



林志华。研究员，博士生导师。现任浙江万里学院副校长，浙江省水产种质资源高效利用重点实验室主任，国家贝类产业技术体系岗位科学家，兼任中国动物学会贝类分会副理事长、中国水产学会常务理事。研究方向为滩涂贝类人工繁育与健康养殖。已主持完成国家重点研发计划、国家自然科学基金面上项目等重大（点）科研项目20余项。在重要海洋滩涂养殖贝类种质资源开发、应用与健康养殖方面取得了一系列创新性成果，并产生了显著的经济和社会效益。育成国家审定水产新品种3个，获省（部）级科技奖7项，主编出版专著2部，在国内外学术期刊上发表研究论文150余篇，获授权发明专利10余项。

· 综述 ·

浙江滩涂贝类种业科技创新发展及展望

林志华^{1,2*}, 何琳^{1,2}, 董迎辉^{1,2}

(1. 浙江万里学院生物与环境学院, 浙江省水产种质资源高效利用技术研究重点实验室, 浙江宁波 315100;
2. 浙江万里学院宁海海洋生物种业研究院, 浙江宁波 315604)

摘要: 我国拥有 1 512 300 hm² 沿海滩涂, 而滩涂贝类是潮间带滩涂的优势种类, 具有生长快、适应性强、环境友好等诸多优点, 因此发展滩涂贝类养殖空间广阔、条件优越、潜力巨大。浙江滩涂贝类养殖历史悠久, 在养殖技术与模式、人工采苗与育苗、大规模苗种培育、新品种培育等方面具有明显特色和优势, 同时在种业科技创新与发展方面面临巨大挑战。本文综述了浙江滩涂贝类养殖产业、苗种生产技术、种质创新与良种创制的历史与现状, 围绕经济性状精准测评、育种技术创新、优质抗逆新品种培育、高效扩繁关键技术和装备研发、种业体系建设等方面, 提出了未来特别是“十四五”期间滩涂养殖贝类良种创制与种业发展的重点任务。

关键词: 滩涂贝类; 种业; 种质资源; 科技创新; 良种创制

中图分类号: Q 173; S 966.2

文献标志码: A

1 浙江滩涂贝类养殖产业发展现状

1.1 浙江海域自然资源状况

浙江毗邻东海, 海区北接长江入海口, 南临福建近海, 包括北纬 27°06'~31°03'、东经 120°00'~123°10' 的广大海域。浙江海域岛屿星罗棋布 (4 350 余个), 岛屿岸线长达 4 797 km, 大陆沿岸线达 1 840 km, 形成了众多优良港湾 (杭州湾、象山港、三门湾、乐清湾等) 和辽阔平坦的滩涂

(图 1)。10 m 等深线内浅海面积约 76 万 hm², 滩涂面积约 25 万 hm², 其中可养滩涂面积约 8 万 hm²^[1]。

浙江地处暖温带-亚热带, 属季风性湿润气候, 气温适中, 四季分明, 光照充足, 雨量充沛。沿海海域年平均水温 16 °C~18 °C, 月平均水温最低 6 °C~8 °C (2 月), 最高 27 °C (8 月)。浙江境内河川密布, 长江淡水和沿岸径流入海使得沿岸海水盐度波动很大, 河口区雨季盐度在 10 以下, 冬季一般为 20 左右, 高时可达 27; 非河口区平均盐

收稿日期: 2022-10-13 修回日期: 2022-11-21

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0901405, 2020YFD0900802); 浙江省农业新品种选育重大科技专项课题 (2021C02069-7); 宁波市“科技创新 2025”重大专项 (2019B10005)

通信作者: 林志华 (照片), 从事贝类遗传育种与健康养殖研究, E-mail: zhihua9988@126.com

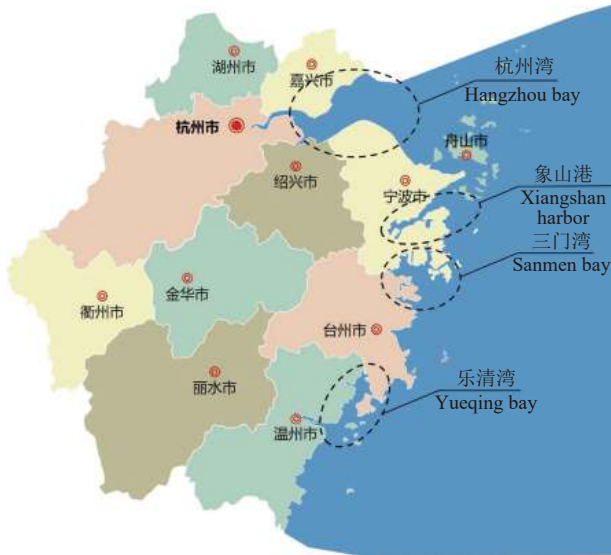


图1 浙江海域主要港湾分布图

Fig. 1 Major bays along the coast of Zhejiang province

度为 28~34。钱塘江、甌江等大量的淡水携带着泥沙和有机物源源不断地注入浙江沿海, 形成了营养物质丰富的海区, 为海洋生物的繁殖、生长提供了丰富的物质基础; 加之台湾暖流和东海上上升流活动频繁, 生物种类多样性明显, 贝类资源非常丰富。据报道, 迄今为止已知浙江沿海分布的贝类共 614 种, 隶属于 5 纲 142 科, 主要经济种类有 68 种^[2]。

1.2 滩涂贝类养殖产业发展概况

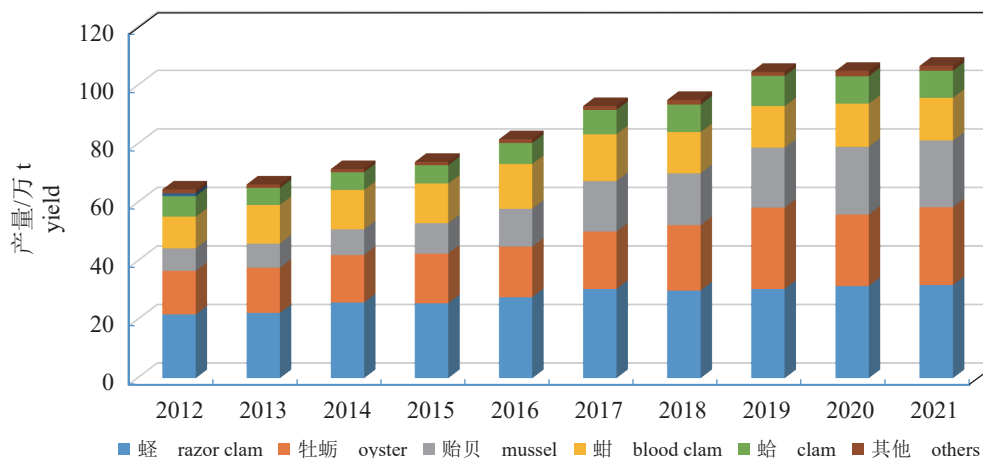
浙江省贝类养殖历史悠久。由于浙江海域自然资源禀赋优越, 沿海居民历来喜食贝类, 故利用天然苗种开展滩涂贝类养殖的历史非常悠久。

据《临海异物志》记载, 浙江沿海泥蚶 (*Tegillarca granosa*) 养殖始于三国时期 (公元 260 年前后), 缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 养殖始于明朝万历年间。杭州湾、象山港、三门湾、乐清湾均是我国滩涂贝类的主产区, 生产的“长街蛏”、“乐清湾泥蚶”、“奉蚶”、“西店牡蛎”、“慈溪泥螺”等享誉全国。

20 世纪 80 年代起, 浙江海水养殖快速发展。浙江沿海岸线漫长、滩涂广阔等生态环境特点, 决定了海水养殖以滩涂贝类为主导的格局。据 2022 年统计, 浙江贝类养殖面积约 3.47 万 hm^2 , 年产量 109 万 t ^[3], 占海水养殖总产量 79%。滩涂贝类主要养殖种类包括缢蛏、泥蚶、青蛤 (*Cyclina sinensis*)、文蛤 (*Meretrix meretrix*)、菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*)、彩虹明樱蛤 (*Moerella iridescens*)、泥螺 (*Bullacta exarata*) 等, 其中缢蛏养殖年产量约 32 万 t 、占全国产量 37%; 蚶类 (80% 以上为泥蚶) 养殖年产量约 15 万 t , 占全国产量 43%; 泥螺养殖年产量 2 万 t , 这三种滩涂贝类的养殖面积和产量均占全国第一 (图 2)。此外厚壳贻贝 (*Mytilus coruscus*)、熊本牡蛎 (*Crassostrea sikamea*)、彩虹明樱蛤也是浙江特色养殖贝类。

1.3 滩涂贝类主要养殖模式

沿岸滩涂底播养殖 为传统的滩涂贝类养殖方式。通常选择在内湾中潮区 (干露时间不超过 5 h) 中下段, 建成宽度为 6~8 m、长度不等的畦状蛏 (蚶) 田, 涂面需翻耕、平整至松软, 以利

图 2 2012—2021 年浙江主要海水养殖贝类产量 (数据来源于“中国渔业统计年鉴”)^[3]Fig. 2 The yield of main mariculture mollusks in Zhejiang province from 2012-2021 (data from “China Fishery Statistical Yearbook”)^[3]

于缢蛭、泥蚶潜居生长^[2]。这种方式养殖成本低, 但由于受环境因子影响较大、饵料生物量有限, 养殖贝类生长慢、生产周期长, 养殖产量较低。

滩涂筑坝蓄水养殖 20世纪90年代开始构建滩涂筑坝蓄水养殖模式, 即在内湾的高、中潮区, 根据地形筑坝围成大小不等的蓄水池(泥坝高50 cm左右), 在池内平涂整畦蓄水进行养殖。这种模式利用了原来不宜养贝的高潮区滩涂, 扩展了贝类养殖范围; 高潮区潮流较小, 敌害生物相对容易控制, 养殖贝类成活率较高; 池内蓄水延长了贝类摄食时间、加快了贝类生长。但后期由于沿海围垦, 大量中高潮区滩涂变为土地或养殖池塘, 此养殖模式逐渐萎缩。

围塘蓄水综合养殖 1992年起, 由于对虾病害暴发, 全国对虾养殖业陷入困境, 浙江率先开展了海水池塘底播贝类为主与对虾、青蟹综合养殖技术试验^[2]。该模式是在养殖池塘四周和中间开挖环沟和纵沟, 在占池塘总面积约1/3的中央底部平涂整畦, 四周环沟水体养殖虾、蟹, 中央涂面播养贝类的一种立体综合养殖方式。虾、蟹的残饵及粪便可起到肥水作用, 促使塘内浮游生物生长, 为贝类提供丰富的饵料; 而贝类通过滤食起到净化水质的作用, 体现了多营养层次综合养殖原理。由于海水池塘贝类综合养殖模式经济效益显著, 成为具有浙江特色的技术模式和产业结构, 是当前滩涂贝类养殖的主要模式。

2 浙江滩涂贝类苗种生产技术的发展

长期以来, 滩涂贝类养殖苗种源于天然苗种, 象山港、三门湾、乐清湾是多种滩涂贝类的天然栖息地、产卵场、附苗区。象山港曾是缢蛭、泥蚶、毛蚶(*Scapharca subcrenata*)、菲律宾蛤仔天然苗产区, 而三门湾和乐清湾则盛产缢蛭、泥蚶天然苗。20世纪60年代起, 许多科研机构开始研究泥蚶^[4-5]、缢蛭^[6-7]、菲律宾蛤仔^[8-9]等滩涂贝类人工育苗生产技术, 20世纪80年代构建了缢蛭半人工采苗技术^[10]和菲律宾蛤仔垦区大水面半人工育苗技术^[11], 取得了泥蚶、青蛤、文蛤、菲律宾蛤仔等人工育苗技术小试成功。自20世纪90年代以来, 滩涂贝类人工育苗技术工艺不断优化完善, 包括亲贝人工促熟^[12]与诱导产卵技术^[13]、高密度幼虫培育技术、微藻饵料生物高效培育技术、幼虫变态及稚贝无附着基培养技术、大规格苗种中间培育技术^[14]等, 实现了滩涂贝类苗种人

工培育集约化、标准化、规模化生产, 保障了贝类养殖业快速发展的苗种需求。如今浙江省年产滩涂贝类苗种约8 000多亿粒, 供应本省养殖需求, 并辐射福建、江苏、山东、辽宁等省份。

2.1 缢蛭半人工采苗与大规格苗种培育技术创新

乐清湾是我国最大的缢蛭天然产苗区。浙江省海洋水产养殖研究所于20世纪70年代率先建立了“平涂整畦”、“围塘整涂附苗”、“刮苗归冬暂养”、“产卵附苗预报”等一系列关键技术, 构建了“缢蛭半人工采苗”技术体系, 主要涉及“平涂整畦附苗”和“刮苗暂养”两大关键技术环节。

“平涂整畦附苗”技术 浙江缢蛭的繁殖季节从9月下旬(“霜降”节气前后)开始至11月, 一般“白露”过后就在内湾、港底泥油沉积缓慢海区的中潮区上段或高潮区下段筑塘。每塘面积150~300 m², 蓄水30 cm深, 维持15 d, 在附苗前使新沉降的泥油达到10 cm, 然后放水再次平涂等待附苗^[2]。自然海区缢蛭产卵及附苗预报工作是保障附苗效果的关键: 自9月中旬开始, 每天取样解剖检查性腺, 若性腺丰满度骤然下降, 说明缢蛭已大批产卵; 产卵后, 每天在产卵海区拖取浮游生物, 观测、分析缢蛭浮游幼虫发育和数量变化, 结合水温、盐度等因素预测附苗时间, 在预测的附苗期关水停苗。蛭苗附着20 d后, 要求涂质软而不烂, 退潮排水后蛭孔能开出。附着1个多月后, 开始蓄水培育蛭苗。

“刮苗暂养”技术 浙江沿海冬季水质混浊, 泥油多, 有利于蛭苗的附着; 但在长达4~5个月的培育过程中, 若附苗密度高, 则生长缓慢。为了提高蛭苗质量规格, 需采取“刮苗暂养”技术措施, 即在立春前后把苗塘里的蛭苗收集起来, 移到潮流畅通、饵料丰富、涂泥柔软的中潮区中段涂面上疏养, 以加快蛭苗生长。刮苗时间一般为大批产卵后的45 d, 附着蛭苗壳长2 mm以上, 涂面出现小孔时开始刮苗暂养, 大约11月下旬至翌年1月。11月下旬至12月上旬刮的苗, 壳长2~3 mm, 可播养4.5~9.0万粒/m²; 12月中下旬至翌年1月上旬刮的苗, 壳长5 mm左右, 要及时分塘疏养, 控制密度2~3万粒/m²。

缢蛭半人工采苗及大规格苗种培育技术率先在乐清湾的乐清、玉环、温岭沿岸推广应用, 形成了全国产量最高的缢蛭天然苗种产区, 年产大规格苗种达到1 000~1 500亿粒。此后该项技术在

浙江三门湾、象山港, 福建三沙湾、福清湾、涵江湾、晋江湾等地推广, 使这些区域成为缢蛏产苗区, 保障了缢蛏养殖的苗种供给。

2.2 泥蚶全人工育苗与大规格苗种培育技术创新

由于 20 世纪 70 年代开始沿海滩涂围垦剧增以及工农业迅速发展, 使滩涂贝类栖息地遭受严重破坏, 加之过度的人工采捕, 导致泥蚶天然苗种资源严重衰减, 自然海区采苗量不能满足泥蚶养殖发展增长的需求。20 世纪 60 年代我国就开始研究泥蚶人工育苗技术, 1973 年浙江省海洋水产养殖研究所率先取得泥蚶人工育苗小试成功^[4], 1993 年解决了泥蚶规模化人工育苗技术, 而后在推广应用过程中不断完善育苗技术工艺, 在 20 世纪末建立了较完善的泥蚶全人工育苗规模化生产技术体系, 基本实现了集约化、标准化、轻简化生产, 为其他滩涂贝类人工育苗技术提供了通用技术范式, 实现了泥蚶、缢蛏、菲律宾蛤仔、文蛤、青蛤、毛蚶等多种滩涂主养贝类养殖苗种专业化、集约化培育生产, 彻底改变了滩涂贝类养殖依赖天然苗的局面。

池塘亲贝培育与诱导产卵技术 利用池塘底播养殖环境饵料生物丰富、水温较高, 解决了人工调控技术, 实现了低成本规模化有效培育成熟亲贝; 构建了干干加流水刺激的轻简化人工催产技术, 使工厂化人工育苗技术更趋成熟稳定。

高密度幼虫培养技术 筛选出多种高营养、适合高温季节大规模培养的微藻饵料生物, 满足高密度幼虫的饵料需求; 掌握了滩涂贝类幼虫发育生长的环境因子限制阈值, 建立了大水体幼虫高密度培育水质控制技术。

高附着变态率及稚贝轻简化高效培育技术 建立了无附着基幼虫变态诱导和稚贝培育技术, 优化了露天池塘肥水技术工艺, 实现了稚贝大规模培养技术轻简化, 提升了生产效能。

2.3 滩涂贝类苗种中间培育技术的创新与发展

滩涂中间培育技术发展 随着缢蛏半人工采苗技术的成熟, 贝类滩涂中间培育技术也不断发展。浙江采用滩涂中培的贝类主要为缢蛏和泥蚶。滩涂中培蛏涂的场地修整要求与“平涂整畦附苗”相似。清理敌害后, 播撒半人工采苗或人工培育的苗种。蛏苗播撒后及时蓄水、排水, 经常定期清除敌害生物, 确保涂面排水后平整、无积水。

经常检查蛏苗的成活和生长情况, 并适时补苗或者在立春前后根据蛏苗的密度和生长情况适时分苗疏养, 保持合理养殖密度。滩涂中培模式具有成本低、养殖适应性较强的优势, 是当前缢蛏大规格苗种培育的主要模式。浙江省目前贝类滩涂中培生产面积约 3 750 hm², 年产蛏苗 1.7 万 t。滩涂苗种中间培育受气候、盐度、潮流等环境条件和敌害生物的影响大, 苗种生长较慢, 成活率低且不稳定。一般培育周期约 4 个月, 平均产量 1 kg/m² 以下。此外, 滩涂中间培育开始前需清理滩涂敌害生物, 近年来发现使用三唑磷、五氯酚酸钠等违规药物事件屡禁不止, 对周边水域环境造成严重污染, 政府要加强监管和处罚力度。

设施化中间培育模式创新 20 世纪 60 年代末国际上开始设施化双壳贝类苗种培育技术与工艺研究, 80 年代中期以后开发了跑道系统^[15-16]、上升流^[17-19] 和下降流^[20] 等设施与工艺进行稚贝中间培育。21 世纪初国内开始转化应用, 林志华等^[21] 在 2005 年采用气升式上升流培育系统在水槽和池塘内对菲律宾蛤仔、硬壳蛤 (*Mercenaria mercenaria*)、青蛤等双壳贝类苗种进行培育, 证明设施化贝类苗种培育的可行性, 并研究了水流与培育效果的相关性。之后, 又开展了平面流水循环系统集约化培育硬壳蛤稚贝的研究^[22], 设计了由蓄水池塘、水泵、高位水塔、水槽架、平面水槽及进出水管道组成的多层平面流集约化培育系统。开展硬壳蛤的规模化中培, 成活率高、生长快速, 而且管理方便, 操作可行, 适合大规模推广。2015 年浙江省海洋水产养殖研究所举办平面流贝类设施化中培技术现场观摩会, 向全省介绍该系统。随后该模式应用于缢蛏等贝类中培^[23-24], 并逐渐在甬、台、温地区推广应用。以缢蛏苗种平面流中间培育为例, 对比滩涂中培, 平面流中培周期大大缩短 (9~10 月, 45~60 d; 11 月以后, 2~3 个月); 中培产量达到 10~15 kg/m², 约为滩涂中培产量的 10 倍; 且具备操作便捷、苗种起捕方便等优点。该模式适宜在滩涂池塘养殖区域使用, 充分利用养殖池塘生长的微型藻类; 也适宜于海水养殖尾水的集中资源化利用, 实现尾水净化和养殖效益提升的双赢, 具有广阔的推广应用前景。

3 滩涂养殖贝类种质创新与良种创制

自 2006 年起, 中国科学院海洋研究所、浙江省海洋水产养殖研究所、上海海洋大学、浙江

万里学院先后在国家“863”计划、国家重点研发计划“蓝色粮仓”专项、浙江省水产新品种选育重大科技专项等课题资助下,对浙江滩涂主养贝类开展了种质创新和良种创制研究,已在缢蛏、泥蚶、文蛤等贝类的种质资源收集与评价、生长抗逆等性状相关的功能基因资源发掘、良种创制等方面取得了丰硕的研究成果,并构建了一批具有优良性状的育种品系、家系、杂交系等育种材料,业已育成国家水产原良种审定委员会审定通过的7个滩涂贝类新品种,养殖生产推广应用表现出良好的生产性能,为浙江乃至全国滩涂贝类种业的持续发展奠定了坚实基础。

3.1 滩涂贝类种质资源保护

水产种质资源是水产科技原始创新和现代种业发展的物质基础。水产种质资源在各国经济发展中的重要性日益凸显,其拥有量和研发利用程度已成为衡量国家可持续发展能力和综合国力的重要指标之一^[25-26]。1981年,浙江省通过了《浙江省海洋水产资源保护暂行规定》,明确列出了重点保护种类,贝类中包括蛏类、蚶类、牡蛎、文蛤、贻贝,而且要重点保护幼体、卵子,不得采捕各类越冬和产卵亲体,以利繁殖资源;之后,一些沿海地市也有水产种质资源保护制度出台,如1989年颁布的《宁波市象山港水产资源保护条例》,重点保护贝类有缢蛏、泥蚶、毛蚶、牡蛎、菲律宾蛤仔、栉江珧(*Pinna pectinata*)。近年来,我国海洋生物多样性降低与资源衰退的问题愈发突出,资源保藏、养护和开发利用的科技水平亟待提升,已受到各级政府的高度重视。

浙江省已建立了2个国家级海洋自然保护区,可望最大限度地就地保护海洋生物天然种质资源。1990年,国务院首批批准建立的浙江“南麂列岛海洋国家级自然保护区”,地处温带和热带的过渡带,贝藻类资源十分丰富,有“贝藻王国”之美誉,仅海洋贝类就有403种,占全国海洋贝类总数的近30%,占浙江沿海贝类的80%,是重要的贝类天然种质库。2003年,浙江省人民政府批准建立“浙江省韭山列岛省级海洋生态自然保护区”,2011年升级为“韭山列岛海洋生态国家级自然保护区”,区域内分布的头足类和其他软体动物有12种。另外,近年来多个县市也建立了贝类种质资源保护区,如乐清湾泥蚶国家级水产种质资源保护区(总面积7463.3 km²,其中核心区63.3 km²,

试验区7400 km²)、苍南文蛤省级水产种质资源保护区、三门县缢蛏和熊本牡蛎种质资源保护基地等,对区域特色的滩涂贝类种质资源进行了行之有效的保护。

在滩涂贝类原良种场和种质资源场建设方面,浙江省近年来也取得了长足发展。据2021年官方公布的数据,浙江省内已审批通过的缢蛏省级原种场1家、良种场3家,泥蚶省级原种场和良种场各1家,宁波甬盛水产种业有限公司承担了国家级泥蚶种质资源场建设项目。另外,浙江万里学院已初步建成浙江主要经济贝类种质资源库和“浙江主要经济贝类种质资源信息采集分析与保存平台”,系统完成了浙江37种经济贝类共784份种质资源信息标准化整理和数字化表达,构建了基因库、标本库和活体资源库,尤其对12种滩涂经济贝类的地理种群、选育品系、家系等材料进行了活体保存和繁殖更新,为外界了解浙江贝类种质资源现状以及交流利用活体资源和基因资源提供了重要窗口。

3.2 滩涂贝类种质资源评价

迄今已开发了缢蛏^[27-28]、泥蚶^[29-32]、文蛤^[33-34]、青蛤^[35-36]、毛蚶^[31-37]等10余种滩涂贝类的RAPD、AFLP、SSR和SNP分子标记,为种质资源评价提供了有效工具。基于这些分子标记和线粒体基因,我国学者对多种滩涂贝类不同地理群体的种质资源状况进行了分析评价,如林志华等^[38-39]、Gu等^[40]用AFLP、SSR标记和ITS分析了我国文蛤多个地理种群的遗传多样性、杂合度和亲缘关系,发现南方群体和北方群体间存在显著变异,且在广西群体中发现一文蛤属新种;董迎辉等^[28]、刘博等^[41]、滕爽爽等^[42]、牛东红等^[43]分别利用AFLP、SSR、SNP标记和线粒体COI技术评价了我国缢蛏不同地理群体的遗传多样性和遗传变异情况,发现缢蛏存在很高的遗传多样性和杂合度,适于开展定向选育和地理群体杂交;李太武等^[44]、Dong等^[45]用RAPD和SSR标记技术对泥蚶群体遗传多样性和遗传结构变化进行了分析评价。这些遗传变异分析和遗传多样性评价,为了解我国滩涂贝类的种质资源现状和后续开展有效的保护与利用提供了科学依据。

3.3 新品种培育

采用群体选育、家系选育、地理群体杂交的技术路线,开展了以生长、壳色结合抗逆性状改

良为目标的缢蛭、泥蚶、文蛤良种创制研究, 近十年来新品种不断涌现, 先后育成 7 个国家审定的水产新品种(表 1)。其中, 中国科学院海洋研究所刘保忠研究员团队和浙江省海洋水产养殖研究所合作 2013 育成我国首个文蛤新品种“科浙 1 号”, 2021 年又育成抗弧菌病的文蛤“科浙 2 号”新品种; 上海海洋大学李家乐教授团队和三门东航水产育苗科技有限公司合作 2017 年育成首个缢蛭新品种“申浙 1 号”; 浙江万里学院林志华研究员团队分别在 2014 年、2017 年先后育成文蛤新品种“万里

红”、“万里 2 号”, 后又联合宁海海洋生物种业研究院育成耐低盐的缢蛭“甬乐 1 号”新品种; 浙江省海洋水产养殖研究所柴雪良研究员团队和中科院海洋研究所合作 2014 育成第一个泥蚶新品种“乐清湾 1 号”。这些高产、优质、抗逆(病)新品种的育成和推广应用, 为我国滩涂贝类养殖产业的快速、持续发展提供了强有力支撑。另外, 本团队研究还探明了文蛤^[46-47]、泥蚶^[48-49]、缢蛭^[50]受精和早期发育规律和机制, 解决了亲贝生殖调控技术, 为新品种规模化高效扩繁奠定了重要基础。

表 1 浙江培育或参与培育的国审滩涂贝类新品种

Tab. 1 Certified new varieties of mudflat bivalves in China

品种名称 variety name	审定时间 approval time	品种登记号 register no.	目标性状 target trait	亲本来源 parental origin	性状改良 trait improvement	培育单位 breeding unit
文蛤“科浙 1 号” <i>M. meretrix</i> "Kezhe No. 1"	2013	GS-01-007-2013	黑斑壳纹、生长	山东群体	100%黑斑壳纹, 26 月龄贝体质量提高 31.6%	中国科学院海洋研究所、浙江省海洋水产养殖研究所
文蛤“万里红” <i>M. meretrix</i> "Wanli Hong"	2014	GS-01-007-2014	枣红壳色、生长	江苏群体	100%枣红壳色, 2 龄贝体质量提高 24.1%, 软体部鲜味氨基酸达到 20.0%	浙江万里学院
文蛤“万里 2 号” <i>M. meretrix</i> "Wanli No. 2"	2017	GS-01-012-2017	暗灰底色锯齿花纹、生长	山东群体	100%暗灰底色锯齿花纹, 2 龄贝体质量提高 34.8%	浙江万里学院
文蛤“科浙 2 号” <i>M. meretrix</i> "Kezhe No. 2"	2021	GS-02-001-2021	抗弧菌病、生长	山东和江苏群体随机交配后代	抗副溶血性弧菌能力提高 44.2%, 养殖成活率提高 28.2%, 产量提高 25.6%	中国科学院海洋研究所、浙江省海洋水产养殖研究所
缢蛭“申浙 1 号” <i>S. constricta</i> "Shenzhe No. 1"	2017	GS-01-013-2017	生长	浙江乐清湾群体	9 月龄贝体质量提高 38.2%, 壳长提高 17.4%	上海海洋大学、三门东航水产育苗科技有限公司
缢蛭“甬乐 1 号” <i>S. constricta</i> "Yongle No. 1"	2020	GS-01-004-2020	生长、耐低盐	福建长乐群体	14 月龄贝体质量提高 44%, 低盐 3.0 胁迫 72h 存活率提高 27.6%	浙江万里学院、宁海海洋生物种业研究院
泥蚶“乐清湾 1 号” <i>T. granosa</i> "Yueqingwan No. 1"	2014	GS-01-006-2014	生长	浙江乐清湾群体	27 月龄贝体质量提高 31%, 壳长提高 11.4%	浙江省海洋水产养殖研究所、中国科学院海洋研究所

4 “十四五”浙江滩涂养殖贝类良种创制与种业发展的重点任务与展望

4.1 经济性状的高效精准测评技术

绝大多数经济性状(如生长、繁殖力、抗逆)属于数量性状, 而数量性状测评的客观、准确、高效直接影响育种的效率与效果。因此, 为了提高育种效率, 首当其冲应研发精准、快速的性状

测定技术和设备, 实现自动化、高通量测定。贝类体尺、体质量等生长性状的测量相对容易, 已从早期的游标卡尺手工测量记录发展到十几年前的半自动化批量数据采集, 到近几年的贝类形态自动测量技术和全自动重量分选机的应用, 如吴富村等^[51]建立了一种基于边缘检测的高通量贝类外部形态自动测量方法, 通过图像处理技术大幅提升了测量的效率和精准度。贝类耐高温、耐低

氧等抗逆性状的测评一直是抗逆育种中的难点之一, 传统的测评方法以半致死浓度 (LC₅₀)、半致死时间 (LT₅₀) 为指标, 往往造成大部分个体死亡和选留个体发育异常, 因而在育种应用中严重受限。近年来发展起来的心率无损检测技术, 为贝类抗逆能力测定提供了良好方法, 如包振民等^[52-54]利用红外无损的心跳参数测定系统获得扇贝的心跳频率和波形, 据此首次建立了一种快速评估扇贝耐温能力的方法, 并应用于虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) 和海湾扇贝 (*Argopecten irradians*) 的抗逆品种选育中; 林思恒等^[55]研究了高温胁迫下皱纹盘鲍 (*Haliotis discus hannai*) 心率变化规律, 并以阿伦尼乌斯拐点温度 (arrhenius break temperature, ABT) 作为生理指标评价了两个养殖群体间耐高温能力的差异; 沈雅威等^[56]通过检测分析不同溶解氧下鲍的心率变化, 建立了一种快速测定鲍耐低氧能力的方法。

在滩涂贝类经济性状的高效精准测量方面, 近几年也取得了一些重要进展。胡凌威等^[57]研究发现缢蛭心率 ABT 与耐高温和生长性状间存在相关关系, 为耐高温、高产新品种选育提供了支撑技术; 董迎辉等^[58]基于电子硬度计改良和遗传力评估, 建立了一种蛭类活体快速检测贝壳硬度的技术, 并应用于缢蛭硬壳新品种的选育中; 包永波等^[59]建立了一种活体高通量检测泥蚶血红蛋白浓度的方法, 可用于高血红素泥蚶新品种选育中。“十四五”期间, 研发建立重要滩涂养殖贝类耐高温、耐低氧、耐盐等抗逆性状和品质性状的无损高效测评技术, 仍是育种工作的重中之重。

4.2 育种技术创新

育种技术的创新, 是打赢种业翻身仗的关键所在。育种技术随着科技进步不断发展, 经过早期的选择育种、杂交育种、多倍体育种、性别控制等常规育种技术, 发展到目前的以分子标记辅助选择 (molecular marker-assisted selection, MAS)、多基因聚合育种、转基因育种、全基因组选择 (genomic selection, GS)、分子设计育种、基因 (组) 编辑 (gene editing) 育种、表观遗传辅助育种等为主的分子育种技术体系, 尤其全基因组选择和基因组编辑育种技术受到研究者的广泛重视和青睐。

全基因组选择是目前育种领域的前沿技术, 是一种利用覆盖全基因组的高密度标记进行选择育种的新方法^[60]。通过计算生物学模型预测和高通量基因型分析, 它可在全基因组水平上聚合优

良基因型, 改良重要经济性状, 其优点是可大幅提高育种值估算的准确性、可早期选择, 从而缩短世代间隔、加快遗传进展, 尤其对遗传力低、难以测定的复杂性状具有良好的预测效果, 基因组定位的双亲群体可以直接应用于育种, 真正实现了基因组技术指导育种实践。近年来, 随着第二、三代高通量测序技术的迅猛发展和日臻成熟, 我国科学家相继破译了长牡蛎 (*Crassostrea gigas*)^[61-62]、虾夷扇贝^[63]、栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*)^[64] 等 20 余种重要海洋经济贝类全基因组, 包括了菲律宾蛤仔^[65]、缢蛭^[66-67]、泥蚶^[68]、魁蚶^[69]、青蛤^[70]、硬壳蛤^[71] 等滩涂经济贝类 (表 2)。伴随着海量贝类基因组数据的不断产生, 使得开展重要经济性状的全基因组关联分析 (genome-wide association study, GWAS) 成为可能, 而 GWAS 分析正是复杂性状相关功能基因定位的重要方法, 也是后续开展育种值估算和全基因组选择育种的关键。目前, GWAS 技术在贝类生长、抗逆、品质等经济性状的关键 SNP 定位中的应用越来越多, 如在虾夷扇贝^[72]、皱纹盘鲍^[73] 和长牡蛎^[74] 中用 GWAS 方法定位了一批生长性状相关 SNP 位点, 在皱纹盘鲍中鉴定出 27 个与耐高温性状显著关联的 SNP 位点^[75], 在长牡蛎和虾夷扇贝中鉴定出与营养品质相关的 SNP^[76-77], 这些研究结果为全基因组选育技术在贝类育种中的应用奠定了良好基础。包振民院士团队 2016 年开发了新型全基因组选择模型和算法^[78], 建成国际上第一个水产生物的全基因组选择育种平台, 率先应用全基因组选择技术育成栉孔扇贝“蓬莱红 2 号”新品种^[79], 走在国际前列。2018 年, Gutierrez 等^[80]对长牡蛎的全基因组选择中发现对生长性状的预测准确度较高 (0.54~0.67)。

基因编辑, 是一种新兴的精确的能对生物体基因组特定目标基因进行修饰的一种基因工程技术。特别是 CRISPR/Cas9 介导的基因组编辑系统, 以其定向精确、简易高效和多样化等优点, 在基因研究、基因治疗和遗传改良等方面展示出了巨大潜力, 已成为水产育种领域最为有效的工具之一。近年来随着 CRISPR 技术的不断迭代升级, 基因编辑技术在水产动物中的应用也愈加广泛, 特别在斑马鱼、青鳞 (*Oryzias latipes*)、尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 等多种鱼类中实现重要基因的成功编辑并获得可存活后代^[81], 使其成为引领水产种业创

表 2 国内已完成的滩涂贝类基因组测序与分析情况

Tab. 2 Reported de novo genome sequencing and analysis of mudflat bivalves in China

物种名称 species name	基因组大小/Mb genome size	重叠群N50/kb contig N50	支架N50/Mb scaffold N50	编码蛋白基因数 no. of protein-coding genes	第一完成单位 first contributing unit	参考文献 references
菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	1 122.97	28.11	0.345	27 652	大连海洋大学	[65]
缢蛏	1 331.28	678.86	57.99	26 270	浙江万里学院	[66]
<i>S. constricta</i>	1 220.85	976.94	65.93	28 594	宁波大学	[67]
泥蚶 <i>T. granosa</i>	812.61	599.92	—	24 398	浙江万里学院	[68]
青蛤 <i>C. sinensis</i>	903.16	2 587.08	46.47	27 564	江苏海洋大学	[69]
硬壳蛤 <i>M. mercenaria</i>	1 796.59	1 768.86	91.38	34 283	中国科学院海洋研究所	[70]
魁蚶 <i>S. broughtonii</i>	884.50	1 797.72	45.00	24 045	中国水产科学研究院黄海水产研究所	[71]

新发展的革命性技术。迄今为止, 基因编辑技术已在少数贝类中进行了探索研究, 如 Perry 等^[82] 2015 年在大西洋履螺 (*Crepidula fornicata*) 中成功编辑 β -catenin 基因, 首次证实 CRISPR/Cas9 技术在贝类中的可行性; Crawford 等^[83] 在皮氏枪乌贼 (*Doryteuthis pealeii*) 中成功建立了基因编辑技术。在大宗经济贝类中, Huang 等^[84] 通过显微注射方法靶向编辑皱纹盘鲍卵的 nodal 基因; Yu 等^[85] 对长牡蛎受精卵中肌肉相关基因 MSTN 和 Twist 进行敲除, 使 18.2%~26.7% 担轮幼虫发生基因突变; Li 等^[86] 对长牡蛎肌球蛋白必需轻链 CgMLCE 基因进行敲除, 并将编辑效率提升至 90%。虽然贝类基因编辑技术取得了一系列可喜进展, 但目前除了在静水椎实螺 (*Lymnaea stagnalis*) 中成功获得基因编辑纯合体外, 其他贝类中尚未能获得基因编辑 F₁, 特别是双壳贝类受精卵体积小、固定难度大、子代成活率等问题, 大大限制了基因编辑技术的推广应用。因此, 研发安全、高效、便捷的编辑元件 (如 CRISPR/Cas9) 递送技术已成为当前贝类基因编辑研究和应用中所面临的重要挑战^[81]。

全基因组选择和基因编辑技术可大幅缩短育种周期, 快速精准创制新的种质资源, 有效提高生长、抗逆 (病)、品质等性状, 在贝类功能基因组研究、重要经济性状基因挖掘、遗传育种等领域展现出广阔的应用前景。迄今, 滩涂贝类育种技术仍以群体选育、家系选育为主, 育种效率较低、遗传进展慢, 相对落后于扇贝、鲍的全基因组选择育种技术, 亦尚未开展基因编辑技术的探索。因此, “十四五”期间应重点开展缢蛏、泥蚶的生长、抗逆、品质等重要经济性状的全基因组关联分析和育种值估算, 建立全基因组选择育种

技术, 并应用于高产、抗逆、优质新品种的育种实践中; 开展熊本牡蛎、缢蛏多倍体育种技术, 改良生长性状, 避免繁殖季节肉质下降; 加快泥蚶、缢蛏的基因导入、基因编辑等前沿技术研发, 为基因编辑育种技术体系构建提供支撑。

4.3 优质、抗逆新品种培育

水产养殖的可持续发展离不开优良品种的支撑。20 年来, 我国水产养殖遗传改良率达 52.8%, 良种对我国水产增产的贡献率为 25%~30%, 良种培育在水产养殖产业发展中的作用日益凸显, 良种化养殖已然成为未来水产养殖的基本方向。我国滩涂贝类种类繁多、产量巨大, 仅蛤、蚶、蛏三类的年产量就高达 549 万 t, 占海水养殖贝类总产量的 36%^[3]。虽然大多数滩涂贝类具有耐温、耐盐、耐氨氮和抗菌能力较强的天然优势, 但近年来随着极端天气发生频率、强度增加, 以及高密度养殖, 使滩涂贝类仍面临生长变缓、抗逆 (病) 能力下降、良种覆盖率低、病害时有发生等问题, 制约了滩涂养殖的高质量发展。

滩涂贝类育种今后应根据不同种类自身特性, 聚焦养殖产业需求和市场需求, 集成常规育种技术和分子育种技术, 建立以生长、抗逆、品质、抗病等目标性状为主的现代贝类育种技术体系, 培育高产、优质、抗逆 (病) 的滩涂贝类养殖新品种。在育种性状选择方面, 应重点考虑以下 4 个性状: ① 生长性状: 仍是滩涂贝类今后很长一段时间改良的重点, 性状指标正在由以前的单一考虑体重、壳长、生长速度, 向兼顾出肉率、体型等方向转变; ② 抗逆性状: 是关乎高产、稳产的一系列重要性状, 如耐温、耐盐主要影响养殖成

活率, 耐低氧、耐氨氮主要影响养殖产量, 其中耐高温、耐低氧已成为浙江滩涂贝类选育的主要目标性状, 本团队自 2017 年开始分别以缢蛏耐氨氮、耐高温为主要目标性状进行了选育; ③ 品质性状: 是影响产品质量的主要因素, 以前主要开展了文蛤、菲律宾蛤仔^[87-88]的壳色性状选育, 今后应重点考虑鲜味、营养成分及蚶类的血红蛋白含量等指标; ④ 繁殖性状: 是性成熟时间、怀卵量等影响苗种产量的主要性状, 目前主要开展的是牡蛎的三倍体育种^[89-93], 今后一方面探索建立缢蛏、菲律宾蛤仔等三倍体培育技术, 另一方面通过家系选育、分子育种提高滩涂贝类的繁殖力。

4.4 良种高效扩繁关键技术和装备研发与应用

从 20 世纪 90 年代到本世纪前 10 年, 我国滩涂贝类养殖研发的重点是苗种繁育, 大多数滩涂养殖贝类的苗种繁育技术都已突破且得到普及应用, 苗种短缺问题基本得以缓解, 为滩涂养殖业的快速发展提供了前提条件。近 10 余年来, 随着一批高产、优质滩涂贝类新品种的育成, 作为“育、繁、推一体化”中间环节的良种规模化扩繁技术的发展与创新就显得格外重要, 加之当前劳动力资源短缺和成本上升倒逼设备更新和产业升级, 因此加强繁育技术革新和设备研发已刻不容缓。相较于鱼、虾乃至牡蛎、扇贝等大宗经济贝类, 滩涂贝类在亲贝培育、人工育苗和大规格苗种中间培育等各环节的技术细节和设施装备亟需加强, 推动苗种繁育体系向机械化、设施化、标准化、生态化方向发展。

亲贝培育和生殖调控技术与设施 深入研究温度、饵料、亲贝密度、水环境等因素对亲贝性腺发育的影响, 配备自动化温控、光控和水质监测系统等设施设备, 优化室内温控营养促熟、池塘生态调控促熟方法, 建立高效的亲贝生殖调控技术。

人工育苗技术与设施 摸清亲贝产卵水温、盐度、光照等条件, 建立高效稳定的人工诱导产卵技术; 优化优质单胞藻饵料筛选和高效供给、水质环境调控、幼虫优选、无附着基采苗、早期稚贝营养强化及快速生长培养等技术工艺; 将智能化温控、光控和水质监测系统应用于人工育苗过程, 建立规模化、智能化育苗技术体系。

大规格苗种绿色高效培育技术与设施 建设上升流、陆基平面流、跑道系统等苗种培育设施和池塘养殖尾水净化系统, 不断完善稚贝密

度与水流量控制技术、池塘定向肥水技术、疏苗分级培养技术、敌害防除技术, 建立大规格苗种标准化、生态化培育技术模式。

4.5 滩涂贝类良种生产体系建设

打赢种业翻身仗, 良种体系建设是关键。现代水产种业是基于现代育种技术和现代设施装备, 采用现代生产经营管理和示范推广模式, 实现产学研相结合、育繁推一体化的水产种苗生产产业。

加强创新体系顶层设计 以产业需求和市场需求为导向, 开展科技创新和制度创新, 加强种质资源保护体系建设, 推动苗种繁育体系向标准化、规模化、“保育繁推”一体化方向发展, 实现优良品种的产业化推广应用。

加强种质资源保存与评价体系建设 开展种质资源普查, 通过规划论证做好保护利用的顶层设计和系统部署; 加强种质资源场、良种场、重点繁育基地等种子库建设, 在用地和资金等方面制定完善的保障措施; 建立种质资源评价的技术体系, 开展种质资源表型与基因型相结合的精准鉴定评价, 深度发掘优异种质、优异基因, 构建种质资源分子指纹图谱库。

建立现代种业科技创新体系 解析重要滩涂贝类的全基因组信息, 突破全基因组关联分析、基因组编辑、高通量基因芯片制作等关键核心技术, 建立高效精准的全基因组选择、基因编辑育种技术; 整合表型组学、基因组学、转录组学、蛋白质组学、代谢组学等各种数据库资源, 搭建育种信息平台; 根据产业需求, 集成运用现代育种技术和传统育种技术, 培育高产、抗逆、抗病、优质的突破性重大新品种。

建立健全商业化育种体系建设 加快培育壮大滩涂贝类龙头种业企业, 遴选一批创新能力强、发展潜力大的企业; 充分发挥数字化和智能化技术在育种管理中的巨大潜力; 支持产学研深度融合, 促进技术、人才、资金等创新要素向企业集聚, 建立以企业为主体、产学研用深度融合的“育繁推一体化”体系, 推动新品种研发商业化和生物育种产业化。

4.6 展望

滩涂贝类是我国海水养殖中产量大、产值高、生产稳定、发展迅猛的重要养殖种类, 也是育种起步较晚、育种技术难度较大的种类。加强种质

资源的保护保存和鉴定评价, 是滩涂贝类育种创新和种业发展的重要基础。加大经济性性状高效自动测量技术的研发力度, 将使滩涂贝类抗逆、品质性状的无损精准高通量测评及在育种中应用成为可能。近年来, 随着越来越多滩涂贝类全基因组的破译和重要经济性状的 GWAS 分析及关键基因挖掘, 将为全基因组选择、基因编辑等育种技术创新提供强有力支撑。建立“保育繁推”一体化的良种生产体系, 构建以企业为主体的商业化育种新机制, 将是滩涂贝类种业的发展趋势。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 尤仲杰, 徐善良, 谢起浪. 浙江沿岸的贝类资源及其增殖[J]. 东海海洋, 2000, 18(1): 50-56.
You Z J, Xu S L, Xie Q L. Shellfish resources and its cultivation and proliferation along Zhejiang coast[J]. Donghai Marine Science, 2000, 18(1): 50-56 (in Chinese).
- [2] 林志华, 尤仲杰. 浙江滩涂贝类养殖高产技术模式[J]. 海洋科学, 2005, 29(8): 95-99.
Lin Z H, You Z J. Intensive mudflat bivalves culture in Zhejiang[J]. Marine Sciences, 2005, 29(8): 95-99 (in Chinese).
- [3] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴 2013-2022[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013-2022.
Fishery Administration Bureau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Aquatic Technology Extension Station, China Fisheries Society. China fishery statistical yearbook 2013-2022[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2013-2022 (in Chinese).
- [4] 浙江省海洋水产研究所温州分所. 泥蚶的人工育苗试验[J]. 水产科技情报, 1973(7): 5-8.
Wenzhou Department of Zhejiang Marine Fisheries Research Institute. Experiment on artificial breeding of blood clam (*Tegillarca granosa*)[J]. Fisheries Science & Technology Information, 1973(7): 5-8 (in Chinese).
- [5] 陈文龙, 何连金, 吴卓成, 等. 泥蚶(*Arca granosa* Linnaeus)繁殖、育苗研究——(II)室内人工育苗实验[J]. 福建水产科技, 1979(1): 46-52.
Chen W L, He L J, Wu Z C, et al. Study on breeding and seedling of *Arca granosa*[J]. Journal of Fujian Fisheries Research, 1979(1): 46-52 (in Chinese).
- [6] 浙江动物研究室. 缢蛭室内人工育苗试验[J]. 调查报告, 1960(3): 1-5.
Zhejiang Animal Research Laboratory. Indoor artificial seedling experiment of *Sinonovacula constricta*[J]. Investigation Report, 1960(3): 1-5 (in Chinese).
- [7] 陈文龙, 何连金, 李秀珠, 等. 缢蛭循环水池人工育苗实验报告[J]. 福建水产, 1984(4): 22-29.
Chen W L, He L J, Li X Z, et al. Experimental report on artificial breeding of *Sinonovacula constricta* in circulating water tank[J]. Journal of Fujian Fisheries, 1984(4): 22-29 (in Chinese).
- [8] 张云飞. 杂色蛤仔的繁殖习性与胚胎发育[J]. 福建水产科技, 1979(1): 75-79.
Zhang Y F. Reproductive habits and embryonic development of *Venerupis variegata*[J]. Journal of Fujian Fisheries Research, 1979(1): 75-79 (in Chinese).
- [9] 齐秋贞, 林笔水, 吴天明, 等. 菲律宾蛤仔室内催产研究——阴干、氨海水和性诱导法[J]. 水产学报, 1981, 5(3): 235-243.
Qi Q Z, Lin B S, Wu T M, et al. Experiments on in-door induced breeding of *Ruditapes philippinarum*[J]. Journal of Fisheries of China, 1981, 5(3): 235-243 (in Chinese).
- [10] 许振祖. 缢蛭[J]. 水产科技情报, 1977(S3): 57-60.
Xu Z Z. *Sinonovacula constricta*[J]. Fisheries Science & Technology Information, 1977(S3): 57-60 (in Chinese).
- [11] 施并章, 傅素宝, 邱文仁, 等. 菲律宾蛤仔土池人工育苗中产卵的研究[J]. 厦门大学学报自然科学版, 1984, 23(2): 211-216.
Shi B Z, Fu S B, Qiu W R, et al. Studies on the spawning Philippine clam *Ruditapes philippinarum* (Adamset Reeve) in the artificial rearing in earth ponds[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1984, 23(2): 211-216 (in Chinese).
- [12] 周友富, 胡达美. 泥蚶工厂化育苗技术[J]. 科学养鱼, 1997(7): 16-17.
Zhou Y F, Hu D M. Industrialized seedling technique of *Tegillarca granosa*[J]. Scientific Fish Farming, 1997(7): 16-17 (in Chinese).
- [13] 林志华, 王铁杆, 夏彩国. 泥蚶工厂化育苗技术 [C]//中国贝类学会-中国动物学会、中国海洋湖沼学会贝类学分会第八次学术讨论会暨张玺教授诞辰 100 周年纪念会论文集. 北京: 学苑出版社, 1997: 124-129.
Lin Z H, Wang T G, Xia C G. Techniques for industrialized seedling of blood clam *Tegillarca granosa* Linnaeus[C]//Chinese Shellfish Society. Collection of China Water Culture Society sponsored by China Society of Fisheries

- Essays of the 8th Symposium of the Chinese Zoological Society and the Chinese Society of Marine and Limnology, Mollusk Branch. Beijing: Academy Press, 1997: 124-129 (in Chinese).
- [14] 吉红九, 于志华, 高继先. 土池培育大规格文蛤苗种的初步研究[J]. 水产养殖, 2000(3): 31-32.
Ji H J, Yu Z H, Gao J X. Preliminary study on the cultivating of large size *Meretrix meretrix* in soil ponds[J]. Journal of Aquaculture, 2000(3): 31-32 (in Chinese).
- [15] Hadley N H, Manzi J M. Growth of seed clams, *Mercenaria mercenaria*, at various densities in a commercial scale nursery system[J]. *Aquaculture*, 1984, 36(4): 369-378.
- [16] Manzi J J, Hadley N H, Maddox M B. Seed clam, *Mercenaria mercenaria*, culture in an experimental-scale upflow nursery system[J]. *Aquaculture*, 1986, 54(4): 301-311.
- [17] Manzi J J, Hadley N H, Battey C, et al. Culture of the Northern hard clam *Mercenaria mercenaria* (Linne) in a commercial-scale, upflow, nursery system[J]. Journal of Shellfish Research, 1984, 4(2): 119-124.
- [18] Deming C J, Russell M P. Assessing manipulations of larval density and culling in hatchery production of the hard clam, *Mercenaria mercenaria*[J]. Journal of Shellfish Research, 1999, 18(1): 99-105.
- [19] Hadley N H, Baldwin R B, Devoe M R, et al. Performance of a tidal-powered upwelling nursery system for Northern Quahogs (hard clams) (*Mercenaria mercenaria*) in South Carolina[J]. Journal of Shellfish Research, 1999, 18(2): 555-560.
- [20] Crenshaw J W, Heffernan P B, Walker R L. Effect of grow out density on heritability of growth rate in the Northern Quahog, *Mercenaria mercenaria* (Linnaeus, 1758)[J]. Journal of Shellfish Research, 1996, 15(2): 341-344.
- [21] 林志华, 柴雪良, 肖国强, 等. 利用上升流系统培育双壳类贝苗的研究 [C]//中国海洋湖沼学会中国动物学会贝类学分会第十二次学术讨论会摘要. 太原: 中国动物学会, 2005: 49.
Lin Z H, Chai X L, Xiao G Q. Study on the cultivation of bivalve seedlings by upwelling system[C]//Collection of Essays of the 12th Symposium of the Chinese Zoological Society and the Chinese Society of Marine and Limnology, Mollusk Branch. Taiyuan: Zoological Society of China, 2005: 49 (in Chinese).
- [22] 肖国强, 柴雪良, 林志华, 等. 平面流水循环系统集约化培育硬壳蛤稚贝的研究[J]. 台湾海峡, 2008, 27(2): 197-203.
Xiao G Q, Chai X L, Lin Z H, et al. Intensive culture for juvenile hard clam *Mercenaria mercenaria* in circulatory raceway system[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2008, 27(2): 197-203 (in Chinese).
- [23] 林兴管, 张翔, 滕爽爽, 等. 不同流速和苗种规格对缢蛭平面流中间培育效果的影响[J]. 海洋科学, 2020, 44(4): 103-110.
Lin X G, Zhang X, Teng S S, et al. Effect of different flow rates and sizes on the growth and survival of *Sinonovacula constricta* juveniles in the circulatory raceway system[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(4): 103-110 (in Chinese).
- [24] 范建勋, 何琳, 叶小恒. 缢蛭苗种池塘陆基集约化中间培育技术[J]. 科学养鱼, 2021(5): 61-62.
Fan J X, He L, Ye X H. Land based intensive intermediate cultivation for *Sinonovacula constricta* seedlings[J]. *Scientific Fish Farming*, 2021(5): 61-62 (in Chinese).
- [25] 刘英杰, 刘永新, 方辉, 等. 我国水产种质资源的研究现状与展望[J]. 水产学杂志, 2015, 28(5): 48-55,60.
Liu Y J, Liu Y X, Fang H, et al. Advances and prospect in research on aquaculture germplasm resources in China[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2015, 28(5): 48-55,60 (in Chinese).
- [26] 李梦龙, 郑先虎, 吴彪, 等. 我国水产种质资源收集、保存和共享的发展现状与展望[J]. 水产学杂志, 2019, 32(4): 78-82.
Li M L, Zheng X H, Wu B, et al. Advances and prospects in research on collection, preservation and sharing of aquaculture germplasm resources in China[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, 32(4): 78-82 (in Chinese).
- [27] Dong Y H, Yao H H, Sun C S, et al. Development of polymorphic SSR markers in the razor clam (*Sinonovacula constricta*) and cross-species amplification[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2016, 15(1): gmr.15017285.
- [28] 董迎辉, 郑崇磊, 姚韩韩, 等. 5个缢蛭野生种群遗传变异的AFLP分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2011, 30: 1181-1188.
Dong Y H, Zheng C L, Yao H H, et al. Genetic variation of 5 wild populations of *Sinonovacula constricta* by AFLP analysis[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2011,

- 30: 1181-1188 (in Chinese).
- [29] 董迎辉, 姚韩韩, 林志华, 等. 泥蚶生长性状相关AFLP分子标记的筛选[J]. *水产学报*, 2012, 36(6): 825-831.
Dong Y H, Yao H H, Lin Z H, *et al.* Screening of AFLP markers related to growth traits in *Tegillarca granosa*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(6): 825-831 (in Chinese).
- [30] 周小龙, 朱靖华, 董迎辉, 等. 泥蚶(*Tegillarca granosa*)基因组SSR和EST-SSR的开发及比较研究[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(2): 467-475.
Zhou X L, Zhu J H, Dong Y H, *et al.* Development and comparative study of genomic-SSR and EST-SSR in *Tegillarca granosa*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(2): 467-475 (in Chinese).
- [31] Dong Y H, Yao H H, Lin Z H, *et al.* Characterization of 62 polymorphic EST-SSR markers in the blood clam (*Tegillarca granosa*) and their cross-amplification in *Scapharca subcrenata*[J]. *Conservation Genetics Resources*, 2012, 4(4): 991-997.
- [32] Dong Y H, Shi S F, Bao Y B, *et al.* Development of 90 EST-SNP markers in blood clam (*Tegillarca granosa*) using high resolution melting (HRM)[J]. *Conservation Genetics Resources*, 2015, 7(2): 309-314.
- [33] 齐晓艳, 董迎辉, 姚韩韩, 等. 文蛤30个微卫星标记的开发及在斧文蛤和帘文蛤中的通用性检测[J]. *水产学报*, 2013, 37(8): 1147-1154.
Qi X Y, Dong Y H, Yao H H, *et al.* Identification of 30 microsatellite markers in *Meretrix meretrix* and their transferability in *Meretrix lamarckii* and *Meretrix lyrata*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(8): 1147-1154 (in Chinese).
- [34] Jing Y, Dong Y H, Yao H H, *et al.* Characterization of 87 EST-SNP markers in hard clam *Meretrix meretrix* using high-resolution melting analysis[J]. *Conservation Genetics Resources*, 2015, 7(4): 811-817.
- [35] 孙长森, 王腾达, 董迎辉, 等. 青蛤(*Cyclina sinensis*)生长性状相关分子标记的AFLP分析[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(1): 106-112.
Sun C S, Wang T D, Dong Y H, *et al.* AFLP analysis of molecular markers related to growth traits in *Cyclina sinensis*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(1): 106-112 (in Chinese).
- [36] 方军, 沈彦鹏, 张雷雷, 等. 基于转录组数据的青蛤微卫星标记开发与验证[J]. *应用海洋学学报*, 2020, 39(2): 214-220.
Fang J, Shen Y P, Zhang L L, *et al.* Development and verification of SSR markers in *Cyclina sinensis*[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2020, 39(2): 214-220 (in Chinese).
- [37] 陈丽梅, 李莉, 石栩蔚, 等. 基于转录组数据的毛蚶SSR分子标记开发与评价[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(3): 129-137.
Chen L M, Li L, Shi X W, *et al.* Development and evaluation of SSR markers based on transcriptome sequencing in *Scapharca kagoshimensis*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(3): 129-137 (in Chinese).
- [38] 林志华, 董迎辉, 李宁, 等. 基于形态参数和AFLP标记的文蛤(*Meretrix meretrix*)不同地理群体遗传变异分析[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(3): 245-251.
Lin Z H, Dong Y H, Li N, *et al.* The genetic structure and diversity analysis of different geographical populations of *Meretrix meretrix* using morphological parameters and AFLP markers[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(3): 245-251 (in Chinese).
- [39] 林志华, 黄晓婷, 董迎辉, 等. 广西文蛤(*Meretrix*)的fAFLP及ITS分析[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(1): 33-41.
Lin Z H, Huang X T, Dong Y H, *et al.* Analysis of *Meretrix* clams from Guangxi based on fAFLP markers and ITS sequences[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(1): 33-41 (in Chinese).
- [40] Gu X F, Dong Y H, Yao H H, *et al.* Microsatellite marker analysis reveals the distinction between the north and south groups of hard clam (*Meretrix meretrix*) in China[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2015, 14(1): 1210-1219.
- [41] 刘博, 邵艳卿, 王侃, 等. 4个缢蛏群体遗传多样性和系统发生关系的微卫星分析[J]. *海洋科学*, 2013, 37(8): 96-102.
Liu B, Shao Y Q, Wang K, *et al.* Microsatellite analysis of genetic diversity and phylogenetic relationship of four different geographical populations of *Sinonovacula constricta*[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(8): 96-102 (in Chinese).
- [42] 滕爽爽, 胡高宇, 范建勋, 等. 缢蛏5个群体遗传多样性和遗传分化的SNP分析[J]. *水生生物学报*, 2021, 45(4): 861-870.
Teng S S, Hu G Y, Fan J X, *et al.* Genetic diversity and genetic differentiation analysis of *Sinonovacula constricta* populations revealed by SNP markers[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(4): 861-870 (in Chinese).

- Chinese).
- [43] 牛东红, 陈慧, 王树亮, 等. 我国沿海缢蛭群体遗传结构的mtDNA-CO I分析[J]. 动物学杂志, 2010, 45(2): 11-18.
- Niu D H, Chen H, Wang S L, *et al.* Population genetic structure of *Sinonovacula constricta* along the coast of China[J]. Chinese Journal of Zoology, 2010, 45(2): 11-18 (in Chinese).
- [44] 李太武, 李成华, 宋林生, 等. 5个泥蚶群体遗传多样性的RAPD分析[J]. 生物多样性, 2003, 11(2): 118-124.
- Li T W, Li C H, Song L S, *et al.* RAPD variation within and among five populations of *Tegillarca granosa*[J]. Biodiversity Science, 2003, 11(2): 118-124 (in Chinese).
- [45] Dong Y H, Yao H H, Zhou X L, *et al.* Genetic analysis assessed by microsatellites for a diallel mating design of two geographical stocks of the blood clam *Tegillarca granosa*[J]. Genes & Genomics, 2018, 40(4): 373-379.
- [46] 董迎辉, 林志华, 柴雪良, 等. 文蛤受精及早期胚胎发育过程的细胞学观察[J]. 动物学报, 2007, 53(4): 700-709.
- Dong Y H, Lin Z H, Chai X L, *et al.* Cytological observation on fertilization and early embryonic development in the clam *Meretrix meretrix*[J]. Acta Zoologica Sinica, 2007, 53(4): 700-709 (in Chinese).
- [47] 董迎辉, 林志华, 柴雪良, 等. 文蛤(*Meretrix meretrix*)精子的超微结构及精子入卵过程的电镜观察[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(5): 726-732.
- Dong Y H, Lin Z H, Chai X L, *et al.* Electron microscope observation on ultrastructure of spermatozoon and penetration in *Meretrix meretrix*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(5): 726-732 (in Chinese).
- [48] 姚韩韩, 林志华, 董迎辉, 等. 泥蚶受精和早期卵裂过程核行为的细胞学观察[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(5): 596-600.
- Yao H H, Lin Z H, Dong Y H, *et al.* Cytological observation on nuclear behavior in fertilization and early cleavage in *Tegillarca granosa*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(5): 596-600 (in Chinese).
- [49] Dong Y H, Yao H H, Lin Z H, *et al.* The effects of sperm-egg ratios on polyspermy in the blood clam, *Tegillarca granosa*[J]. Aquaculture Research, 2012, 43(1): 44-52.
- [50] 董迎辉, 姚韩韩, 张佩云, 等. 缢蛭受精和早期卵裂过程的细胞学变化观察[J]. 水产学报, 2012, 36(9): 1400-1409.
- Dong Y H, Yao H H, Zhang P Y, *et al.* Cytological observation on fertilization and early cleavage in *Sinonovacula constricta*[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(9): 1400-1409 (in Chinese).
- [51] 吴富村, 张国范, 李莉, 等. 基于边缘检测的高通量贝类外部形态自动测量方法: 中国, CN112444208A[P]. 2021-03-05.
- Wu F C, Zhang G F, Li L, *et al.* A high-throughput automatic measurement of shellfish external morphology based on edge detection: China, CN112444208A[P]. 2021-03-05.
- [52] 包振民, 邢强, 李仰平, 等. 一种基于扇贝心跳指标的快速选种方法: 中国, CN105191836A[P]. 2015-12-30.
- Bao Z M, Xing Q, Li Y P, *et al.* A rapid seed selection method based on scallop heartbeat index: China, CN105191836A[P]. 2015-12-30.
- [53] 包振民, 邢强, 李仰平, 等. 一种基于心跳指标的快速评估扇贝抗性的方法: 中国, CN105191837A[P]. 2015-12-30.
- Bao Z M, Xing Q, Li Y P, *et al.* A rapid method for evaluation of scallop resistance based on heartbeat index: China, CN105191837A[P]. 2015-12-30.
- [54] 包振民, 邢强, 李仰平, 等. 一种利用心跳作为海湾扇贝亲贝选育指标的方法: 中国, CN105165675A[P]. 2015-12-23.
- Bao Z M, Xing Q, Li Y P, *et al.* A new method for bay scallop heartbeat as broodstock breeding indicators: China, CN105165675A[P]. 2015-12-23.
- [55] 林思恒, 吴富村, 张国范. 高温胁迫下皱纹盘鲍不同养殖群体心率变化比较[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 84-90.
- Lin S H, Wu F C, Zhang G F. Variation in cardiac response to thermal stress in two different cultured populations of Pacific abalones[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 84-90 (in Chinese).
- [56] 沈雅威, 陈楠, 骆轩, 等. 一种用于快速测定鲍耐低氧能力的方法: 中国, CN110276546A[P]. 2019-09-24.
- Shen Y W, Chen N, Luo X, *et al.* A method for rapid detection of hypoxia tolerance in abalone: China, CN110276546A[P]. 2019-09-24.
- [57] 胡凌威, 孙长森, 董迎辉, 等. 缢蛭(*Sinonovacula constricta*)心率Arrhenius拐点温度(ABT)及其与生长性状相关和通径分析[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(5): 1265-1272.
- Hu L W, Sun C S, Dong Y H, *et al.* Correlation and

- regression analysis between the Arrhenius break temperatures (ABT) of heart rate and growth traits of *Sinonovacula constricta*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2021, 52(5): 1265-1272 (in Chinese).
- [58] 董迎辉, 徐洪强, 莫天宝, 等. 一种蛭类硬壳新品种选育方法: 中国, CN114982681A[P]. 2022-09-02.
Dong Y H, Xu H Q, Mo T B, *et al.* A selection method for hard-shelled variety of razor clams: China, CN114982681A[P]. 2022-09-02.
- [59] 包永波, 杨泽鑫, 章伟峰, 等. 一种泥蚶血红蛋白浓度高通量测定方法: 中国, CN113484256A[P]. 2021-10-08.
Bao Y B, Yang Z X, Zhang W F, *et al.* A high-throughput method for detection of hemoglobin concentration of blood clam *Tegillarca granosa*: China, CN113484256A [P]. 2021-10-08.
- [60] Meuwissen T H E, Hayes B J, Goddard M E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps[J]. *Genetics*, 2001, 157(4): 1819-1829.
- [61] Zhang G F, Fang X D, Guo X M, *et al.* The oyster genome reveals stress adaptation and complexity of shell formation. *Nature*, 2012, 490(7418): 49-54.
- [62] Qi H G, Li L, Zhang G F. Construction of a chromosome-level genome and variation map for the Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2021, 21(5): 1670-1685.
- [63] Wang S, Zhang J B, Jiao W Q, *et al.* Scallop genome provides insights into evolution of bilaterian karyotype and development[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(5): 0120.
- [64] Li Y L, Sun X Q, Hu X L, *et al.* Scallop genome reveals molecular adaptations to semi-sessile life and neurotoxins[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1721.
- [65] Yan X W, Nie H T, Huo Z M, *et al.* Clam genome sequence clarifies the molecular basis of its benthic adaptation and extraordinary shell color diversity[J]. *iScience*, 2019, 19: 1225-1237.
- [66] Dong Y H, Zeng Q F, Ren J F, *et al.* The chromosome-level genome assembly and comprehensive transcriptomes of the razor clam (*Sinonovacula constricta*)[J]. *Frontiers in Genetics*, 2020, 11: 664.
- [67] Ran Z S, Li Z Z, Yan X J, *et al.* Chromosome-level genome assembly of the razor clam *Sinonovacula constricta* (Lamarck, 1818)[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2019, 19(6): 1647-1658.
- [68] Bao Y B, Zeng Q F, Wang J, *et al.* Genomic insights into the origin and evolution of molluscan red-bloodedness in the blood clam *Tegillarca granosa*[J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2021, 38(6): 2351-2365.
- [69] Wei M, Ge H X, Shao C W, *et al.* Chromosome-level clam genome helps elucidate the molecular basis of adaptation to a buried lifestyle[J]. *iScience*, 2020, 23(6): 101148.
- [70] Song H, Guo X M, Sun L N, *et al.* The hard clam genome reveals massive expansion and diversification of inhibitors of apoptosis in Bivalvia[J]. *BMC Biology*, 2021, 19(1): 15.
- [71] Bai C M, Xin L S, Rosani U, *et al.* Chromosomal-level assembly of the blood clam, *Scapharca (Anadara) broughtonii*, using long sequence reads and Hi-C[J]. *GigaScience*, 2019, 8(7): giz067.
- [72] Ning X H, Li X, Wang J, *et al.* Genome-wide association study reveals *E2F3* as the candidate gene for scallop growth[J]. *Aquaculture*, 2019, 511: 734216.
- [73] Peng W Z, Yu F, Wu Y Y, *et al.* Identification of growth-related SNPs and genes in the genome of the Pacific abalone (*Haliotis discus hannai*) using GWAS[J]. *Aquaculture*, 2021, 541: 736820.
- [74] He X, Li C Y, Qi H G, *et al.* A genome-wide association study to identify the genes associated with shell growth and shape-related traits in *Crassostrea gigas*[J]. *Aquaculture*, 2021, 543: 736926.
- [75] Meng J, Wang W X, Shi R H, *et al.* Identification of SNPs involved in Zn and Cu accumulation in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) by genome-wide association analysis[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 192: 110208.
- [76] Shi R H, Li C Y, Qi H G, *et al.* Construction of a high-resolution genetic map of *Crassostrea gigas*: QTL mapping and GWAS applications revealed candidate genes controlling nutritional traits[J]. *Aquaculture*, 2020, 527: 735427.
- [77] Wang S Y, Wang H Z, Zhao L, *et al.* Identification of genes associated with carotenoids accumulation in scallop (*Patinopecten yessoensis*)[J]. *Aquaculture*, 2022, 550: 737850.
- [78] Dou J Z, Li X, Fu Q, *et al.* Evaluation of the 2b-RAD method for genomic selection in scallop breeding[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19244.
- [79] Wang Y F, Sun G D, Zeng Q F, *et al.* Predicting growth

- traits with genomic selection methods in zhikong scallop (*Chlamys farreri*)[J]. *Marine Biotechnology*, 2018, 20(6): 769-779.
- [80] Gutierrez A P, Matika O, Bean T P, *et al.* Genomic selection for growth traits in Pacific oyster (*Crassostrea gigas*): potential of low-density marker panels for breeding value prediction[J]. *Frontiers in Genetics*, 2018, 9: 391.
- [81] 于红, 刘欣, 李琪. 基因编辑技术在贝类中的应用进展与展望[J]. 水产学报, 2022, 46(4): 636-643.
Yu H, Liu X, Li Q. Application advances and prospects of genome editing in molluscs[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(4): 636-643 (in Chinese).
- [82] Perry K J, Henry J Q. CRISPR/Cas9-mediated genome modification in the mollusc, *Crepidula fornicata*[J]. *Genesis*, 2015, 53(2): 237-244.
- [83] Crawford K, Quiroz J F D, Koenig K M, *et al.* Highly efficient knockout of a squid pigmentation gene[J]. *Current Biology*, 2020, 30(17): 3484-3490.e4.
- [84] Huang J F, You W W, Xu Z W, *et al.* An effective microinjection method and TALEN-mediated genome editing in Pacific abalone[J]. *Marine Biotechnology*, 2019, 21(4): 441-447.
- [85] Yu H, Li H J, Li Q, *et al.* Targeted gene disruption in Pacific oyster based on CRISPR/Cas9 ribonucleoprotein complexes[J]. *Marine Biotechnology*, 2019, 21(3): 301-309.
- [86] Li H J, Yu H, Du S J, *et al.* RISPR/Cas9 mediated high efficiency knockout of myosin essential light chain gene in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. *Marine Biotechnology*, 2021, 23(2): 215-224.
- [87] 闫喜武, 霍忠明, 杨凤, 等. 菲律宾蛤仔“斑马蛤”[J]. *中国水产*, 2015(9): 52-53.
Yan X W, Huo Z M, Yang F, *et al.* *Ruditapes philippinarum* “Banma Ge”[J]. *China Fisheries*, 2015(9): 52-53 (in Chinese).
- [88] 闫喜武, 霍忠明. 菲律宾蛤仔“斑马蛤2号”[J]. *中国水产*, 2022(1): 102-106.
Yan X W, Huo Z M. *Ruditapes philippinarum* “No. 2 of Banma Ge”[J]. *China Fisheries*, 2022(1): 102-106 (in Chinese).
- [89] 张跃环, 喻子牛, 秦艳平, 等. 一种通过亲本改良来提高香港牡蛎三倍体生产性能的方法: 中国, CN108040938B [P]. 2020-04-03.
Zhang Y H, Yu Z N, Qin Y P, *et al.* A method for improving triploid production performance of Hong Kong oyster by parent improvement: China, CN108040938B[P]. 2020-04-03.
- [90] 张跃环, 喻子牛, 秦艳平, 等. 一种香港牡蛎四倍体幼贝的制备方法: 中国, CN107494358B[P]. 2019-11-01.
Zhang Y H, Yu Z N, Qin Y P, *et al.* A preparation method for juveniles of tetraploid Hong Kong oyster: China, CN107494358B[P]. 2019-11-01.
- [91] Wu X W, Zhang Y H, Xiao S, *et al.* Comparative studies of the growth, survival, and reproduction of diploid and triploid Kumamoto oyster, *Crassostrea sikamea*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2019, 50(4): 866-877.
- [92] Qin Y P, Zhang Y H, Ma H T, *et al.* Comparison of the biochemical composition and nutritional quality between diploid and triploid Hong Kong oysters, *Crassostrea hongkongensis*[J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 1674.
- [93] Qin Y P, Li X Y, Liao Q L, *et al.* Comparative study on the growth, survival, gonad development and trait segregation of F₂ hybrids and their grandparent species (*Crassostrea ariakensis* and *C. hongkongensis*)[J]. *Aquaculture*, 2021, 541: 736757.

Development and prospect for scientific and technological innovation of mudflat mollusk breeding industry in Zhejiang

LIN Zhihua^{1,2*}, HE Lin^{1,2}, DONG Yinghui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Aquatic Germplasm Resources of Zhejiang, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China;

2. Ninghai Institute of Mariculture Breeding and Seed Industry, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315604, China)

Abstract: China has more than 1 512 300 hm² of coastal mud. The mudflat mollusks as the dominant species in the intertidal zone possess many advantages, including fast growth, strong adaptability and environmental friendliness. Therefore, the development of mudflat mollusk aquaculture has great prospects, superior conditions and considerable potential. Zhejiang province has a long history of mudflat mollusk aquaculture and developed distinct characteristics and advantages in the aspects of cultivation technology and model, artificial spat collection and seed breeding, large-scale breeding and breeding of new varieties. However, it also faces severe challenges in the technology innovations and development of the mollusk seed industry. This paper reviewed the history and current status of mudflat mollusk aquaculture industry, seed production technology, germplasm innovation and variety improvement in Zhejiang province. Arrangement of the topics around the highly efficient and accurate evaluation of economic traits, breeding technology innovation, breeding of new varieties with high quality and stress resistance, key technologies and equipment research of efficient propagation, and seed industry system construction were discussed. The key tasks of new varieties breeding and seed industry development of Zhejiang mudflat mollusk in the future, especially in the 14th Five-Year Plan period are proposed.

Key words: mudflat mollusks; seed industry; germplasm resources; scientific and technological innovation; variety creation

Corresponding author: LIN Zhihua. E-mail: zhihua9988@126.com

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2018YFD0901405, 2020YFD0900802); Zhejiang Major Program of Science and Technology (2021C02069-7); Ningbo Major Project of Science and Technology (2019B10005)