, 140(3): 317-327.

[5] Frisch A J, McCormick M I, Pankhurst N W. Reproductive periodicity and steroid hormone profiles in the sex-changing coral-reef fish, *Plectropomus leopardus*[J]. Coral Reefs, 2007, 26(1): 189-197.

[6] Leis J M, Carson-Ewart B M. In situ swimming and settlement behaviour of larvae of an Indo-Pacific coral-reef fish, the coral trout *Plectropomus leopardus* (Pisces: Serranidae)[J]. Marine Biology, 1999, 134(1): 51-64.

[7] Yoseda K, Yamamoto K, Asami K, *et al*. Influence of light intensity on feeding, growth, and early survival of leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) larvae under mass-scale rearing conditions[J]. Aquaculture, 2008, 279(1-4): 55-62.

[8] 高进, 王永波, 刘金叶, 等. 豹纹鳃棘鲈差异流速下肝脏转录组分析 [J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 107-117.
Gao J, Wang Y B, Liu J Y, *et al*. Transcriptome analysis of *Plectropomus leopardus* liver under different flow velocity[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(1): 107-117 (in Chinese).

[9] Wang T, Wu X, Song L L, *et al*. Identification of candidate growth-related SNPs and genes using GWAS and transcriptome analyses in leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*)[J]. Aquaculture, 2023, 574: 739677.

[10] 高进, 刘金叶, 陈傅晓, 等. 豹纹鳃棘鲈生长差异分化相关 lncRNA 与 mRNA 加权基因共表达网络分析 [J]. 渔业科学进展, 2025, 46(1): 46-58.
Gao J, Liu J Y, Chen F X, *et al*. Weighted gene co-expression network of growth differentiation-related lncRNAs and mRNAs in *Plectropomus leopardus*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(1): 46-58 (in Chinese).

[11] Fei F, Cao S Q, Li W S, *et al*. Effects of spectral on growth, physiology, and growth axis gene expression in *Plectropomus leopardus*[J]. Aquaculture, 2024, 593: 741290.

[12] 赵宁宁, 周邦维, 李勇, 等. 环境光色对工业化养殖豹纹鳃棘鲈幼鱼生长、肤色及生理指标的影响 [J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 976-984.
Zhao N N, Zhou B W, Li Y, *et al*. Effects of light color on growth, skin color, and physiological indices of juvenile *Plectropomus leopardus* in a recirculating aquaculture system[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(4): 976-984 (in Chinese).

[13] 周可欣, 文鑫, 邓成, 等. 豹纹鳃棘鲈体色变异的色素细胞差异分析 [J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1164-1170.
Zhou K X, Wen X, Deng C, *et al*. Analysis of pigment cells difference in body color variation of *Plectropomus leopardus*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(5): 1164-1170 (in Chinese).

[14] 肖婕, 王梦娅, 吴绍轩, 等. 豹纹鳃棘鲈酪氨酸酶 *Tyr* 基因家族的结构特征及组织表达分析 [J]. 中国水产科学, 2022, 29(5): 653-664.
Xiao J, Wang M Y, Wu S X, *et al*. Bioinformatics and expression analysis of tyrosinase protein family genes in leopard coral grouper[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(5): 653-664 (in Chinese).

[15] Wen X, Tang H Z, Zhou M L, *et al*. Genome-wide association study of red skin color in leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) based on genome resequencing[J]. Aquaculture, 2023, 563: 739014.

[16] Jin C F, Wang M Y, Gao X, *et al*. Deciphering scavenger receptors reveals key regulators in the intestine that function in carotenoid coloration of leopard coral groupers (*Plectropomus leopardus*)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129387.

[17] Sun Z B, Liu S Y, Wang X A, *et al*. The research of nicotinamide and β-arbutin on reducing melanin content in the skin of leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*)[J]. Aquacul-

ture, 2025, 595: 741684.

[18] 邓红进, 梁伟兴, 张佳程, 等. 精氨酸对豹纹鳃棘鲈肠道发育和饲料蛋白质利用效率的影响 [J]. 中国饲料, 2024(19): 90-96.
Deng H J, Liang W X, Zhang J C, *et al*. The effect of arginine on intestinal development and dietary protein utilization efficiency of *Plectropomus leopardus*[J]. China Feed, 2024(19): 90-96 (in Chinese).

[19] 周邦维, 李勇, 高婷婷, 等. 主要营养素源对工业化养殖豹纹鳃棘鲈生长、体色和消化吸收的影响 [J]. 动物营养学报, 2014, 26(5): 1387-1401.
Zhou B W, Li Y, Gao T T, *et al*. Effects of main nutrient element and source on growth, body color, digestion and absorption of *Plectropomus leopardus* in industrialized culture[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(5): 1387-1401 (in Chinese).

[20] 尤宏争, 孙志景, 张勤, 等. 豹纹鳃棘鲈肌肉营养成分分析与品质评价 [J]. 水生生物学报, 2014, 38(6): 1168-1172.
You H Z, Sun Z J, Zhang Q, *et al*. Nutritional components analysis and nutritive value evaluation in *Plectropomus leopardus* muscles[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(6): 1168-1172 (in Chinese).

[21] 徐晓丽, 邵蓬, 李灏, 等. 豹纹鳃棘鲈致病性哈维氏弧菌的分离鉴定与系统发育分析 [J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(4): 112-118.
Xu X L, Shao P, Li H, *et al*. Identification and phylogenetic analyses of *Vibrio harveyi* islated from *Plectropomusleo pardus*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(4): 112-118 (in Chinese).

[22] 姚学良, 徐晓丽, 张振奎, 等. 豹纹鳃棘鲈病原鳗利斯顿氏菌的分离鉴定及生物学特性研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(5): 39-45.
Yao X L, Xu X L, Zhang Z K, *et al*. Isolation of pathogenic *Listonella anguillarum* from *Plectropomus leopardus* and its biological characterization[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(5): 39-45 (in Chinese).

[23] 瞿诗雨, 卢昇, 陈松林, 等. 豹纹鳃棘鲈抗哈维氏弧菌遗传参数分析 [J]. 渔业科学进展, 2024, 45(4): 15-23.
Qu S Y, Lu S, Chen S L, *et al*. Estimation of genetic parameters of survival against *Vibrio harveyi* in leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(4): 15-23 (in Chinese).

[24] Lu S, Liu Y, Qu S Y, *et al*. Genomic prediction of survival against *Vibrio harveyi* in leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) using GBLUP, weighted GBLUP, and BayesCπ[J]. Aquaculture, 2023, 572: 739536.

[25] Qu S Y, Lu S, Liu Y, *et al*. Accurate genomic selection using low-density SNP panels preselected by maximum likelihood estimation[J]. Aquaculture, 2024, 579: 740154.

[26] Wang J, Wang S P, Zhang J W, *et al*. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis provides insights into the responses to *Vibrio* infection in *Plectropomus leopardus*[J]. Aquaculture, 2024, 587: 740854.

[27] Zhou Q, Lu S, Liu Y, *et al*. Development of a 20 K SNP array for the leopard coral grouper, *Plectropomus leopardus*[J]. Aquaculture, 2024, 578: 740079.

[28] Wang J W, Yu X F, Wu S X, *et al*. Identification of candidate SNPs and genes associated with resistance to nervous necrosis virus in leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) using GWAS[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2024, 144: 109295.

[29] 王永波, 陈国华, 林彬, 等. 豹纹鳃棘鲈胚胎发育的初步观察 [J]. 海洋科学, 2009, 33(3): 21-26.
Wang Y B, Chen G H, Lin B, *et al*. Artificially induced spawning and embryonic development observation of the *Plectropomus leopardus* Lacépède[J]. Marine Sciences, 2009, 33(3): 21-26 (in Chinese).

[30] 符书源, 王永波, 郑飞, 等. 豹纹鳃棘鲈仔、稚、幼鱼的形态观察 [J]. 热带生物学报, 2010, 1(2): 170-174.
Fu S Y, Wang Y B, Zheng F, *et al*. Observation on the morphology of the larva, juvenile and young fish of *Plectropomus leopardus* Lacépède[J]. Journal of Tropical Organisms, 2010, 1(2): 170-174 (in Chinese).

[31] 张友标, 喻达辉, 黄桂菊. 生态因子对豹纹鳃棘鲈受精卵孵化和仔鱼成活的影响 [J]. 广东农业科学, 2011, 38(10): 102-105.
Zhang Y B, Yu D H, Huang G J. Impacts of ecological factors on hatching of fertilized eggs and survival of larvae of coral grouper *Plectropomus leopardus*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(10): 102-105 (in Chinese).

[32] 杨明秋, 王永波, 符书源, 等. 温度、盐度和 pH 值对豹纹鳃棘鲈早期发育的影响 [J]. 热带生物学报, 2012, 3(2): 104-108.
Yang M Q, Wang Y B, Fu S Y, *et al*. Effects of different temperatures and salinities and pH values on the early development of *Plectropomus leopardus* Lacépède[J]. Journal of Tropical Organisms, 2012, 3(2): 104-108 (in Chinese).

[33] 黄炜坪, 甘松永, 王庆, 等. 黄鹂无齿鲹胚胎及胚后发育特征 [J]. 水产学报, 2024, 48(4): 049110.
Huang W P, Gan S Y, Wang Q, *et al*. Characteristics of the embryonic and post-embryonic development of golden trevally (*Gnathannodon speciosus*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(4): 049110 (in Chinese).

[34] 周玲, 翁文明, 李金亮, 等. 鞍带石斑鱼胚胎发育及仔鱼形态发育、饵料转变的观察研究 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(1): 293-302.
Zhou L, Weng W M, Li J L, *et al*. Studies on embryonic development, morphological development and feed changeover of *Epinephelus lanceolatus* larva[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(1): 293-302 (in Chinese).

[35] 许波涛, 李加儿, 周宏团. 赤点石斑鱼的胚胎和仔鱼形态发育 [J]. 水产学报, 1985, 9(4): 369-374.
Xu B T, Li J E, Zhou H T. Observations on the development of egg and larvae of red spotted grouper[J]. Journal of Fisheries of China, 1985, 9(4): 369-374 (in Chinese).

[36] 宋振鑫, 陈超, 翟介明, 等. 云纹石斑鱼胚胎发育及仔、稚、幼鱼形态观察 [J]. 渔业科学进展, 2012, 33(3): 26-34.
Song Z X, Chen C, Zhai J M, *et al*. Embryonic development and morphological characteristics of larval, juvenile and young kelp bass, *Epinephelus moara*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2012, 33(3): 26-34 (in Chinese).

[37] 周庆杰, 于道德, 高天翔, 等. 七带石斑鱼早期形态发育与仔稚幼鱼培育的观察研究 [J]. 海洋科学, 2014, 38(12): 58-68.
Zhou Q J, Yu D D, Gao T X, *et al*. Studies on the early morphological development and breeding of larval, juvenile and young fish of *Epinephelus septemfasciatus*[J]. Marine Sciences, 2014, 38(12): 58-68 (in Chinese).

[38] 张海发, 刘晓春, 刘付永忠, 等. 斜带石斑鱼胚胎及仔稚幼鱼形态发育 [J]. 中国水产科学, 2006, 13(5): 689-696.
Zhang H F, Liu X C, Liufu Y Z, *et al*. Embryonic development, morphological development of larva, juvenile and young fish of *Epinephelus coioides*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(5): 689-696 (in Chinese).

[39] 林彬, 黄宗文, 骆剑, 等. 棕点石斑鱼胚胎发育的观察 [J]. 海南师范大学学报 (自然科学版), 2010, 23(1): 87-92.
Lin B, Huang Z W, Luo J, *et al*. Embryonic development observation of *Epinephelus fuscoguttatus*[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2010, 23(1): 87-92 (in Chinese).

[40] 陈国华, 张本. 点带石斑鱼亲鱼培育、产卵和孵化的试验研究 [J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 428-435.
Chen G H, Zhang B. Study on parent fish rearing, spawning, and hatching of *Epinephelus malabaricus* (Bloch & Schneider)[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(4): 428-435 (in Chinese).

[41] Liñán-Cabello M A, Medina-Zendejas R, Sánchez-Barajas M, *et al*. Effects of carotenoids and retinol in oocyte maturation of crayfish *Cherax quadrucarinatus*[J]. Aquaculture Research, 2004, 35(9): 905-911.

[42] 田子豪, 陈倩, 刘乐丹, 等. 虾青素在水产养殖中的应用 [J]. 饲料研究, 2023, 46(17): 142-145.
Tian Z H, Chen Q, Liu L D, *et al*. Application of astaxanthin in aquaculture[J]. Feed Research, 2023, 46(17): 142-145 (in Chinese).

[43] Sui L Y, Wu X G, Wille M, *et al*. Effect of dietary soybean lecithin on reproductive performance of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* (H. Milne-Edwards) Broodstock[J]. Aquaculture International, 2009, 17(1): 45-56.

[44] 张国辉, 何瑞国, 张世萍, 等. 维生素 E 对黄鳝繁殖性能的影响 [J]. 水生生物学报, 2007, 31(2): 196-200.
Zhang G H, He R G, Zhang S P, *et al*. Effect of vitamin E in broodstock diet on reproductive performance of *Monopterus albus*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007, 31(2): 196-200 (in Chinese).

[45] 张颖, 孙慧武, 徐伟, 等. 饲料卵磷脂对施氏鲟血清卵黄蛋白原、卵径及性类固醇激素水平的影响 [J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 783-790.
Zhang Y, Sun H W, Xu W, *et al*. Effects of phospholipids content in reserved brood diets on egg diameter performance, plasma sex steroids and vitellogenin levels in Amur sturgeon *Acipenser schrenckii*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 783-790 (in Chinese).

[46] Fernández-Palacios H, Izquierdo M S, Gonzalez M, *et al*. Combined effect of dietary *α*-tocopherol and *n*-3 HUFA on egg quality of gilthead seabream (*Sparus auratus*) broodstock[J]. Aquaculture, 1998, 161(1-4): 475-477.

[47] 张梦淇, 陈超, 李炎璐, 等. 驼背鲈 (*Chromileptes altivelis*) 的胚胎发育及仔、稚、幼鱼形态观察 [J]. 渔业科学进展, 2014, 35(5): 145-153.
Zhang M Q, Chen C, Li Y L, *et al*. Developmental and morphological characteristics of embryo, larval, juvenile, and young fish, *Chromileptes altivelis*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(5): 145-153 (in Chinese).

[48] Kupren K, Mamcarz A, Kucharczyk D, *et al*. Influence of water temperature on eggs incubation time and embryonic development of fish from genus *Leuciscus*[J]. Polish Journal of Natural Science, 2008, 23(2): 461-481.

[49] Martell D J, Kieffer J D, Trippel E A. Effects of temperature during early life history on embryonic and larval development and growth in haddock[J]. Journal of Fish Biology, 2005, 66(6): 1558-1575.

[50] Ware D M. Relation between egg size, growth, and natural mortality of larval fish[J]. Journal of the Fisheries Research Board

of Canada, 1975, 32(12): 2503-2512.

[51] Bonisławska M, Formicki K, Winnicki A. Size of eggs and duration of embryogenesis in fishes[J]. Acta Ichthyologica et Piscatoria, 2000, 30(1): 61-71.

[52] 成美玲, 田永胜, 吴玉萍, 等. 鞍带石斑鱼 (♀)×蓝身大斑石斑鱼 (♂) 杂交 F1 代变态发育和生长特征分析 [J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 52-62.

Cheng M L, Tian Y S, Wu Y P, *et al*. Analysis of metamorphosis development and growth characteristics of hybrid offspring of *Epinephelus lanceolatus* ♀×*Epinephelus. tukula* ♂[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(8): 52-62 (in Chinese).

[53] 陈超, 孔祥迪, 李炎璐, 等. 棕点石斑鱼 (♀)×鞍带石斑鱼 (♂) 杂交子代胚胎及仔稚幼鱼发育的跟踪观察 [J]. 渔业科学进展, 2014, 35(5): 135-144.

Chen C, Kong X D, Li Y L, *et al*. Embryonic and morphological development in the larva, juvenile, and young stages of *Epinephelus fuscoguttatus* (♀) × *E. lanceolatus* (♂)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(5): 135-144 (in Chinese).

[54] 李振通, 田永胜, 成美玲, 等. 驼背鲈 (♀)×蓝身大斑石斑鱼 (♂) 杂交子代发育及生长比较 [J]. 南方水产科学, 2020, 16(1): 17-26.

Li Z T, Tian Y S, Cheng M L, *et al*. Comparison of development and growth of hybrid *Chromileptes altivelis* (♀) × *Epinephelus tukula* (♂)[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(1): 17-26 (in Chinese).

[55] 李子奇, 成美玲, 吴玉萍, 等. 鞍带石斑鱼 (♀)×云纹石斑鱼 (♂) 杂交后代早期发育及正反交后代生长特性 [J]. 水产学报, 2020, 44(3): 436-446.

Li Z Q, Cheng M L, Wu Y P, *et al*. Early development of hybrids of *Epinephelus lanceolatus*(♀) × *E. moara*(♂) and growth characteristics of reciprocal crosses[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(3): 436-446 (in Chinese).

[56] Yang S G, Hur S W, Ji S C, *et al*. Morphological development of embryo, larvae and juvenile in yellowtail kingfish, *Seriola lalandi*[J]. Development & Reproduction, 2016, 20(2): 131-140.

[57] 李振通, 成美玲, 田永胜, 等. 杂交种“云龙石斑鱼”与亲本的形态差异分析 [J]. 渔业科学进展, 2019, 40(4): 73-83.

Li Z T, Cheng M L, Tian Y S, *et al*. Analysis of the morphological differences between hybrid “*Epinephelus moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂” and its parents[J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(4): 73-83 (in Chinese).

[58] 柳学周, 徐永江, 王妍妍, 等. 条石鲷的早期生长发育特征 [J]. 动物学报, 2008, 54(2): 332-341.

Liu X Z, Xu Y J, Wang Y Y, *et al*. Characters of development and growth of early life stages of the rock bream *Oplegnathus fasciatus*[J]. Acta Zoologica Sinica, 2008, 54(2): 332-341 (in Chinese).

[59] 徐永江, 张正荣, 柳学周, 等. 黄条鰤早期生长发育特征 [J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 172-182.

Xu Y J, Zhang Z R, Liu X Z, *et al*. Morphometric characteristics of the embryonic and postembryonic development of yellowtail kingfish, *Seriola aureovittata*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(1): 172-182 (in Chinese).

Industrial indoor breeding, early growth and development characteristics of *Plectropomus leopardus*

LI Wensheng [1], GUO Xiaoli [2,3], YANG Chuanjun [4], HE Xinlei [4], PANG Zunfang [4], MA Wenhui [4], ZHANG Yingguang [4], SUN Fangfang [4], ZHANG Jiawei [4], YUAN Songzhu [4], ZHANG Quanqi [1*], CHEN Songlin [2*]

(1. *Fisheries College*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266071, *China*;
2. *State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods*, *Yellow Sea Fisheries Research Institute*, *Chinese Academy of Fishery Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*;
3. *College of Life Sciences*, *Qingdao University*, *Qingdao* 266071, *China*;
4. *Laizhou Mingbo Aquatic Co.*, *Ltd.*, *Yantai* 261418, *China*)

Abstract: This study accomplished the fully industrialized indoor breeding of *Plectropomus leopardus* and investigated the characteristics and patterns of embryo and early post embryonic development of *P. leopardus* in the north indoor factory workshops. This study used microscopic imaging and morphological measurement observation methods to track the early developmental processes and characteristics of fertilized eggs of *P. leopardus* obtained through indoor factory cultivation and natural reproduction. We found the zygotes were transparent floating spherical eggs with an average diameter of (887.08±10.28) μm and a single oil bulb with an average diameter of (166.60±10.81) μm. Embryonic development experience 8 classical developmental stages, including fertilized egg stage, blastodisc stage, cleavage stage, blastula stage, gastrula stage, neurula stage, organo-forming stage, and hatching stage, subsequently divided into 27 stages. The fertilized eggs were hatched at 27 h 13 min after fertilization followed by the larval stage. The total length of the newly hatched larvae was (2.156±0.281) mm. According to the absorption of yolk sac, larval stage was further divided into pre-larval stage [0-3 (days post hatching, dph), not complete absorption of yolk sac] and post-larval stage (4-30 dph, complete absorption of yolk sac). The oil globule disappeared at 4 dph and the swimming bladder appeared at 8 dph. At 28 dph, the total length (15.32±1.98) mm, the length of the second dorsal fin spine (8.04±1.06) mm, and the length of the first pelvic fin (5.97±1.37) mm, extended to the maximum value. Afterwards, the length began to shorten. When the dorsal fin spine contracted to the minimum value (3.26±1.13) mm, all kinds of fins were fully formed, scales began to appear and body color began to deepen, marking the entry into the juvenile stage. At 71 dph, entering the adult fish, the total length (40.21±1.33) mm，the body shape was similar to that of the adult fish and the whole body was covered with scales and baby blue spots. For the first time, this study achieved the natural reproduction spawn and artificial cultivation of *P. leopardus* in the northern industrial workshop, revealing its early growth and development characteristics and pattern,laying a theoretical and technical basis for the the full factory batch cultivation of leopard coral grouper seedlings.

Key words: *Plectropomus leopardus*; fertilized egg; embryonic development; post-embryonic development

Corresponding authors: ZHANG Quanqi. E-mail: qzhang@ouc.edu.cn;
CHEN Songlin. E-mail: chensl@ysfri.ac.cn

Funding projects: National Major Project for Biological Breeding (2023ZD0405502); Key Research and Development Project of Shandong Province (2023ZLYS02); Innovation Team Project of Chinese Academy of Fishery Sciences (2023-TD-20); Shandong Taishan Scholar Climbing Project; Hainan Province Science and Technology Special Fund (ZDYF2024XDNY278); Academician Chen Songlin's Workstation of Hainan Province (YSGZZ2023001); Innovation Platform for Academicians of Hainan Province (YSPTZX202402)