



宋煜, 卢昇, 李文升, 等. 豹纹鳃棘鲈人工繁育养殖及育种技术研究进展与展望 [J]. 水产学报, 2026, 50(5): 059101.
Song Y, Lu S, Li W S, et al. Advances and prospects in artificial breeding, farming, and breeding technology of the leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(5): 059101 (in Chinese).

· 综述 ·

豹纹鳃棘鲈人工繁育养殖及育种技术研究进展与展望

宋煜^{1,2}, 卢昇¹, 李文升³, 符书源⁴, 周波⁵,
郭晓丽^{1,2}, 白泽民⁶, 陈松林^{1*}

- (1. 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;
- 2. 青岛大学生命科学学院, 山东 青岛 266071;
- 3. 莱州明波水产有限公司, 山东 莱州 261400;
- 4. 海南省海洋与渔业科学院, 海南海口 571126;
- 5. 万宁林兰水产养殖有限公司, 海南 万宁 571528;
- 6. 三亚崖州湾农渔业发展有限公司, 海南 三亚 572024)

摘要: 豹纹鳃棘鲈是我国具有极高经济与观赏价值的名贵海水鱼类, 其野生资源受过度捕捞与栖息地破坏的影响而日趋衰退, 人工繁育与养殖成为资源可持续利用的关键途径。本文首先介绍了豹纹鳃棘鲈的生物学特性, 包括资源分布、栖息环境与繁殖习性等; 其次, 重点总结了近几年在人工繁殖和工厂化育苗与养殖等方面取得的重要进展, 包括豹纹鳃棘鲈亲鱼培育、人工催产、育苗模式、胚胎发育过程及成鱼养殖模式等技术内容; 第三, 介绍了豹纹鳃棘鲈鱼苗的生理特征和生态习性, 包括温度、盐度和光照对胚胎发育和苗种培育的影响; 第四, 概述了最近几年在豹纹鳃棘鲈基因组精细图谱构建、育种技术创新等方面取得的重要进展, 包括基因组精细图谱构建、基因芯片研发及全基因组选择等技术的建立等; 最后, 针对当前豹纹鳃棘鲈人工繁育和养殖中存在的瓶颈问题, 提出未来应在优化全工厂化繁育技术、研发工厂化智能化养殖工艺、建立基因组辅助育种技术以及培育抗病高产新品种等方向加强研究, 重点攻关, 实现抗病高产新品种培育的突破, 为豹纹鳃棘鲈养殖产业的高质量发展提供理论基础和技术指导。

关键词: 豹纹鳃棘鲈; 人工繁育技术; 养殖模式; 分子育种技术

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

豹纹鳃棘鲈 (*Plectropomus leopardus*) 隶属于鲈形目 (Perciformes) 鲈科 (Serranidae) 鳃棘鲈属 (*Plectropomus*), 俗称东星斑、七星斑, 是一类具有重要经济价值的海洋鱼类。其体色鲜红艳丽,

兼具高观赏性与优质食用品质, 在高端海鲜消费领域和观赏鱼市场均占据重要地位 (图 1)。作为热带珊瑚礁生态系统的代表性物种, 豹纹鳃棘鲈野生群体广泛分布于西太平洋至印度洋海域, 包括

收稿日期: 2026-01-04 修回日期: 2026-01-26

资助项目: 国家生物育种重大项目 (2023ZD0405502); 海南省陈松林院士工作站项目 (YSGZZ2023001); 海南省柔性引才创新平台项目 (YSPTZX202402); 山东省重点研发计划 (2023ZLYS02); 中国水产科学研究院创新团队项目 (2023-TD-23); 海南省科技专项 (ZDYF2024XDNY278); 山东省泰山学者攀登计划项目

第一作者: 宋煜, 从事水产遗传育种研究, E-mail: sy302969975@163.com

通信作者: 陈松林, 院士, 研究员, 从事水产生物技术及遗传育种研究, E-mail: chensl@ysfri.ac.cn



日本南部、澳大利亚、斐济、中国华南沿海等区域,是典型的高价值海洋渔业资源^[1]。然而,受过度捕捞及珊瑚礁栖息地破坏等多重压力影响,豹纹鳃棘鲷野生资源量呈显著下降趋势。豹纹鳃棘鲷已被国际自然保护联盟(IUCN)评估为“近危(NT)”物种,其资源可持续利用问题亟待关注。



图 1 豹纹鳃棘鲷

Fig. 1 Leopard coral grouper (*P. leopardus*)

与此同时,近十余年来,随着市场需求持续增长及人工繁育技术取得突破,豹纹鳃棘鲷的养殖产业规模迅速扩大,已成为重要的高价值海水养殖品种之一。然而,在野生资源持续衰退与养殖规模快速扩张的双重背景下,养殖产业面临一系列瓶颈,制约其进一步高质量发展。具体表现为:在繁育层面,亲鱼产卵授精主要在海上网箱进行,收集受精卵后在外塘孵化育苗,受天气影响大,育苗成活率很低,难以实现人工环境下同步可控产卵,导致家系构建困难,严重限制了传统与分子育种技术的应用;在养殖层面,工厂化育苗过程中仔稚鱼阶段成活率波动大,其背后的营养需求、微环境调控及病害发生机制尚未明确;在种业层面,生长速率慢和病害易感性高仍是制约效益提升的关键因子,而相应的抗病高产良种十分匮乏。针对上述问题,我国水产科技工作者在过去二十年开展了系统性研究。这些研究涵盖了对豹纹鳃棘鲷生理特征与繁殖习性的观察,以及对人工催产、工厂化育苗和成鱼养殖技术的探索。同时,在分子育种领域也取得了重要进展,包括完成全基因组测序与精细图谱绘制、研制抗病育种基因芯片、以及研发基因组选择育种技术。为系统总结这些成果,厘清现存问题与短板,并为新品种培育与产业高质量发展提供支撑,本研究首次系统综述了豹纹鳃棘鲷的生活习性、生态适应性、亲鱼繁殖和仔稚鱼发育特点,总结了豹纹鳃棘鲷苗种繁育、成鱼养殖技术创新的重要进展,介绍了在豹纹鳃棘鲷基因组精细图谱绘制和分子育种等方面取得的成果,梳理了现阶段存在的问题和短板,提出了未来的重点研究方向和

任务,旨在为豹纹鳃棘鲷种质资源保护、苗种工厂化批量化繁育、良种培育及健康养殖提供理论参考。

1 豹纹鳃棘鲷生物学特征

1.1 资源分布和栖息环境

豹纹鳃棘鲷栖息地偏好珊瑚生长良好的环境,如潟湖、深海礁区以及外礁斜坡,常活动于岩礁或珊瑚礁丛中。豹纹鳃棘鲷具有一定的活动范围,通常仅在繁殖期进行短距离洄游,并聚集到礁区进行产卵。豹纹鳃棘鲷生性凶猛且贪食,成鱼以鱼类为主要食物来源,偶捕食甲壳类,而幼鱼则表现出高度底栖性和警觉性,生活于潟湖底部或珊瑚碎屑堆中,摄食小鱼、乌贼及虾类等小型动物^[2]。行为模式上,其偏好透光性较好的海域,白天活跃觅食,夜间则安静躲避于礁岩下休息,体现出明显的昼夜节律。环境适应性方面,豹纹鳃棘鲷是一种广温广盐性鱼类,这支撑了其在多种珊瑚礁生境中的生存和繁殖成功。整体而言,其生态特征与繁殖行为紧密关联,确保了种群在热带礁区的可持续性。

在豹纹鳃棘鲷分布广泛而个体活动范围相对有限的生态学背景下,现有证据表明在分布区内不同地理单元之间的群体存在遗传差异。不同海区的豹纹鳃棘鲷种群间出现一定程度的遗传分化,并且在相邻或地理距离较近的海域之间,也可能形成可区分的遗传分群^[3-4]。除野生群体的地理分化外,针对海南地区多个豹纹鳃棘鲷养殖群体的研究显示,养殖群体总体具有较高的遗传多样性,但群体内部因亲本来源混合、繁育管理与选择压力等因素而形成显著的遗传分层,群体内可划分为多个遗传簇,且簇间分化程度不一^[5]。豹纹鳃棘鲷较为丰富的遗传多样性及其遗传分化格局,为其资源保护和人工繁育提供了重要的遗传基础。

1.2 豹纹鳃棘鲷性别分化与繁殖生态

石斑鱼作为一类具有重要经济价值的海水鱼类,通常表现为雌性先熟型雌雄同体的特征^[6]。这一复杂的性别系统受到遗传背景、内分泌网络与环境因子的多层次调控。经典的发育模式表现为孵化后性腺处于未分化阶段,随后在雌激素信号主导下,卵巢分化关键基因如 *cyp19a1a* 和 *foxl2* 上调表达,促进卵巢腔形成与卵母细胞发生,从

而完成功能性雌性分化。性成熟并参与繁殖后, 部分个体启动性别逆转。这一过程伴随着脑垂体性腺轴的功能重塑, 具体表现为卵巢芳香化酶活性下降、11 酮基睾酮等雄激素水平升高, 并激活 *dmrt1* 和 *sox9* 等雄性通路基因, 最终导致卵巢组织退化与功能性精巢形成。而近年来关于豹纹鳃棘鲈的研究提示其发育路径可能具有特异性。Ding 等^[7] 对豹纹鳃棘鲈养殖群体的系统观察显示, 约 15 月龄个体的性腺已出现明显的双向分化, 可区分为偏雌型双性腺与偏雄型双性腺。至 3 龄时, 群体中已可清晰分辨出结构完整且均达到性成熟的卵巢个体与精巢个体。这一现象提示豹纹鳃棘鲈可能存在早期双性腺共建且雌雄分化同步推进的并行发育路径, 即从双性腺阶段可直接分化为成熟的单一性腺, 而非必须经历先雌后雄的单一路径。尽管该模式的普遍性仍需在自然种群及不同环境条件下进一步验证, 但其对人工繁殖实践已具有直接启示。在亲鱼培育早期, 应当利用分子标记等方法进行精准性别鉴定, 以便尽早识别潜在的偏雄型个体, 从而避免因性别误判导致有效雄鱼比例不足, 并进一步优化催产时机与配组策略。在分子调控层面, 豹纹鳃棘鲈的性别分化呈现出多基因协同的特征。Gao 等^[8] 通过多组学分析结果表明, 雄性偏向的基因模块显著富集于减数分裂、纤毛组装与精子运动等相关通路, 而雌性偏向模块则与卵黄生成、类固醇激素合成及卵母细胞成熟等过程密切相关。全基因组关联分析进一步鉴定出若干与性别分化显著相关的染色体区域, 并筛选出包括 *taf7*、*ddx6*、*sgk1* 和 *esr1* 在内的一系列候选基因。这些基因的功能覆盖了从原始生殖细胞维持、性腺体细胞分化到性激素合成与信号转导等关键发育环节。这种多位点且多通路的复杂调控格局, 不仅可能解释该物种性别发育路径的可塑性, 也为遗传育种与性别控制提供了潜在的分子靶点。因此, 豹纹鳃棘鲈在总体上仍符合雌性先熟型雌雄同体的基本框架, 但在个体发育层面可能呈现出多路径分化与同步成熟的特征。除性腺形成的内在机制, 豹纹鳃棘鲈的繁殖活动还显著受外部环境因子驱动, 尤其与水温及月相周期密切相关^[9]。当水温升至约 24~25 °C 时, 豹纹鳃棘鲈的性腺由静止期逐渐转入活跃发育阶段。在适宜条件下, 雌鱼体内 17 β -雌二醇 (E_2) 水平通常上升, 该激素可促进肝脏合成卵黄蛋白

原, 并支持卵母细胞的发育与成熟, 从而为卵巢发育提供必要的内分泌支持。雄鱼体内 11-酮睾酮 (11-KT) 水平在繁殖季节相较低温期显著升高, 有助于促进精子发生并维持精巢功能。若水温持续高于最适范围, 可能扰乱类固醇激素的合成、分泌与调控, 并抑制配子发生过程, 导致繁殖成功率下降。此外, 豹纹鳃棘鲈繁殖活动呈现与月相同步的节律, 新月前后雌鱼性腺指数、卵母细胞大小以及血浆中 E_2 与睾酮等激素水平均呈现规律性峰值^[10]。在繁殖期内, 豹纹鳃棘鲈有明显的聚群行为, 群体密度可达 50~80 尾/100 m²。其产卵与受精主要发生于每日黄昏阶段, 并整体呈现“连续产卵-间歇恢复”的分批繁殖模式。当水温降至 24 °C 以下时, 产卵活动逐渐停止, 性腺进入休止期并出现退化^[11-12]。

2 豹纹鳃棘鲈人工繁育与养殖

2.1 亲鱼选择及人工催产

近年来, 随着对豹纹鳃棘鲈人工繁育研究的深入, 海南、山东等多个地区的相关繁育技术日趋成熟。研究人员对豹纹鳃棘鲈人工育苗技术先后进行了总结和优化, 并归纳为亲鱼的选择及培育、人工催产、产卵与受精卵的采集、孵化和种苗培育 5 个主要步骤^[13-14]。亲鱼通常选择体质健壮、无病无伤的野生个体或人工养殖个体, 雌雄比约为 1 : 1 ~ 2 : 1。在繁殖前的准备阶段, 将亲鱼转移至产卵场地并采用强化喂养方法促使亲鱼性腺进一步发育成熟。亲鱼饵料以新鲜鱿鱼及野杂鱼为主, 投喂量为鱼体重的 3%~4%, 并添加由卵磷脂、虾青素和复合维生素组成的营养强化剂以增加亲鱼营养^[15-16]。豹纹鳃棘鲈等珊瑚礁鱼类在自然环境中虽可自行繁殖, 但产卵时间分散、繁殖效率较低。因此, 人工催产对豹纹鳃棘鲈大规模繁育显得尤为重要。当水温升高至 24 °C 以上时, 挑选腹部膨胀柔软、显现性腺轮廓的亲鱼, 通过注射绒毛膜促性腺激素 (HCG)、促黄体生成素释放激素 (LHRH-A₂ 或 LHRH-A₃) 等激素进行催产, 注射剂量依据亲鱼体重及性腺发育程度进行调整。在豹纹鳃棘鲈人工繁育过程中, 催产技术不稳定是制约规模化繁育的一大限制。现有激素诱导方案的剂量效应存在个体差异, 催产率与受精率波动较大, 缺乏精准化的激素诱导或生态

因子协同调控策略。

2.2 胚胎发育历程及关键环境因子调控

豹纹鳃棘鲈的受精卵为浮性卵，呈透明圆球状，平均卵径约 816.5~887.1 μm ，具单个油球，卵质均匀分布。其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^[17]。整个发育过程受温度、盐度等多种环境因素的调控，适宜的环境条件是实现高孵化率与低畸形率的关键保障。具体而言，温度升高通常会缩短胚胎早期发育时间，但可能抑制后续生长，并引发氧化应激及行为与生理异常，如活动减少、心率下降^[18]。光照条件通过影响抗氧化状态和肠道微生物群落等途径调节发育稳态，其中红白光照射易导致较高的畸形率，而蓝光的影响相对温和^[19-20]。盐度胁迫则会破坏渗透平衡，导致存活率下降、畸形增多以及能量代谢负担加重。这些环境因素常存在交互作用，共同影响豹纹鳃棘鲈胚胎的生长发育过程。研究表明，孵化的适宜温度范围为 24~30 $^{\circ}\text{C}$ ，最适温度为 26 $^{\circ}\text{C}$ 。当孵化水温低于 18 $^{\circ}\text{C}$ 或高于 33 $^{\circ}\text{C}$ 时，其孵化率下降且畸形率升高。而盐度的适宜范围在 25~30，盐度异常会导致胚胎孵化率下降^[21-22]。因此，在水产养殖实践中，需要通过精准控制温度、盐度和光照条件，并配合亲鱼营养调控，才能为豹纹鳃棘鲈胚胎发育创造最佳环境，从而提高孵化成功率和苗种质量。

2.3 苗种培育

仔鱼培育 豹纹鳃棘鲈的仔鱼期可分为早期仔鱼和晚期仔鱼两个阶段。早期仔鱼阶段自初孵仔鱼起至卵黄囊完全消失；晚期仔鱼阶段则从卵黄囊完全消失开始，至鳞片出现为止。此阶段生长速率加快，第二背鳍棘和腹鳍棘开始形成，个体进入变态期，组织与器官逐步分化。仔鱼期作为鱼类个体发育的关键窗口期，其营养方式及形态特征变化显著，并且其存活与生长性能高度依赖环境因子的精细调控，这一规律在豹纹鳃棘鲈等石斑鱼品种的工厂化育苗中体现尤为显著。国内外研究人员围绕其育苗核心需求，系统解析了理化因子、开口饵料适配性及光照强度等关键因素的作用机制。育苗阶段水体环境因子通过内分泌调控、代谢调节与渗透稳态维持等多重途径共同影响仔鱼的生长与存活。Canosa 等^[23]指出，

温度升高通常可刺激鱼类生长激素 (GH) 与胰岛素样生长因子 I (IGF-I) 释放从而促进鱼体生长，但该促进效应具有物种特异性。温度也会通过改变代谢率与能量分配间接调节生长表现。在适宜温度范围内适度升温可提高摄食率并促进生长，而极端或长期高温则可能抑制摄食与生长。因此，育苗水体温度应尽可能稳定维持在 24~28 $^{\circ}\text{C}$ 的适宜区间，以主导仔鱼代谢速率并保障 GH/IGF-I 信号与能量分配协同促生长。若发生温度骤变，可能突破生理耐受阈值并诱发酶活性紊乱、免疫抑制等不可逆应激，最终导致仔鱼大量死亡^[24]。盐度主要通过内分泌调控与渗透压稳态两条路径影响生长与存活。适宜盐度可促进生长轴相关内分泌活动并改善能量分配，从而间接增强摄食行为并提高饲料转化效率。盐度也通过维持渗透压平衡直接影响活动能力与生理负荷，其适宜范围通常为 15~35。当盐度偏离最适区间时，渗透调节成本上升并表现为生长受抑与存活率下降，且盐度急剧变化易引发强烈应激反应，出现体色变白甚至死亡等不良结局。溶解氧不足同样显著抑制生长与摄食。以尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 为例，低溶解氧环境不仅直接降低摄食量和生长率，还会促进皮质醇释放并激活应激轴，进而干扰 GH 信号通路并诱发 GH 抵抗，迫使机体将能量由生长重分配至维持生存需求，最终加剧生长抑制^[20]。光周期作为调控鱼类生物钟的核心环境信号，可通过影响褪黑激素合成协调生理节律。研究表明，自然光周期循环有助于优化繁殖性能并提高孵化率，而异常光周期可能诱发视网膜损伤并增强机体应激反应^[25]。

在营养供给方面，开口饵料的粒径与形态匹配是决定仔鱼摄食效率与成活率的重要因素。研究人员基于仔鱼生理特性发现，豹纹鳃棘鲈仔鱼口径仅 (0.24±0.05) mm，显著小于其他石斑鱼品种，因此对开口饵料适口性要求更为严苛，饵料大小与形态可直接限制其摄食效率并影响成活率^[26]。实验结果表明，以直径 40~60 μm 的桡足类无节幼体等浮游动物作为开口饵料时，仔鱼成活率显著高于摄食轮虫或牡蛎受精卵的群体^[27]。与轮虫相比，桡足类在营养组成与消化生理支持方面优势更为突出。桡足类天然富含高不饱和脂肪酸 (HUFA)，其中二十二碳六烯酸 (DHA) 和二十碳五烯酸 (EPA) 含量较高，其脂肪酸谱更契合仔鱼生

长发育需求。轮虫的 HUFA 含量通常偏低, 投喂前往往依赖外源营养强化补充, 但强化效果受工艺水平与标准化程度影响, 强化后营养含量易出现波动, 从而影响仔鱼摄食与生长表现。此外, 桡足类可提供外源消化酶并刺激仔鱼自身消化酶活性及消化系统发育, 进而系统性提升对营养物质的消化吸收能力^[28-29]。

综上, 豹纹鳃棘鲈仔鱼期的存活与发育是多因子协同作用的结果, 其中温度、盐度稳定性、饵料适口性及光照参数尤为关键, 这些发现既阐明了其早期发育的生理需求, 也为工厂化育苗的环境管理与饵料选择提供了理论依据。

稚鱼培育 稚鱼期是豹纹鳃棘鲈从浮游生活向底栖集群生活过渡的关键阶段, 其形态、生理和行为均发生剧烈转变。此阶段以第二背鳍棘与腹鳍棘伸长与收缩、鳞片发育完善、体表黑色素斑点增多以及栖息习性从水体中上层转向底层为显著标志。这些形态和行为转变伴随着巨大的生理能耗。在营养方面, 摄食策略从被动摄食浮游动物转向主动捕食, 且为满足鳍条、鳞片等组织的快速发育, 对蛋白质的需求量激增。此时, 若饵料转换不当或营养成分失衡, 将直接导致结构性营养素缺乏, 表现为鳍棘收缩异常、体色暗淡及生长迟缓。研究表明, 维生素 C、维生素 E 和硒等矿物质可增强鱼体应激抵抗力和免疫力, 减少稚鱼损伤^[30-31]。同时, 尽管稚鱼的渗透调节和代谢能力较仔鱼期增强, 但其免疫系统尚未完全成熟, 对环境波动的耐受性依然有限^[32-33]。温度低于 18 ℃ 或高于 30 ℃ 时生长抑制显著, 温度骤变会持续抑制其消化酶活性与免疫功能, 导致生长停滞甚至死亡^[21]。而盐度突变会导致稚鱼耗氧率和排氨率升高, 反映代谢底物转向蛋白质和脂肪以维持渗透平衡^[22]。行为学上, 其向底栖和集群习性的转变, 是减少被捕食压力和优化觅食效率的生态适应策略, 因此在养殖环境中提供遮蔽物, 能有效降低因领域争斗引发的应激损伤。水质管理需通过每日换水和定期清底来严格控制氨氮等代谢废物的积累, 避免其损害正在发育的鳃组织, 影响呼吸与渗透平衡。故此阶段的管理核心在于通过渐进式的营养转换、稳定的环境参数以及模拟自然生态的设计, 为稚鱼剧烈的形态生理转型提供缓冲, 保障其顺利过渡。

幼鱼培育 幼鱼期豹纹鳃棘鲈的体型、器

官功能和生态习性已趋近成鱼, 其体表鳞片长齐, 生长速率明显加快。幼鱼体色转为微粉红并出现浅蓝色斑点, 侧线系统发育完整, 集群性强, 抢食活跃, 但对外界应激因子仍表现出较高的敏感性。此阶段个体的快速生长代谢对营养供给的质量提出了更高要求。投喂高蛋白、低脂肪的配合饲料是其高速生长的基础, 而添加虾青素、卵磷脂及复合维生素等添加剂, 不仅能促进红色素沉积以改善商业体色, 更能通过清除自由基增强机体抗应激能力。并且卵磷脂和维生素共同参与细胞膜构建和免疫调节, 旨在预防营养性疾病。研究表明, 在 25~30 盐度下, 幼鱼肌肉的粗蛋白质含量可达 20.08%, 而粗脂肪维持较低水平, 这印证了稳定环境与优质营养协同作用对其品质形成的重要性^[21]。在环境因子方面, 光照的调控作用呈现出多维度影响。适宜的光照强度 (50~300 lx) 最有利于体长体重增长, 而较强光照 (300~700 lx) 则能特异性刺激红色素的生物合成, 其机制可能与光感受器激活内分泌通路有关^[33]。需要注意的是, 过高的光照强度 (>2 000 lx) 反而会产生抑制效应, 不仅影响正常生长, 还可能诱发应激反应^[34]。16L: 8D 的光周期被证实能有效增强胃蛋白酶活性并改善免疫指标, 说明光照节律已深度参与其消化与免疫系统的生理调控。尽管其对盐度、温度等环境因子的适应范围较前两阶段更广, 但环境的稳定性仍是避免慢性应激、维持正常摄食行为和免疫功能的关键。因此, 幼鱼期的管理是一项集营养精准投喂、环境稳态维持、免疫预防增强及行为需求满足于一体的综合性系统工程, 通过多维度精准调控方可实现健康、高效养殖。

2.4 育苗模式

外塘生态育苗本质上是一种高度依赖自然生态系统的传统培育方式。该模式通过利用池塘水体特有的物质循环和能量流动特性, 构建以浮游生物群落为核心的饵料生产系统。其技术核心在于通过益生菌接种和有机肥施用, 定向培育轮虫、桡足类等天然饵料生物链, 建立自我维持的微型生态系统 (图 2)^[35]。这种基于生态调控的方法在海南、广东等适宜气候区表现出显著优势, 基础设施投资成本较低, 且培育的苗种具有更强的环境适应能力。特别是在仔鱼开口期, 天然饵料的营养完整性和生物活性物质对消化系统发育具有不可替代的促进作用。然而, 该模式存在难以克服

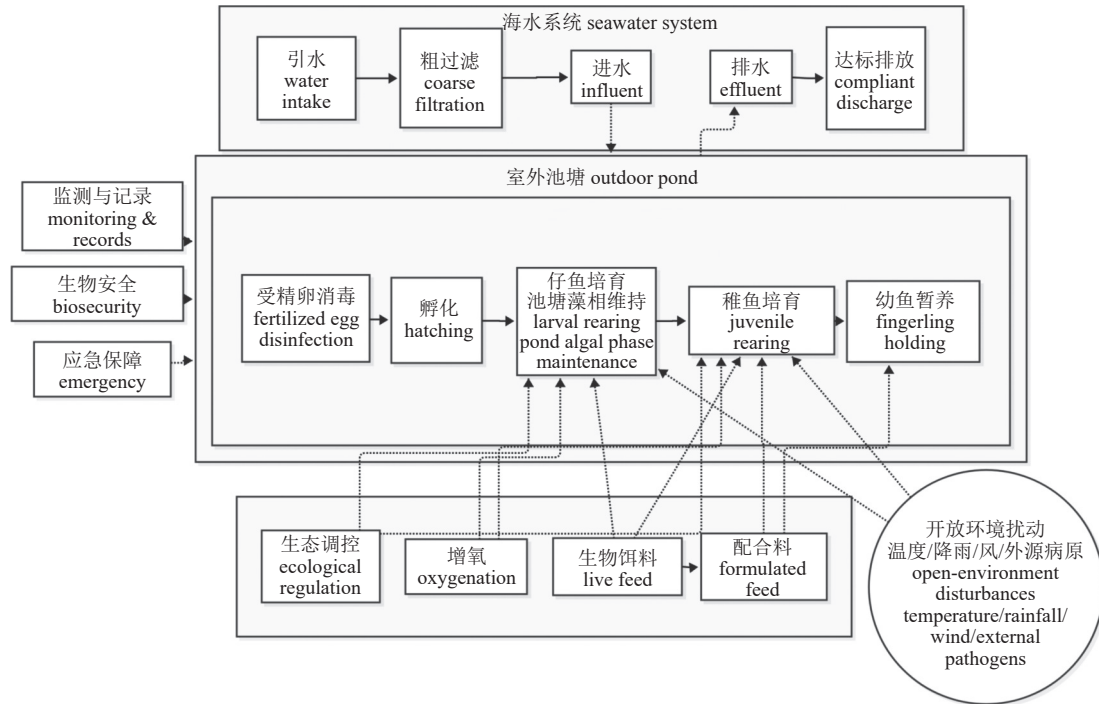


图 2 外塘生态育苗系统结构示意图

Fig. 2 Conceptual schematic of an outdoor pond-based ecological nursery system

的系统性缺陷。其生态脆弱性主要表现为 3 个层面：首先，水体热容量有限导致温度缓冲能力不足，24 h 内温差过大会引发仔鱼大规模死亡。其次，饵料生物种群动态受多因素制约，轮虫、桡足类密度波动过大导致营养供应断档。第三，开放系统无法建立有效生物安全屏障，弧菌等条件致病菌的传播风险持续存在、暴雨导致池水盐度下降引起鱼苗死亡。这些固有缺陷使得该模式呈现出典型的“低投入-高风险”特征，严重制约产业的高质量发展。

针对外塘育苗的自然依赖瓶颈，室内工厂化育苗近年在集成化、精准化方向取得突破，通过构建人工可控环境实现苗种批量化生产。该模式以室内水泥池或玻璃钢池为核心载体，配套增氧系统、温控装置、水质监测设备，可精准模拟鱼类不同发育阶段的最适生态参数，为仔鱼提供稳定生长条件，彻底摆脱台风、寒潮等天气干扰。同时，封闭环境配合紫外线消毒、臭氧杀菌等技术，可有效阻隔弧菌、病毒等病原微生物侵入，显著降低病害发生率(图 3)。这种全方位控制使育苗成功率提升至传统模式的 2~3 倍，且实现周年连续生产。近年来的产业化实践验证了该模式的技术可行性(表 1)。2023 年，中国水产科学研究

院黄海水产研究所联合万宁林兰水产养殖公司在其工厂化车间首次实现了豹纹鳃棘鲈苗种的批量化培育，当年培育鱼苗 330 万尾，2024 年进一步培育 320 万尾，均通过现场验收。2024—2025 年，莱州明波水产有限公司与黄海水产研究所合作，成功在北方工厂化车间通过流水培育实现亲鱼在室内水泥池中批量自然产卵，并于 2025 年在大水体水泥池培育出鱼苗 300 万尾，通过现场验收。这些成果标志着豹纹鳃棘鲈在全工厂化批量育苗方面取得突破性进展，首次在工厂化车间内实现了从胚胎孵化到苗种培育的全过程工厂化生产，填补了该鱼种在工厂化室内自然产卵与批量化育苗技术上的研究空白，为豹纹鳃棘鲈苗种的稳定供应奠定了坚实的技术基础^[14]。

总体来看，豹纹鳃棘鲈育苗技术的发展呈现出由依赖自然生态过程的外塘生态育苗向高度工程化、可控化的室内工厂化育苗逐步转变的趋势。外塘生态育苗对气候条件、生态稳定性及生物安全的高度依赖，使得育苗成功率和生产规模难以稳定控制，已难以满足现代水产养殖对标准化和规模化的需求。相比之下，室内工厂化育苗通过构建人工可控环境，实现了对温度、水质、光照和病原传播的系统性调控，显著提升了育苗效

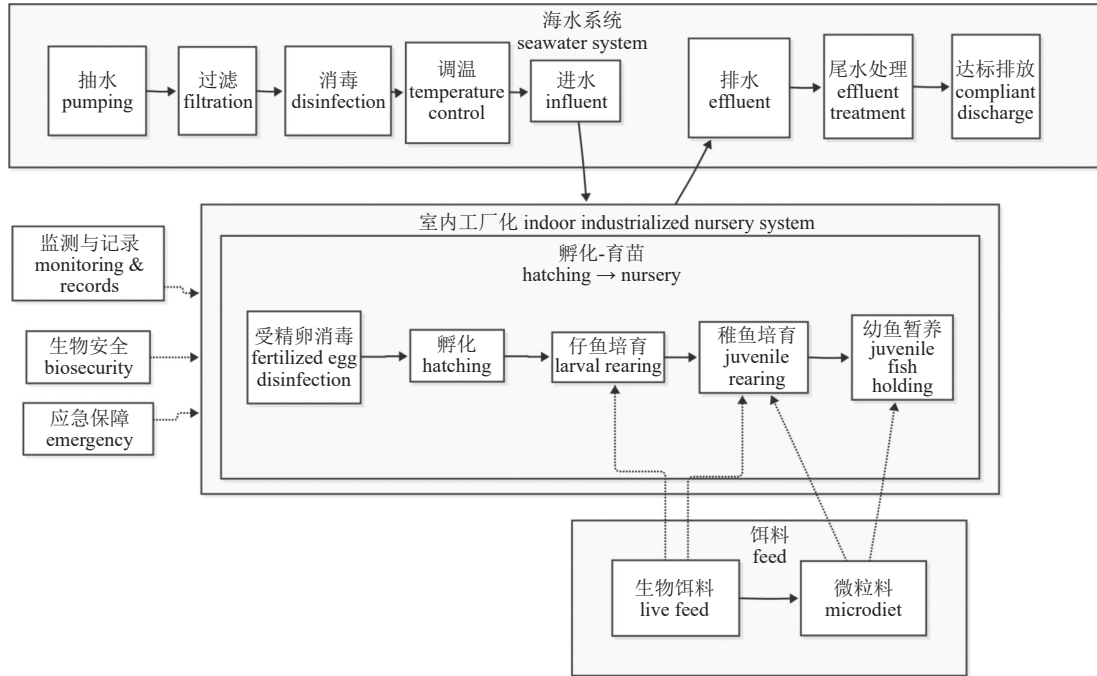


图 3 室内工厂化育苗系统结构示意图

Fig. 3 Schematic of an indoor industrialized nursery system

表 1 豹纹鳃棘鲈外塘生态育苗与室内工厂化育苗模式对比

Tab. 1 Comparison between outdoor pond ecological nursing and indoor factory-based larval rearing of *P. leopardus*

比对项目 parameters	外塘生态育苗 outdoor pond-based ecological seedling rearing	室内工厂化育苗 indoor industrial seedling rearing
基础设施投入 infrastructure investment	初期投入低	初期投入较高
饵料供给模式 feed supply mode	前期依靠水体天然饵料后期需人工投喂	全程人工投喂饵料
温度控制能力 temperature control capability	水体热容量有限, 昼夜温差大, 缓冲能力弱	配套温控系统, 可实现恒温或渐变调控
气候依赖性 climate dependency	对台风、降雨等天气高度敏感	基本不受外界气候条件影响
生物安全水平 biosecurity level	开放系统, 病原易侵入, 弧菌传播风险高	封闭系统, 配合消毒杀菌, 生物安全性高
育苗成功率 seedling rearing success rate	波动较大, 稳定性不足	成功率稳定
产业化应用进展 industrialization application progress	适合小规模、区域性生产	已实现批量化和产业化应用

率和稳定性, 并推动豹纹鳃棘鲈育苗由季节性生产向周年连续生产的转变。未来, 应深化对不同发育阶段最适环境因子的机理研究, 从而构建兼顾生物安全、育苗质量与经济可行性的高效育苗体系, 为豹纹鳃棘鲈产业的可持续发展提供支撑。

2.5 豹纹鳃棘鲈成鱼养殖

近年来, 豹纹鳃棘鲈的集约化养殖主要依托工厂化流水养殖与循环水养殖系统 (recirculating aquaculture system, RAS) 两种技术模式, 二者在系

统构成及应用场景上呈现出显著差异。工厂化流水养殖作为由传统池塘养殖向设施化养殖过渡的典型代表, 其核心依赖于持续的水体交换以维持养殖环境, 通过高频次换水有效移除残饵、粪便等代谢产物, 从而抑制氨氮、亚硝酸盐的累积并提升溶解氧含量。该模式系统构成相对简单, 通常包括进水池、养殖池、排水管网及水流调控装置, 养殖池多采用方形或圆形水泥结构, 并配备中央排污口与侧排污口以协同清除污物, 辅以池底充气软管维持水体微流动 (图 4)。王永波等^[36] 的研

究表明，该模式在豹纹鳃棘鲈规模化养殖中具备可行性。然而，这种模式的可持续性面临挑战，其本质是一种通过大量消耗水资源和热能来换取环境稳定的策略，因而在南方水温适宜、水源充沛的地区更具应用优势，但其资源依赖性强、环境排放压力大以及受外部气候波动制约的局限性也日益凸显。

相较之下，工厂化循环水养殖系统则代表了基于多学科交叉的现代化高密度养殖方向，它融合了生物学、工程学与水化学原理，通过物理过滤、生物净化、增氧、杀菌等核心单元构成闭环水处理系统，实现对养殖废水的净化与循环利用^[37-38]。典型的RAS系统由养殖池、弧形筛、循环水泵、蛋白质分离器、生物滤池等模块组成，

能够对水温、溶解氧、氨氮等关键水质参数进行精准调控，从而显著提升系统的稳定性与可控性(图5)^[39]。相较于传统模式，RAS具备单位水体产能高、环境负荷低、疫病传播风险可控等优势^[40-41]。研究表明，RAS能够有效降低水中氨氮、亚硝酸盐浓度和弧菌数量，从而改善鱼类健康状况^[42]。特别值得注意的是，针对豹纹鳃棘鲈的生物学特性，研究还发现水流速度是其养殖过程中的一个关键调控因子，适宜的水流速度对于其生长和生理状况至关重要^[43-44]。辛乃宏等^[39]的研究表明，在北方地区采用循环水养殖系统，豹纹鳃棘鲈经过12个月的养殖，平均体重从41.13 g增长至223.56 g，存活率达到65.52%；这表明该养殖模式在非传统养殖区域也具备可行性，为豹纹

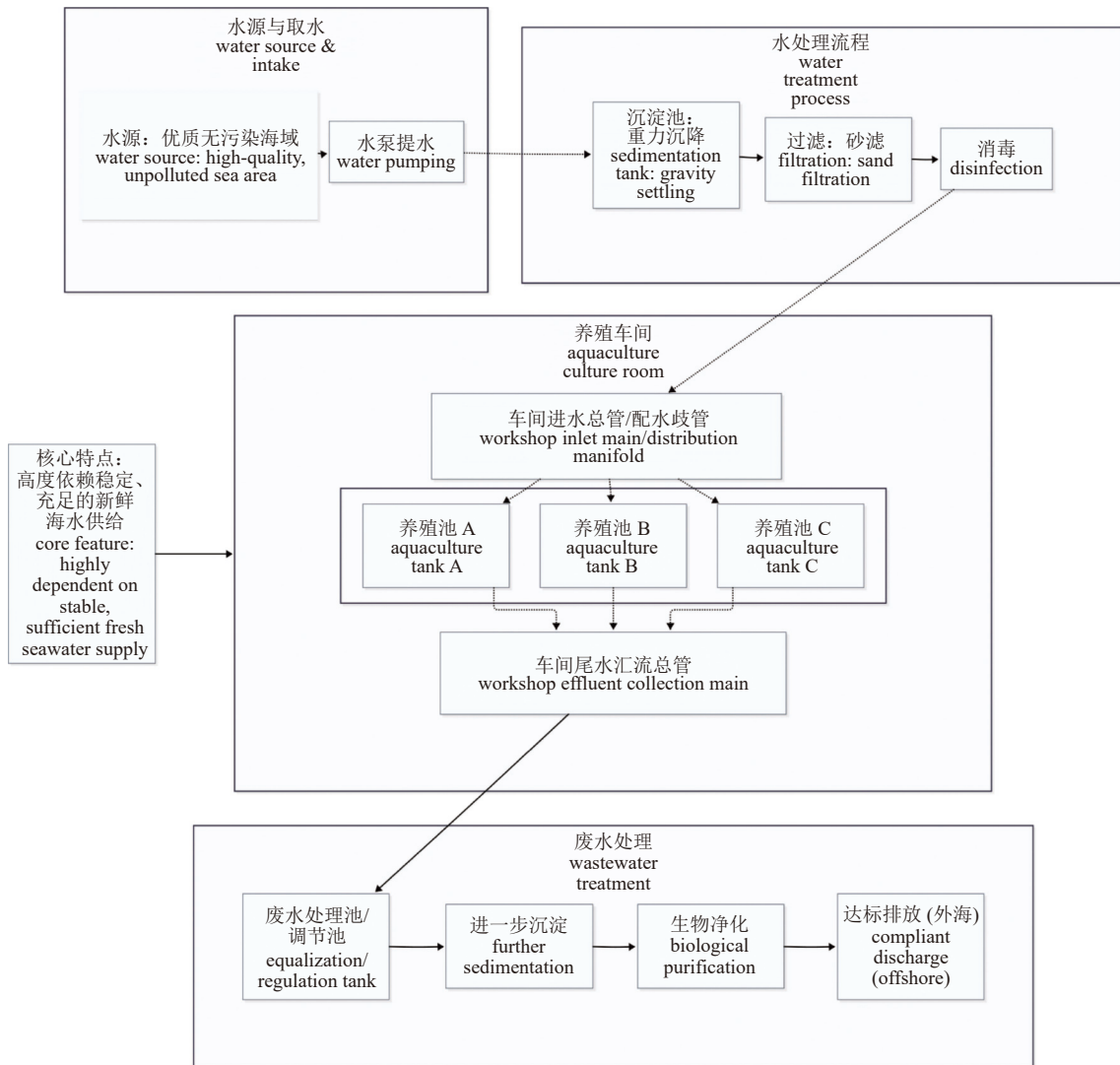


图 4 工厂化流水养殖系统结构示意图

Fig. 4 Indoor industrial flow-through aquaculture system schematic

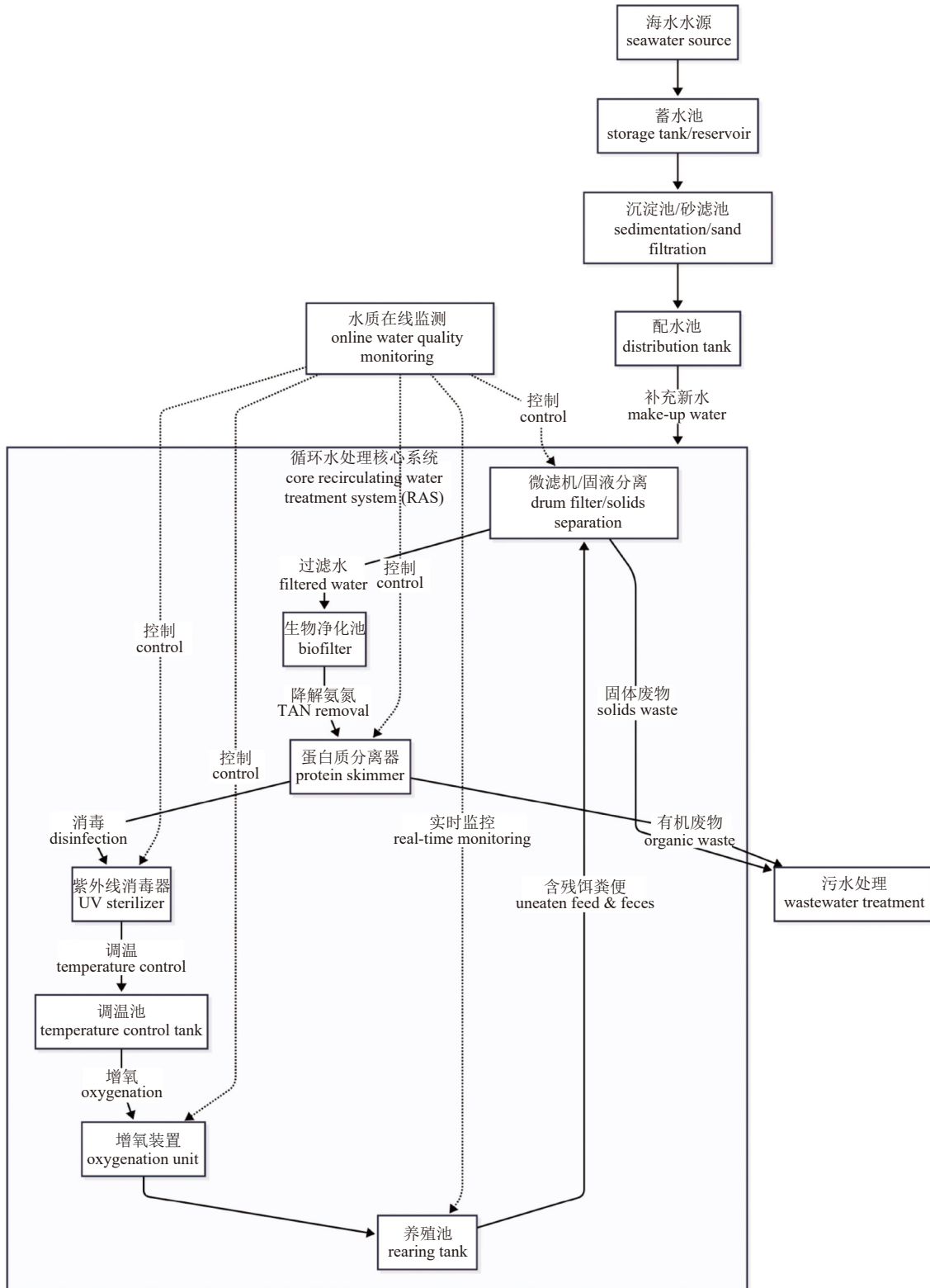


图 5 循环水系统结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the recirculating aquaculture system (RAS) structure

鳃棘鲈的高纬度地区养殖提供了实践依据。

工厂化流水养殖与循环水养殖系统代表了豹纹鳃棘鲈集约化养殖中两种不同的技术路径与决

策方向。流水养殖的优势在于技术相对成熟、初始投资与运营成本相对较低。而 RAS 的核心优势在于其资源利用率高、环境负荷低、生产过程不

受外界气候干扰、产品品质稳定,是在北方或内陆地区进行高价值鱼类养殖的战略性选择。因此,养殖模式的选择并非简单的技术优劣判断,而应基于生产目标、地域条件、投资能力与市场定位进行综合考量(表 2)。未来研究与应用应着力于优

化 RAS 的能耗结构、降低建设和运营成本、开发更高效稳定的水处理工艺,并加强针对豹纹鳃棘鲈等特定物种的精准养殖管理策略研究,以推动养殖业的可持续发展。

表 2 工厂化流水养殖与循环水养殖系统的技术对比

Tab. 2 Comparison of flow-through and recirculating aquaculture systems for intensive culture of *P. leopardus*

比对项目 parameters	工厂化流水养殖 industrial flow-through aquaculture	工厂化循环水养殖 industrial recirculating aquaculture system
投资与运行成本 investment and operating costs	初始投资和运行成本相对较低	初始投资和运行成本较高
水体更新方式 water exchange method	外源新水连续或间歇补充	系统内水体闭环循环
污物去除方式 waste removal method	依靠换水与物理排污	物理过滤、生物净化
环境排放压力 environmental discharge pressure	较大,养殖废水直接外排	较低,废水排放量显著减少
生物安全水平 biosecurity level	相对较低,病原易随水源进入	较高,可结合杀菌措施降低病原风险
生产稳定性 production stability	受水源与气候条件影响较大	生产过程高度稳定
单位水体产能 production per unit water volume	中等	高

3 豹纹鳃棘鲈养殖常见病害及综合防治措施

在豹纹鳃棘鲈的养殖过程中,病害是限制其生长和养殖效益的关键因素,主要包括细菌性、病毒性和寄生虫性疾病三大类。这些病害不仅导致生长障碍,还显著提高死亡率,严重制约了养殖业的发展。

3.1 细菌性病害

豹纹鳃棘鲈感染细菌性病原后,通常表现为体表出现白色或红色溃烂斑,溃烂区域逐渐扩大,并伴随出血、色泽变暗及蓝色斑点模糊等症状。病鱼游动缓慢或失衡,食欲明显下降,腹部膨大且伴有腹水。解剖检查显示,肝脏、脾脏和肾脏常见充血、坏死或白色结节病变。姚学良等^[45]从患病豹纹鳃棘鲈的肾脏中分离到鳗利斯顿氏菌(*Listonella anguillarum*),并通过人工感染实验证明该菌可引起肾脏乳白色小米粒状溃烂。徐晓丽等^[46]和孔明慧等^[47]分别报道哈维氏弧菌(*Vibrio harveyi*)感染引发的体表溃烂、尾部坏死和肝脏贫血,组织病理学分析显示肝细胞空泡变性,脾脏结构紊乱。Gai等^[48]首次鉴定出黑海弧菌(*V. ponticus*)为导致豹纹鳃棘鲈大量死亡的病原,感染表现为肝脏坏死及细胞空泡变性,透射电镜观

察发现线粒体肿胀和内质网排列紊乱。Xiu等^[49]进一步研究发现,哈维氏弧菌、欧文弧菌(*V. owensii*)、轮虫弧菌(*V. rotiferianus*)和美人鱼发光杆菌美人鱼亚种(*Photobacterium damsela* subsp. *damsela*)的混合感染可引起皮肤溃疡综合征,病理切片显示肝脾组织松散、细胞边界模糊。王磊等^[50]通过高通量测序分析发现,溃烂病鱼的皮肤菌群多样性显著降低,且优势菌群由正常鱼的变形菌门(Proteobacteria)和厚壁菌门(Firmicutes)转变为拟杆菌门(Bacteroidetes)和ε-变形菌门(Epsilonbacteraota),并鉴定出多个弧菌属种类,其中哈维氏弧菌和塔式弧菌(*V. tubiashii*)的丰度显著升高。目前针对细菌性病害的防治措施一般为水质管理、加强生物安保措施、合理使用抗生素以及接种疫苗等方法。

3.2 病毒性病害

神经坏死病毒(NNV)是豹纹鳃棘鲈幼鱼常见的病毒性病原,感染后病鱼常出现游泳失衡、体色变暗、眼球突出、鳍条侵蚀等神经症状,脑组织病理检查可见神经元空泡化。Wang等^[51]通过全基因组关联分析(GWAS)鉴定出*sik2*和*herc2*等候选抗病基因,为抗病育种提供了理论依据。Hartawan等^[52]则观察到神经坏死病毒与弧菌的混

合感染, PCR 检测确认 NNV 阳性, 并进一步揭示了其与弧菌的混合感染对豹纹鳃棘鲈的影响。目前, 疫苗接种是预防病毒病的主要手段, 其他防治方法相对有限。

3.3 寄生虫性病害

寄生虫感染在豹纹鳃棘鲈养殖中同样具有显著危害, 主要表现为体表或鳃部寄生虫附着, 导致局部出血、鳍条损伤、呼吸困难以及黏液分泌增加。Ogawa 等^[53]发现一种本尼登虫 (*Benedenia akajin*) 主要寄生于鳍部, 导致鳍组织损伤, 且虫体生长与水温密切相关, 水温超过 25 °C 时感染强度显著升高。王永波等^[54]报道, 淀粉卵甲藻 (*Amyloodinium ocellatum*) 和刺激隐核虫 (*Cryptocaryon irritans*) 在春夏季节高发, 寄生于鳃丝引起严重的呼吸障碍。辜良斌等^[55]记录到鱼蛭 (*Piscicola geometra*) 和本尼登虫 (*B. epinepheli*) 等大型寄生虫附着体表, 造成局部出血及继发感染。目前, 针对寄生虫感染的防治主要采取综合措施, 包括定期驱虫、优化养殖水质、以及运用生物防治等方法。

综合来看, 豹纹鳃棘鲈病害呈现多病原混合感染的特点, 且环境因素如水温变化和养殖密度是影响病害发生的关键诱因。因此, 降低病害风险的有效策略应包括优化养殖环境、开发针对性的疫苗以及加强生物安全措施等。

4 豹纹鳃棘鲈基因组解析与育种技术的建立

4.1 染色体组型与全基因组精细图谱绘制

高宁等^[56]通过对海南野生豹纹鳃棘鲈的染色体核型及银染分析, 发现其二倍体染色体数目为 48, 核型公式为 $2n=2st[t]+46t$, $NF=48$, 表明染色体组主要由端部着丝粒染色体构成, 仅有一对亚端部着丝粒染色体; 同时, 银染结果显示核仁组织区位于第 1 对染色体长臂靠近着丝粒的位置, 且仅有 1 对, 这一发现与台湾省样本的研究存在差异, 提示豹纹鳃棘鲈可能存在地理群体间的多态性。除染色体核型研究外, 国内学者在豹纹鳃棘鲈染色体水平基因组精细图谱绘制领域亦取得系列突破。Yang 等^[57]利用三代测序 (PacBio) 和 Hi-C 测序技术, 组装了大小为 784.57 Mb 的豹纹鳃棘鲈基因组图谱, 共注释到 22 317 个编码基因。Zhou 等^[58]绘制了大小为 881.55 Mb 的豹纹鳃棘

鲈染色体水平基因组精细图谱, scaffold N50 达到 34.15 Mb, 含有 25 248 个蛋白编码基因。比较基因组学分析揭示了豹纹鳃棘鲈有 126 个基因家族显著扩张, 并富集于免疫相关通路。同时, 对 54 个具有不同体色表型的豹纹鳃棘鲈个体开展了基因组重测序, 获得了 518 万个单核苷酸多态性位点 (SNP), 并绘制了基因组变异 (SNP) 图谱。Wang 等^[59]和 Han 等^[60]也分别组装出大小为 912.66 Mb 和 849.74 Mb 的豹纹鳃棘鲈基因组。相关研究为推动豹纹鳃棘鲈基因组学、遗传学和分子育种技术的发展提供了基因组资源。

4.2 传统育种

豹纹鳃棘鲈作为具有重要经济价值的高端海水养殖鱼类, 其良种选育是推动产业规模化发展的核心支撑。传统育种技术作为水产育种体系的重要基石, 主要基于生物表型选择与遗传规律应用, 凭借成熟的技术体系与广泛的适用性, 为豹纹鳃棘鲈新品种培育提供了切实可行的实践路径。

传统育种包括杂交、群体选育、家系选育和雌核发育等技术, 已在多种石斑鱼类中成功应用, 并培育出珍珠龙胆石斑鱼 (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)、云龙石斑鱼等新品种。然而, 该类技术在豹纹鳃棘鲈上的研究与应用目前仍较少见。群体选育技术核心在于通过系统评估个体的生长速率、抗病能力等表型性状, 保留表现优异的个体作为亲本, 逐步淘汰低劣个体, 最终实现群体遗传质量的累积提升。针对豹纹鳃棘鲈的良种选育, 该技术通常以现有养殖群体或野生群体为基础, 通过制定明确的选择标准, 随后通过逐代留种、定向繁育, 使群体的平均生长性能随世代推进显著提高。目前, 群体选育已经在豹纹鳃棘鲈快速生长和抗病良种选育中得到应用。但群体选择需严格控制有效群体规模, 并通过家系标记等方式追踪近交系数, 避免因近交衰退导致的生长缓慢、抗病力下降等种质劣变问题。相较之下, 家系选育则以家系为单位开展精细化遗传评估, 其技术逻辑是通过构建遗传背景清晰的家系, 在可控环境下对比不同家系的表型, 从而更精准地选育出性状优异的家系。尽管家系选育能更高效利用加性遗传变异, 且遗传进展预测更准确, 但其对技术与资源的要求显著高于群体选育。虽然家系选育在遗传进展速率和近交控制上具有理论优势, 但在豹纹鳃棘鲈的育种实践中,

群体选育目前仍是无可替代的主流策略,其根本原因在于家系建立面临严峻的技术瓶颈。由于豹纹鳃棘鲈对水温、光照周期等产卵环境的高度敏感,导致其难以在人工养殖条件下实现大量亲本的同时、可控产卵,而这正是构建遗传背景清晰家系的基础。这一瓶颈不仅制约了传统育种效率,也对全基因组选择等分子育种技术产生了连锁影响,因为后者通常需要以大规模家系材料作为构建参考群体的基础。为突破此瓶颈,未来研究可通过深入探究其自然繁殖的生态触发机制,通过精准的光温周期调控和环境模拟,诱导亲鱼在可控环境下产卵以及探索激素诱导同步产卵技术的优化方案,在保障亲鱼健康的前提下提高批量获卵的可靠性。唯有破解家系构建难题,豹纹鳃棘鲈的育种工作才能从“群体混合选择”迈向“精准家系选育”,实现育种效率的质的飞跃。

4.3 分子育种

为突破传统选择育种的效率瓶颈,分子育种通过分子生物学技术实现基因水平的精准改良,成为当前研究热点。其核心包括分子标记辅助育种、分子模块设计育种以及全基因组选择定向育种等。随着分子生物学技术的快速发展,基于分子标记的水产生物群体遗传学解析、遗传连锁图谱构建、经济性状 QTL 定位及基因编辑等技术,已成为当前实现对优良性状基因进行精准选育研究的热点。Wu 等^[5]的研究通过对豹纹鳃棘鲈 326 个个体的全基因组重测序,并基于超过 870 万个高质量 SNP 构建了该物种的单倍型参考面板。研究进一步鉴定出 75 个与生长性状显著相关的 SNP 位点,发现其富集于 17 号染色体上包含 *mef2d*、*cks1b* 等骨骼肌发育相关基因的热点区域,并通过表达分析验证了这些基因在大型个体中的显著上调,最终通过等位基因频率分析锁定了优势育种群体,为豹纹鳃棘鲈的遗传育种提供了理论基础。

豹纹鳃棘鲈基因芯片研制 分子育种的高效实施依赖于精准的基因分型技术。基因芯片作为便捷、准确的基因分型工具^[61],可为 GWAS、全基因组选择等技术提供核心支撑。自我国首款鱼类抗病育种基因芯片“鱼芯 1 号”成功研制以来^[62],国内学者又相继研制出大黄鱼 (*Larimichthys crocea*)^[63]、半滑舌鳎 (*Cynoglossus semilaevis*)^[64] 和团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*)^[65] 等重要经济

鱼类的基因芯片,为群体遗传、全基因组关联分析 (GWAS) 和分子育种技术的发展提供了高效的基因分型平台。基于豹纹鳃棘鲈染色体水平的基因组精细图谱^[58],Zhou 等^[66]开展了豹纹鳃棘鲈抗病和生长性状 GWAS 分析,通过自主设计位点筛选流程,结合豹纹鳃棘鲈中高深度全基因组重测序数据分析结果,从中优选出 20 737 个高质量 SNP 位点,包括抗病性状相关位点 67 个,生长性状相关位点 105 个,高多态性位点 19 216 个,以及确保芯片位点均匀分布的位点 1 349 个,利用液相基因芯片技术,研制出我国首款豹纹鳃棘鲈抗病育种基因芯片“东芯 1 号”,经评估,该芯片具有良好的分型稳定性和准确性,为豹纹鳃棘鲈全基因组选择育种技术的产业化应用提供了有效的基因分型工具。

豹纹鳃棘鲈抗病基因组选育技术的建立

2001 年,Meuwissen 等^[67]提出了全基因组选择 (GS) 的概念,该方法利用基因型选择代替表型选择,从而大幅提升遗传选育效率。目前,我国相继在大黄鱼^[68]、牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*)^[69] 和半滑舌鳎^[70] 等经济鱼类上建立了 GS 育种技术,并利用家系选育和 GS 技术相结合的方法,培育出了牙鲆抗病高产新品种“鲆优 2 号”(GS-02-008-2016) 和半滑舌鳎抗病高产新品种“鳎优 1 号”(GS-01-005-2021)。基于哈维氏弧菌人工感染实验和 71.59 Tb 有效全基因组重测序数据, Lu 等^[70]构建了包含 798 尾豹纹鳃棘鲈和 1 211 259 个高质量 SNP 位点的抗病参考群体;利用 5 倍交叉验证评估了基因组最佳线性无偏预测 (GBLUP)、加权 GBLUP 和 BayesC π 等三种基因组选择方法的预测准确。综合考虑基因分型成本和计算便捷性,认为使用 20~30 k 的 SNP 标记和 GBLUP 方法能够保证基因组选择的预测效果。由此建立了豹纹鳃棘鲈抗哈维氏弧菌病基因组选择育种技术,为豹纹鳃棘鲈抗病良种培育提供了有效的技术手段。

5 展望

综上所述,尽管豹纹鳃棘鲈人工繁殖、工厂化育苗、成鱼养殖、分子育种技术建立等取得重要进展和成果,但还存在全工厂化育苗技术标准不足、育苗成活率不够稳定、豹纹鳃棘鲈病害频发、生长较慢、缺乏抗病新品种和防病用疫苗等问题,这些问题不解决,豹纹鳃棘鲈产业高质

量发展就难以实现, 因此, 豹纹鳃棘鲈繁育养殖和种业今后的努力方向和重点应该聚焦在如下几个方面。

5.1 健全完善豹纹鳃棘鲈全室内工厂化育苗技术体系

豹纹鳃棘鲈人工育苗主要在外塘进行, 易受天气影响, 成活率波动较大, 苗种生长不均, 这些问题严重制约了优质苗种的规模化供应与产业稳定性。未来需重点围绕工厂化育苗早期生物饵料培育与营养供给、育苗水池环境管控、病害综合防控等关键环节进行系统性优化, 构建标准化、可控的室内高效批量化育苗技术工艺。

5.2 加强豹纹鳃棘鲈养殖中的疾病预防及治疗方法研究

随着豹纹鳃棘鲈养殖规模扩大, 高密度集约化养殖导致病害风险显著增加, 病害频发已成为豹纹鳃棘鲈养殖业发展的瓶颈问题, 亟需构建高效健康管理策略, 研发快速、灵敏的疾病现场检测技术, 研制细菌和病毒疫苗, 减少病害的发生与损失, 保障养殖业高质量发展。

5.3 加强豹纹鳃棘鲈基因组育种技术的研发与推广应用

传统的群体选育和杂交育种技术依赖表型选择, 存在周期长、效率低、准确性不高等问题, 难以满足现代育种的需求。今后需加强豹纹鳃棘鲈高效低成本全基因组选择等分子育种技术的研发, 突破基因编辑育种技术难关, 为新品种创制提供技术支撑。

5.4 加快豹纹鳃棘鲈抗病高产新品种选育

豹纹鳃棘鲈养殖业中存在病害频发、生长慢等问题, 亟需抗病、高产新品种。因此, 采用分子标记辅助选择、全基因组选择、基因编辑等分子育种技术, 结合传统育种技术, 培育抗病高产重大新品种成为豹纹鳃棘鲈种业发展的重要任务, 今后要重点开展豹纹鳃棘鲈速生抗病优质突破性新品种的培育, 力争在几年内培育出国审新品种。

(作者声明本文无利益冲突)

参考文献 (References):

[1] 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.

[2] Frisch A J, Cameron D S, Pratchett M S, *et al.* Key aspects of the biology, fisheries and management of coral grouper[J]. *Rev Fish Biol Fisheries*, 2016, 26(3): 303-325.

[3] Van Herwerden L, Choat J H, Newman S J, *et al.* Complex patterns of population structure and recruitment of *Plectropomus leopardus* (Pisces: Epinephelidae) in the Indo-West Pacific: implications for fisheries management[J]. *Marine Biology*, 2009, 156: 1595-1607.

[4] Payet S D, Pratchett M S, Saenz-Agudelo P, *et al.* Demographic histories shape population genomics of the common coral grouper *Plectropomus leopardus*[J]. *Evolutionary Applications*, 2022, 15: 1221-1235.

[5] Wu S X, Zeng Q F, Han W T, *et al.* Deciphering the population structure and genetic basis of growth traits from whole-genome resequencing of the leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*)[J]. *Zoological Research*. 2024 Mar 18;45(2): 329-340.

[6] 丁少雄, 刘巧红, 吴昊昊, 等. 石斑鱼生物学及人工繁育研究进展 [J]. *中国水产科学*, 2018, 25(4): 737-752.

Ding S X, Liu Q H, Wu H H, *et al.* A review of research advances on the biology and artificial breeding of groupers[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(4): 737-752(in Chinese).

[7] Ding H, Wang M Y, Wang M Y, *et al.* Synchronously sexual maturity in hermaphrodite fish as revealed by transcriptome analysis in *Plectropomus leopardus*[J]. *Gene*, 2024, 901: 148166.

[8] Gao J, Wang Y, Liu J, *et al.* Genome-wide association study reveals genomic loci of sex differentiation and gonadal development in *Plectropomus leopardus*[J]. *Frontiers in Genetics*, 2023, 14: 1229242.

[9] Samoilys M A, Squire L C. Preliminary observations on the spawning behavior of coral trout, *Plectropomus leopardus* (Pisces: Serranidae), on the great barrier reef[J]. *Bulletin of Marine Science Miami*, 1994, 54(1): 332-342.

[10] 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.

[11] Ebisawa A. Life history traits of leopard coral grouper *Plectropomus leopardus* in the Okinawa Islands, southwestern Japan[J]. *Fisheries Science*, 2013, 79: 911-921.

[12] Khasanah M, Nurdin N, Jompa J, *et al.* Reproductive biology of

- three important threatened/near-threatened groupers (*Plectropomus leopardus*, *Epinephelus polyphkadion* and *Plectropomus areolatus*) in eastern indonesia and implications for management[J]. *Animals*, 2019, 9(9): .643.
- [13] 符书源, 王永波, 陈傅晓. 豹纹鳃棘鲈人工繁育和养殖 [M]. 北京: 海洋出版社, 2018.
Fu S Y, Wang Y B, Chen F X. Artificial breeding and cultivation of leopard coral grouper [M]. Beijing: Ocean Press, 2018(in Chinese).
- [14] 李文升, 郭晓丽, 陈张帆, 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, Chen Z F, *et al.* Industrialized indoor breeding and early growth characteristics of *Plectropomus leopardus*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(1): 019605(in Chinese).
- [15] 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).
- [16] 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.
- [17] 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).
- [18] Feugere L, Bates A, Emagbetere T, *et al.* Heat induces multiomic and phenotypic stress propagation in zebrafish embryos[J]. *PNAS Nexus*, 2023, 2: 1-14.
- [19] Pir R, Sulukan E, Senol O, *et al.* Co-exposure effect of different colour of LED lights and increasing temperature on zebrafish larvae (*Danio rerio*): immunohistochemical, metabolomics, molecular and behaviour approaches[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 175468.
- [20] Yang J, Liang X, Wang Y, *et al.* Effects of water temperature and photoperiod on the antioxidant status and intestinal microbiota in larval spotted mandarin fish, *Siniperca scherzeri*, in the Yalu River[J]. *Biology*, 2025, 14: 1400.
- [21] 王锐. 豹纹鳃棘鲈人工育苗技术和生理指标的初步研究 [D]. 石家庄: 河北农业大学, 2011.
Wang R. Preliminary study on the artificial breeding techniques and the physiological indicators of *Cephalopholis miniata* [D]. Shijiazhuang: Hebei Agricultural University, 2011(in Chinese).
- [22] 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 Biology*, 2012, 3(2): 104-108 (in Chinese).
- [23] Canosa L F, Bertucci J I. The effect of environmental stressors on growth in fish and its endocrine control[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2023, 14: 1109461.
- [24] Sánchez-Vázquez F J, López-Olmeda J F, Vera L M, *et al.* Environmental cycles, melatonin, and circadian control of stress response in fish[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2019, 10: 279.
- [25] Qu M, Ding S, Xu X, *et al.* Ontogenetic development of the digestive system and growth in coral trout (*Plectropomus leopardus*) [J]. *Aquaculture*, 2012, 334-337: 132-141.
- [26] Burgess A I, Callan C K, Touse R, *et al.* Increasing survival and growth in larval leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) using intensively cultured *Parvocalanus crassirostris* nauplii[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2020, 51(1): 171-182.
- [27] Melianawati, R., Pratiwi R, Puniawati, *et al.* The effect of various kind of live feeds to digestive enzymes activity of coral trout *Plectropomus leopardus*(Lacepede, 1802) larvae[J]. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 2015, 3(2): 83-88.
- [28] Lim J Y, Teoh Y K, Canepa M, *et al.* The early life microbiome of giant grouper (*Epinephelus lanceolatus*) larvae in a commercial hatchery is influenced by microorganisms in feed[J]. *animal microbiome*, 2024, 6: 51.
- [29] Pérez-Sánchez J, Simó-Mirabet P, Naya-Català F, *et al.* Updates on fish somatotrophic Axis[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2018, 9: 687.
- [30] Herrera M, Mancera J M, Costas B. The use of dietary additives in fish stress mitigation: comparative endocrine and physiological responses[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2019, 10: 447.
- [31] Buchmann K, Karami A M, Duan Y. The early ontogenetic development of immune cells and organs in teleosts[J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2024, 146: 109371.
- [32] 姚学良, 蔡琰, 张振奎, 等. 温度对豹纹鳃棘鲈幼鱼呼吸代谢的影响 [J]. *天津农学院学报*, 2014, 21(1): 23-27.
Yao X L, Cai Y, Zhang Z K, *et al.* Impacts of temperature on

- respiratory metabolism of juvenile *Plectropomus leopardus* Lacépède[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2014, 21(1): 23-27(in Chinese).
- [33] 王辉, 时慧中. 不同光照强度对豹纹鳃棘鲈生长和体色变化的影响 [J]. *河北渔业*, 2021(05): 4-8.
- Wang H, Shi H Z. Effects of different light intensity on growth and body color changes of *Plectropomus leopardus*[J]. *Hebei Fisheries*, 2021(5): 4-8(in Chinese).
- [34] 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.
- [35] 严俊贤, 李有宁, 吴开畅, 等. 豹纹鳃棘鲈池塘生态育苗试验 [J]. *广东农业科学*, 2013, 40(1): 127-130.
- Yan J X, Li Y N, Wu K C, *et al.* Ecological breeding experiment of *Plectropomus leopardus*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(1): 127-130(in Chinese).
- [36] 王永波, 郑飞, 刘金叶, 等. 豹纹鳃棘鲈工厂化养殖试验 [J]. *热带生物学报*, 2014, 5(1): 15-19.
- Wang Y B, Zheng F, Liu J Y, *et al.* Industrial aquaculture trial of *Plectropomus leopardus*[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2014, 5(1): 15-19(in Chinese).
- [37] Elalouf H, Kaspi M, Elalouf A, *et al.* Optimal operation policy for a sustainable recirculation aquaculture system for ornamental fish: simulation and response surface methodology[J]. *Computers & Operations Research*, 2018, 89: 230-240.
- [38] Farghally H M, Atia D M, El-Madany H T, *et al.* Control methodologies based on geothermal recirculating aquaculture system[J]. *Energy*, 2014, 78: 826-833.
- [39] 辛乃宏, 朋礼全, 于学权, 等. 石斑鱼循环水养殖系统及水源热泵应用研究 [J]. *渔业现代化*, 2017, 44(4): 9-14.
- Xin N H, Peng L Q, Yu X Q, *et al.* Research on application of recirculating aquaculture system and water source heat pump for grouper[J]. *Fishery Modernization*, 2017, 44(4): 9-14(in Chinese).
- [40] Laine C, Ollikainen M, Kankainen M, *et al.* Social net benefits from aquaculture production: a comparison of net cage cultivation and recirculating aquaculture systems[J]. *Aquaculture Economics & Management*, 2024, 28(1): 1-31.
- [41] Supriyono E, Adiyana K, Thesiana L. A study of environmentally friendly recirculating aquaculture system on lobster *Panulirus homarus* nursery[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2023, 32(5): 4805-4811.
- [42] 刘鑫, 康建平, 林岗, 等. 东星斑循环水养殖系统的水体营养盐及微生物群落结构特征 [J]. *福建农业学报*, 2022, 37(6): 754-764.
- Liu X, Kang J P, Lin G, *et al.* Nutrients and microbial community in recirculating aquaculture system for *Plectropomus leopardus* aquaculture[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37(6): 754-764(in Chinese).
- [43] Qian Z, Xu J, Liu A, *et al.* Effects of water velocity on growth, physiology and intestinal structure of coral trout (*Plectropomus leopardus*)[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(4): 862.
- [44] Yang M, Gao J, Ke H, *et al.* Transcriptome-based analysis of the response mechanism of leopard coral grouper liver at different flow velocities[J]. *Fishes*, 2022, 7(5): 279.
- [45] 姚学良, 徐晓丽, 张振奎, 等. 豹纹鳃棘鲈病原鳃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(自然科学版)*, 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]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 45(5): 39-45(in Chinese).
- [46] 徐晓丽, 尤宏争, 姚学良, 等. 豹纹鳃棘鲈类结节症病原的分离鉴定 [J]. *水产科学*, 2019, 38(2): 254-259.
- Xu X L, You H Z, Yao X L, *et al.* Isolation and identification of pathogen in leopard coral trout *Plectropomus leopardus* with nodular disease[J]. *Fisheries Science*, 2019, 38(2): 254-259(in Chinese).
- [47] 孔明慧, 黄丽芳, 廖国威, 等. 豹纹鳃棘鲈哈维氏弧菌的分离鉴定与耐药分析 [J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2021, 34(4): 16-20.
- Kong M H, Huang L F, Liao G W, *et al.* Isolation, identification and drug resistance analysis of *Vibrio harveyi* from *Plectropomus leopardus*[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2021, 34(4): 16-20(in Chinese).
- [48] Gai C, Liu J, Zheng X, *et al.* Identification of *Vibrio ponticus* as a bacterial pathogen of coral trout *Plectropomus leopardus*[J]. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 2022, 12: 1089247.
- [49] Xiu, Y, Lin, X, Jiang, L, *et al.* Outbreak of skin ulceration caused by *Vibrio harveyi*, *Vibrio owensii*, *Vibrio rotiferianus* and *Photobacterium damsela* subsp. *damsela* in farmed *Plectropomus leopardus* in China[J]. Preprint available at SSRN, 2024.
- [50] 王磊, 张天时, 刘洋, 等. 高通量测序分析鉴定东星斑溃烂病主要致病菌 [J]. *农业生物技术学报*, 2023, 31(3): 617-628.
- Wang L, Zhang T S, Liu Y, *et al.* High-throughput sequencing analysis of the main pathogens of ulcer diseased *Plectropomus*

- leopardus*[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2023, 31(3): 617-628(in Chinese).
- [51] Wang J, Yu X, Wu S, *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.
- [52] Hartawan, G. S, Yanuhar, U, Musa, M, *et al.* Viral nervous necrosis and vibriosis in sunuk (*Plectropomus leopardus*) grouper: a case study. *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 2023, 12(3), 334-345.
- [53] Ogawa K, Mizuochi H, Yamaguchi T, *et al.* *Benedenia akajin* n. sp. (Monogenea: Capsalidae) from leopard coral grouper *Plectropomus leopardus* reared in Okinawa Prefecture, Japan[J]. *Fish Pathology*, 2021, 55(4): 117-124.
- [54] 王永波, 刘金叶, 郑飞, 等. 海南椰林湾工厂化养殖豹纹鳃棘鲈的病害及其防控 [J]. *水产科技情报*, 2014, 41(3): 149-151.
Wang Y B, Liu J Y, Zheng F, *et al.* Disease prevention and control of the industrially cultured *Plectropomus leopardus* in Coconut Bay, Hainan[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2014, 41(3): 149-151(in Chinese).
- [55] 辜良斌, 徐力文, 冯娟, 等. 豹纹鳃棘鲈尾部溃烂症病原菌的鉴定与药敏试验 [J]. *南方水产科学*, 2015, 11(4): 71-80.
Gu L B, Xu L W, Feng J, *et al.* Identification and drug sensitive test of bacterial pathogens from *Plectropomus leopardus* with tail fester disease[J]. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(4): 71-80(in Chinese).
- [56] 高宁, 蔡岩, 周永灿, 等. 海南野生豹纹鳃棘鲈染色体核型及银染研究 [J]. *大连海洋大学学报*, 2015, 30(3): 257-260.
Gao N, Cai Y, Zhou Y C, *et al.* Karyotype and chromosome localization of nucleolar organizer region in wild leopard coral-trout *Plectropomus leopardus* from Hainan[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2015, 30(3): 257-260 (in Chinese).
- [57] Yang Y, Wu L N, Chen J F, *et al.* Whole-genome sequencing of leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) and exploration of regulation mechanism of skin color and adaptive evolution[J]. *Zoological Research*, 2020, 41(3): 328.
- [58] Zhou Q, Guo X, Huang Y, *et al.* De novo sequencing and chromosomal-scale genome assembly of leopard coral grouper, *Plectropomus leopardus*[J]. *Molecular ecology resources*, 2020, 20(5): 1403-1413.
- [59] Wang Y, Wen X, Zhang X, *et al.* Chromosome genome assembly of the leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) with Nanopore and Hi-C sequencing data[J]. *Frontiers in Genetics*, 2020, 11: 876.
- [60] Han W, Wu S, Ding H, *et al.* Improved chromosomal-level genome assembly and re-annotation of leopard coral grouper[J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): 156.
- [61] Lin L, Li Y H, Li S L, *et al.* Comparison of next-generation sequencing systems [J]. *Journal of Biomedicine & Biotechnology*, 2012, 251634.
- [62] Zhou Q, Chen Y D, Lu S, *et al.* Development of a 50K SNP array for Japanese flounder and its application in genomic selection for disease resistance[J]. *Engineering*, 2021, 7(3): 406-411.
- [63] Zhou T, Chen B, Ke Q, *et al.* Development and evaluation of a high-throughput single-nucleotide polymorphism array for large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Frontiers in Genetics*, 2020, 11: 571751.
- [64] Lu S, Zhou Q, Chen Y, *et al.* Development of a 38 K single nucleotide polymorphism array and application in genomic selection for resistance against *Vibrio harveyi* in Chinese tongue sole, *Cynoglossus semilaevis*[J]. *Genomics*, 2021, 113(4): 1838-1844.
- [65] Luo L F, Wang Y, Wang S L, *et al.* Development and evaluation of 50 K liquid SNP array for blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. *Aquaculture*, 2025, 600: 742263.
- [66] 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.
- [67] Meuwissen T H, Hayes B J, Goddard M E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps[J]. *Genetics*, 2001, 157(4): 1819-1829.
- [68] Dong L, Xiao S, Chen J, *et al.* Genomic selection using extreme phenotypes and pre-Selection of SNPs in large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Marine Biotechnology*, 2016, 18(5): 575-583.
- [69] Liu Y, Lu S, Liu F, *et al.* Genomic selection using bayesC π and GBLUP for resistance against *Edwardsiella tarda* in Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. *Marine Biotechnology*, 2018, 20(5): 559-565.
- [70] Lu S, Liu Y, Qu S, *et al.* Genomic prediction of survival against *Vibrio harveyi* in leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) using GBLUP, weighted GBLUP, and BayesC π [J]. *Aquaculture*, 2023, 572: 739536.

Advances and prospects in artificial breeding, farming, and breeding technology of the leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*)

SONG Yu^{1,2}, LU Sheng¹, LI Wensheng³, FU Shuyuan⁴, ZHOU Bo⁵,
GUO Xiaoli^{1,2}, BAI Zemin⁶, CHEN Songlin^{1*}

(1. National Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. College of Life Sciences, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

3. Laizhou Mingbo Aquatic Products Co., Ltd., Laizhou 261400, China;

4. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China;

5. Wanning Linlan Aquaculture Co., Ltd., Wanning 571528, China;

6. Yazhou Bay Agriculture and Aquaculture Development Co., Ltd., Sanya 572024, China)

Abstract: The leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) is a high-value marine fish species with significant economic and ornamental importance. In recent decades, wild populations of this species have declined markedly due to overfishing and degradation of coral reef habitats, making artificial breeding and aquaculture essential pathways for its sustainable utilization and conservation. This review first summarizes the biological characteristics of *P. leopardus*, including its geographic distribution, habitat preferences, and reproductive traits. We then systematically review recent advances in artificial reproduction, hatchery-based seed production, and aquaculture practices, with particular emphasis on broodstock management, induced spawning techniques, larval rearing strategies, embryonic and larval developmental processes, and grow-out culture systems. Subsequently, the physiological and ecological characteristics of larvae and juveniles are discussed, focusing on the effects of key environmental factors such as temperature, salinity, and photoperiod on embryonic development, larval survival, growth performance, and stress tolerance. Furthermore, recent progress in genomic resources and breeding technologies is highlighted, including the construction of high-resolution genome maps, the development of SNP arrays, and the application of genomic selection and other molecular breeding approaches. Finally, major bottlenecks in current artificial breeding and aquaculture of *P. leopardus* are identified, and future research directions are proposed, emphasizing the optimization of fully industrialized hatchery technologies, the development of intelligent and intensive aquaculture systems, the establishment of genome-assisted breeding frameworks, and the cultivation of disease-resistant and fast-growing strains. This review aims to provide a comprehensive theoretical foundation and technical reference to support the sustainable and high-quality development of the leopard coral grouper aquaculture industry.

Key words: *Plectropomus leopardus*; artificial breeding technology; farming modes; breeding technology

Corresponding author: CHEN Songlin. E-mail: chensl@ysfri.ac.cn

Funding projects: National Major Project for Biological Breeding (2023ZD0405502); Project of Academician Chen Songlin Workstation in Hainan Province (YSGZZ2023001); Project of Flexible Talent Introduction and Innovation Platform in Hainan Province (YSPTZX202402); Key Research and Development Program of Shandong Province (2023ZLYS02); Innovative Team Project of Chinese Academy of Fishery Sciences (2023-TD-23); Science and Technology Special Project of Hainan Province (ZDYF2024XDNY278); Project of Taishan Scholar Climbing Program of Shandong Province