

中国栉孔扇贝养殖和育种的回顾与展望

于道德, 刘凯凯, 张少春, 邱兆星

(山东省海洋科学研究院, 山东 青岛 266104)

摘要: 栉孔扇贝作为一种双壳贝类, 其营养和经济价值较高, 在中国海水养殖业中占有重要地位。自 20 世纪 50 年代开始, 栉孔扇贝养殖产业先后经历了自然采苗、半人工采苗、人工育苗、提纯复壮和新品培育等过程, 逐渐成为中国北方主要的浅海浮筏养殖品种。本文综述了中国栉孔扇贝养殖产业的发展历程, 简要总结其养殖和育种过程中存在的问题, 并对其今后的发展进行展望。

关键词: 栉孔扇贝; 育苗; 养殖; 育种

中图分类号: S968.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2023)8-0112-08

DOI: 10.11759/hyxx20220901002

中国是海水养殖大国, 从养殖结构看, 贝类是主要养殖种类, 约占总产量的 70%, 2021 年扇贝的养殖面积达到 $3.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 产量达到 $1.82 \times 10^6 \text{ t}^{[1]}$ 。扇贝作为重要的海洋优质蛋白质源, 含有陆基蛋白质源中不存在的微量营养素和必需脂肪酸, 因此, 扇贝养殖业的发展对粮食的可持续供应和粮食安全具有重要影响^[2]。目前, 中国北方沿海主要的扇贝养殖种类有栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*)、虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*)、海湾扇贝 (*Argopecten irradians*)。其中, 栉孔扇贝是中国的土著种类, 主要分布在中日韩海域, 在中国的贝类养殖中具有重要的地位。

栉孔扇贝隶属于瓣鳃纲 (Lamellibranchia), 珍珠贝目 (Pterioidea), 扇贝科 (Pectinidae)。栉孔扇贝壳表面颜色多呈褐色、红色、浅棕色或浅灰白色等, 左右两壳大小及两侧略对称, 两壳前后耳大小不等, 前大后小, 右壳较平, 其上布满棘, 右壳与左壳闭合时下缘有一个栉状的孔, 称为栉孔, 栉孔扇贝由此得名^[3]。

作为中国土著品种, 栉孔扇贝具有较高的经济价值, 除了鲜食外, 它的壳可以制成贝雕等工艺品, 而扇贝柱更被列为海产八珍之一。据史料记载, 早在 5 000 年以前, 沿海渔民就对扇贝进行采捕。至 20 世纪 50 年代, 栉孔扇贝繁殖学研究获得成功^[4], 中国栉孔扇贝养殖产业开始进入快速发展阶段, 先后经历了自然采苗、半人工采苗、人工育苗、提纯复壮和新品培育等过程。

本文对中国栉孔扇贝的养殖和育种历程进行总体回顾, 总结了栉孔扇贝种业发展的前沿技术并对

未来栉孔扇贝养殖产业的发展进行展望, 以期为该产业的可持续发展提供基础资料。

1 半人工采苗

20 世纪 70 年代前, 栉孔扇贝全靠采捕野生资源。为了更好地进行水产养殖和保护资源, 王如才等^[4]于 1974 年开始首次进行栉孔扇贝自然海区采苗技术 (又称半人工采苗技术) 研究。研究人员根据栉孔扇贝的生活史和生活习性, 在其繁殖盛期水深 3~10 m 的海区大量出现 D 形幼虫时, 投放采苗器, 可获得大量自然扇贝苗种, 成功解决在自然海区进行栉孔扇贝大规模半人工采苗的技术问题。在王如才等的支持和指导下, 山东省长岛县水产科技人员利用该技术在北部诸岛十多个采苗点进行了大面积自然海区采苗生产实验, 并取得了良好效果^[5]。柳中传^[6]根据生产实践总结了影响扇贝自然苗采集的主要因素, 包括: 海区成贝 (亲贝) 的数量、海区的水质和浮泥的多少、采苗器的材质和采苗袋的网目大小、采苗时间、

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2022-09-30

基金项目: 国家贝类产业技术体系近海增殖岗 (CARS-49); 中国工程科技发展战略山东研究院咨询研究项目 (202103SDYB02); 山东省 2018 年度农业重大应用技术-底播型海洋牧场构建关键技术与示范

[Foundation: CARS-Offshore Aquaculture Post of National Shellfish Industry Technology System, No. CARS-49; Consulting Research Project of Shandong Institute of Chinese Engineering Development Strategy, No. 202103SDYB02; Research and Demonstration of Key Technologies for Constructing Bottom-seeding Marine Ranches in Shandong Province, 2018]

作者简介: 于道德 (1978—), 男, 山东青岛人, 博士, 研究员, 主要从事海洋生物学研究, E-mail: wensentte@163.com; 邱兆星 (1963—), 通信作者, 男, 山东青岛人, 本科, 研究员, 主要从事水产增养殖、渔业资源修复研究, E-mail: 13808956497@163.com

采苗水层等。目前,栉孔扇贝半人工采苗技术仍具有良好的应用价值,烟台等地仍利用该技术进行半人工采苗。

2 人工育苗

随着产业的发展,半人工采苗技术逐渐满足不了栉孔扇贝养殖的苗种需求。1974年,山东省、辽宁省有关单位科研人员第一次人工培育出少量小规格苗种。1977至1978年,王如才等^[7]在烟台、青岛养殖场进行了栉孔扇贝全人工育苗实验,成功培育出大量稚贝,为扇贝人工育苗和苗种生产积累了宝贵的经验。为了培育较大规格苗种,杨雪舫等^[7]在威海文登进行了生产性人工育苗实验,在200 m³水体中育出0.5~1.2 cm的幼苗804.7万个。

每年5—10月是栉孔扇贝的繁殖期,不同的海区繁殖季节有较大的差异。在青岛海区,栉孔扇贝的繁殖高峰在每年的5月下旬和9月底到10月初^[9]。而在大连海区,以6月份室内水温15~20℃时育苗效果最好^[10]。王兴章等^[11]对栉孔扇贝亲贝的暂养促熟进行了研究,发现9月前的亲贝比春天的亲贝产卵量高50%以上,卵的孵化率平均85%,比春天的高80%以上。一般情况下,为使养殖扇贝按时产卵排精要用人工刺激诱导,冠宝增^[10]总结了3个亲贝产卵排精的人工刺激诱导方法,分别为阴干、流水、升温刺激法,变温刺激法和紫外线照射海水法,这些方法沿用至今。

温度和盐度是苗种培育中重要的限制因素,影响着苗种的生殖周期和生长发育。1998年,山东省海水养殖研究所的王远隆和邱兆星等开展了“栉孔扇贝良种选育”等研究,利用自然贝作为亲贝,采用降温培育和调整光照强度相结合的方法,改进育苗工艺。梁玉波等^[12]研究了温度和盐度对栉孔扇贝胚胎和幼虫的单一和组合影响,结果表明,栉孔扇贝胚胎和幼虫发育的最佳温度分别为18.0~22.0℃和19.0~22.0℃,最佳盐度分别为30.0~32.5和27.0~32.0。相对而言,栉孔扇贝胚胎和幼虫对低温高盐适应能力较强,温度显著影响胚胎孵化和幼虫发育,而盐度显著影响幼虫生长。

栉孔扇贝升温育苗具有很多优点,包括:苗种时间早、规格大,可充分利用育苗水体,进行多茬育苗提高扇贝养成产量,缩短栉孔扇贝养成周期。于瑞海等^[13]在栉孔扇贝升温育苗中改进了亲贝升温促熟培育、产卵与孵化、选幼、幼虫培育等主要技术措施,发现除控温外,加大饵料投喂量和投喂次数是促进亲

贝性腺成熟的主要措施。杜美荣^[14]研究了春季升温苗种培育和与扇贝幼虫高效附着技术,研究结果表明,春季升温苗死亡率远远低于自然苗,成功度过夏季高温期;采用底栖硅藻生物黏膜法处理栉孔扇贝附着基,提高了附苗量和变态率,减少了变态时间;稚贝的滤水率开始随着盐度的升高而升高,在25~30之间存在最大值,然后随盐度的升高而下降,盐度27.8时滤水率达到最大值;投饵密度对栉孔扇贝稚贝的滤水率有显著影响($P<0.05$),其变化趋势亦呈现先升高后下降的抛物线趋势,推算金藻密度为 4.7×10^4 cells/mL时滤水率最大,为 0.43×10^{-3} L/(h·ind);栉孔扇贝面盘幼虫和稚贝的滤水率均具有明显的昼夜节律性,且二者具有相似性。王玲玲等^[15]进行了栉孔扇贝秋季苗种培育,苗种经藻类培养室暂养安全过冬后,次年移到海区进行养成,苗种成活率达到92%,安全度过夏季高温期。

3 人工养殖研究

中国扇贝的人工养殖起步较晚,最初的养殖方式比较“粗放”,即将扇贝苗投放到海底礁石上,另一种是根据个体大小,用0.2 cm的筛网和1 cm网目的网片做成网笼,吊养于海中浮筏上^[16]。20世纪80年代,栉孔扇贝的人工育苗和养殖技术逐渐发展成熟。罗有声^[17]对扇贝养殖过程中的几个关键问题做了理论上的初步探究,包括放养密度、放养容器的滤水性和管理水平等。1983年,王远隆等开展了栉孔扇贝海上中间培育和筏式养殖技术研究,在海域选划、筏架建设与维护、连续养殖、清除敌害和附着物等方面形成了一整套生产工艺,引导和推动了栉孔扇贝养殖产业的迅速发展。

栉孔扇贝的养殖周期较长,一般为2 a左右,投资成本高,影响渔民的养殖积极性。柳中传等^[18]认为缩短栉孔扇贝养殖周期的技术措施主要有6条,分别是:选择好的海区、选择适宜的养殖器材、适时早分苗、合理的密植、扇贝与海带间养和做好海上管理。除了以上措施外,于瑞海等^[19]提出通过升温和养殖三倍体苗种也可缩短栉孔扇贝的养殖周期。

20世纪90年代初期到中期,中国北方沿海各地的扇贝养殖业进入繁荣发展期,养殖规模和产量不断增加。然而,1997和1998两年内,在山东沿岸各栉孔扇贝养殖区暴发了大规模病害,使该产业遭受了毁灭性打击。后来经研究发现,栉孔扇贝大规模死亡的直接原因是急性病毒性坏死症病毒(acute virus

necrobiotic disease virus, AVNDV)^[20-21], 与牡蛎疱疹病毒(Ostreid herpesvirus 1, OsHV-1)基因组相似度达 97%, 为同一种病毒的不同变异株^[21]。除了病害外, 海区环境恶化、种质衰退、过度密集养殖和夏季高温等也是导致其大规模死亡的重要因素^[23-25]。改良种质、降低养殖密度、开展多元化综合养殖、加强生态防治等措施^[23-24]是预防和应对栉孔扇贝的大规模死亡问题的关键。目前, 在各级主管部门和水产科技工作者的不断努力下, 栉孔扇贝养殖业已逐渐恢复振兴。

栉孔扇贝以传统的养殖方式为主, 最主要的养成方式为筏式养殖、串耳吊养和底播养殖。孙慧玲等^[26]对笼养和串耳两种养殖方式进行了比较, 结果发现串耳养殖的扇贝平均壳高增长比笼养扇贝生长快, 串耳的养殖方式适宜在扇贝养殖密度较高的海区, 若以笼养方式应考虑附着生物的影响。栉孔扇贝的养殖区域主要集中在近岸浅水海区(15 m 水深), 近年来海水养殖规模不断扩大, 导致浅水海区养殖生产承载力降低, 海水养殖从近岸浅水海区向远岸深水海区拓展, 已成为必然趋势^[27]。王光花等^[28]对远岸水域(30 m 水深)养殖的栉孔扇贝数量性状进行了相关性和通径分析, 发现在远岸水域养殖栉孔扇贝的经济效益较高。舒予等^[29]分别对近岸浅水海区(15 m 水深)和远岸深水海区(30 m 水深)养殖的二龄栉孔扇贝进行形态测量, 发现深水养殖的栉孔扇贝的整体壳形尺寸较大。

随着研究的深入和养殖产业的发展, 栉孔扇贝的养殖方式也发展为多种方式, 包括贝虾混养、贝参混养、贝藻混养以及扇贝-海参-毛蚶浅海立体综合养殖模式, 创新升级的栉孔扇贝“秋放春收”的养殖模式, 避开夏季死亡高峰期, 有效遏制了浅海栉孔扇贝养殖滑坡的现象^[30]。

4 遗传及育种研究

中国栉孔扇贝的遗传育种工作起步较晚, 90 年代之前, 其遗传基础是野生型的, 未经过系统地品种选育和品种改良工作。除养殖环境恶化等外界因素外, 繁殖群体小、长期的群内近交以及不当的育种策略会造成种群遗传多样性的降低、不良基因积累, 最终导致生长性状、品质和抗逆性都出现了明显退化。1998 年, 山东省海水养殖研究所首次从朝鲜引进栉孔扇贝野生种群, 进行了养殖、育种、中间培育、渡夏及越冬等技术研究, 培育的一龄贝成功渡夏,

成活率 86%以上, 生长速度提高 20%以上, 随后又进行了规模苗种扩繁, 均获成功^[31]。除了种质提纯与复壮外, 科研工作者开始着力于培育出生长快、品质优、抗逆能力强的养殖扇贝新品种。

选择育种是水产遗传改良工作中最为基本和常用的技术手段。栉孔扇贝的选择育种主要集中在数量性状方面。刘小林等^[32]采用通径分析方法进行了二龄栉孔扇贝壳尺寸性状对活体重的影响效果分析, 结果显示, 栉孔扇贝壳高对活体重的直接影响最大, 其次是壳长, 壳厚对活体重的直接影响最小。王冲^[33]进行了栉孔扇贝不同性别间重要经济性状比较及通径分析, 结果表明, 雌雄群体间重要经济性状及壳形态间无显著差异($P>0.05$), 雄性群体和雌性群体中对体质量直接影响最大的壳性状分别为壳长和壳高。杜美荣等^[34]对一龄和二龄栉孔扇贝的数量性状进行了相关性和通径分析研究, 结果显示, 与一龄贝湿重相关系数最大的是壳长, 壳长对一龄贝湿重的直接影响最大; 与二龄贝湿重相关系数最大的是壳高, 壳高对二龄贝湿重的直接影响最大。这些研究为栉孔扇贝性状选育提供了参数。

杂交育种是水产育种的重要途径之一。2000 年以后, 中国海洋大学、中国科学院海洋研究所、中国水产科学研究院黄海水产研究以及山东省海水养殖研究所均进行了栉孔扇贝的杂交育种技术研究工作。常亚青等^[35]和刘小林等^[36]研究了栉孔扇贝中国种群与日本种群杂交子一代的早中期发育情况, 结果显示杂交组合在早中期发育阶段均表现出了杂交优势。Liu 等^[37]比较了栉孔扇贝中国、日本和韩国三个不同地理群体杂交后代的生长和存活差异, 结果表明, 在湿重、壳长、壳高、壳宽和成活率方面杂交子代存在不同程度的杂种优势, 同时, 各互交体之间在生产性状上也存在显著差异, 本研究结果表明, 杂交是提高扇贝养殖性能和适合度(存活率)的重要手段。于瑞海等^[38]研究了栉孔扇贝与虾夷扇贝的杂交技术, 发现杂交子代在幼虫阶段有一定的生长优势, 但在附着变态时, 杂交组低于自交组。杨爱国等^[39]的研究发现, 水温 15~18 °C 条件下, 栉孔扇贝和虾夷扇贝的正、反交均可正常受精, 受精率在 90%以上, 成体形态偏向于母方, 且生产性能尤其是抗逆能力显著提高。孙长森等^[40]进行了栉孔扇贝与华贵栉孔扇贝远缘杂交的胚胎发生及幼虫生长发育研究, 结果显示, 在器官形成发育阶段, 杂交表现为负效应, 在形态变化的生长阶段, 杂交表现正效应, 存在杂

种优势现象。张哲等^[41]研究观察了栉孔扇贝♀×海湾扇贝♂受精细胞学过程和杂交后代生长发育情况,结果表明,海湾扇贝精子可以正常入卵完成受精并产生杂交子代,受精率为92.77%,卵裂率为81.46%,D形幼虫孵化率为51.23%,然而杂交组幼虫在培育到第7d时全部死亡。杂交育种工作流程繁琐,杂种优势仅维系一代,有些远缘杂交的子代一般仅在幼虫阶段存活,因此尚无能够进行产业化推广的杂交品种。

多倍体育种在水产育种中有巨大的增产潜力,栉孔扇贝三倍体育种的研究工作开始于1987年^[42-43],发展较为迅速,三倍体诱导率可稳定在80%以上,成体的三倍体率达70%左右^[44]。常用的诱导方法主要包括细胞松弛素B(CB)处理法、6-二甲基氨基嘌呤(6-DMAP)处理法、热休克法、冷刺激法、静水压法等。已有的研究结果证明,三倍体栉孔扇贝和二倍体相比,具有明显的生长优势。然而,三倍体培育遗传不稳定、需要每年诱导、操作繁琐、成本较高,现仍处于实验阶段,未达到产业化水平。

分子标记技术的不断进步,推动了扇贝育种研究的快速发展。李红蕾等^[45]利用RAPD标记对韩国栉孔扇贝和中国栉孔扇贝杂交子代不同群体的遗传结构进行比较,结果发现栉孔扇贝不同地理种群之间存在遗传分化,种内不同群体间存在杂种优势。Zhao等^[46]利用AFLP标记分析了中国4个地区栉孔扇贝多代选育群体的遗传多样性,结果显示30多年的人工选育没有降低选育群体的遗传多样性。战爱斌^[47]利用多种方法开发了315个栉孔扇贝微卫星标记,构建了栉孔扇贝的遗传连锁图谱,并在图谱上共定位了25个关于壳长、壳宽、壳高和总重相关的QTL。Zhang等^[48]成功构建了第一张栉孔扇贝高密度物理图谱,组成的图谱平均长度为490 kb,同时图谱上锚定有167个分子标记。付晓腾^[3]构建了栉孔扇贝首张高密度遗传连锁图谱,整合图谱总长1 543.4 cM,包含3 806个SNP,分布于19个连锁群,标记平均间隔为0.41 cm,基因组覆盖率达99.5%。

近几年来,栉孔扇贝育种技术研究不断取得突破性进展。包振民院士和他的科研团队在扇贝育种遗传评估、分子标记辅助育种、全基因组选择育种等方面进行了深入研究,建立基于BLUP的贝类遗传评估系统,2005年,成功培育出了高产抗逆、壳色鲜红的栉孔扇贝新品种“蓬莱红”,研发了系列新型全基因组分型技术,建成扇贝全基因组选择育种平

台。2013年,培育出新品种“蓬莱红2号”,该品种以“蓬莱红”扇贝为基础群体,经连续6代选育而成,产量较“蓬莱红”扇贝提高25.43%,进一步开发了贝类性状高通量测定技术体系。2022年,“蓬莱红3号”新品种经农业农村部审定通过,该新品种以闭壳肌重和壳高为目标性状,经连续4代选育而成,与栉孔扇贝“蓬莱红2号”相比,18月龄闭壳肌重和壳高分别提高20.3%和4.5%。系列新品种累计推广养殖100余万亩。

5 问题与展望

栉孔扇贝在生殖发育、育苗养殖、遗传学、分子生物学和新品种培育等方面研究及相关科技的发展,促进了栉孔扇贝养殖产业的恢复和振兴。但近几年来,随着养殖规模的不断扩大,规划布局不合理、养殖方式不规范等问题凸显,导致生态环境恶化、病害频发、产品质量下降和种质资源衰退等问题时有发生,严重阻碍了包括栉孔扇贝在内的贝类养殖产业的进一步发展。

栉孔扇贝养殖业今后发展应当考虑以下方面:1)调整产业结构,改善生态环境。传统的养殖理念和高密度的养殖方式,对生态环境造成的压力越来越大。只有调整产业结构、转变养殖理念、改善生态环境,栉孔扇贝养殖业才能持续稳定发展,实现社会、经济、生态效益共赢^[31]。2)加大科研投入,加强技术攻关。水产“种子”是渔业的“芯片”,利用分子标记辅助育种、诱变育种、核移植及转基因技术等育种手段,加大耐高温、抗病强的栉孔扇贝优质新品种研发。推广实行套养、轮养、休养、贝藻间养等多元化生态健康养殖模式。3)建立健全海洋生态灾害预警与监测体系。近年来,浒苔(*Enteromorpha prolifera*)、海星泛滥、经氏壳蛞蝓(*Philine kinglipini*)(俗称白泥蚂)2022年夏大量出现在胶州湾等自然灾害频发,给养殖户造成严重的经济损失。加强养殖海区自然灾害的监测和预报能力建设,布设长期固定的灾害监测站点,开展实时监测和灾害预警,防患于未然^[31]。组建栉孔扇贝抗灾复产专家团队,为突发、重大、疑难灾害的诊断、应急处置等提供技术支撑。4)保护野生自然资源,加大自然栖息地的修复。具体在资源调查的基础上,重点摸清自然种群分布现状,繁殖栖息地和育幼场的变迁,自然苗种人工采收的可持续性以及整个产业如何应对气候变化等都是关联中国栉孔扇贝发展的生态问题^[49]。5)作为滤食性贝类,从

碳视角深入挖掘栉孔扇贝在整个养殖过程中的碳汇功能^[50]、养殖的栉孔扇贝在生态系统中的功能与服务价值,尤其是扇贝加工后的大量贝壳的资源化利用,例如与牡蛎壳混合进行生态礁体开发,与牡蛎礁的资源修复相耦联等都是值得未来关注的科学问题^[51]。

参考文献:

- [1] 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[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
- [2] MN A, OKMODA V, TABATABAEI M, et al. The contributions of shellfish aquaculture to global food security: assessing its characteristics from a future food perspective[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 654897.
- [3] 付晓腾. 栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)高密度图谱构建和基因组框架图绘制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
FU Xiaoteng. High resolution linkage mapping and genome sequencing for *Chlamys farreri*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [4] 张玺, 齐锺彦, 李洁民. 栉孔扇贝的繁殖和生长[J]. *动物学报*, 1956, 8(2): 235-250.
ZHANG Xi, QI Zhongyan, LI Jiemin. The reproduction and growth of *Chlamys farreri*[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 1956, 8(2): 235-250.
- [5] 王如才, 高洁, 张连庆, 等. 栉孔扇贝自然海区采苗技术研究[J]. *山东海洋学院学报*, 1987, 17(3): 93-100.
WANG Rucai, GAO Jie, ZHANG Lianqing, et al. Studies on the techniques of collecting spats of scallop (*Chlamys farreri*) in natural sea area[J]. *Journal of Shandong College of Oceanology*, 1987, 17(3): 93-100.
- [6] 柳中传. 栉孔扇贝大面积半人工采苗生产技术研究[J]. *海洋科学*, 1985, 9(6): 45-47.
LIU Zhongchuan. Large scale semi-artificial gathering of larvae scallops for bumper harvest[J]. *Marine Sciences*, 1985, 9(6): 45-47.
- [7] 王如才, 高洁. 栉孔扇贝 *Chlamys farreri*(Jones et Preston)人工育苗试验报告[J]. *山东海洋学院学报*, 1986, 16(4): 145-153.
- [8] 杨雪舫, 孙长祥. 栉孔扇贝人工育苗的研究[J]. *海洋湖沼通报*, 1981(1): 64-70.
YANG Xuefang, SUN Changxiang. A study on the artificial rearing of (*Chlamys farreri*) spats[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1981(1): 64-70.
- [9] 廖承义, 徐应馥, 王远隆. 栉孔扇贝的生殖周期[J]. *水产学报*, 1983, 7(1): 1-13.
LIAO Chengyi, XU Yingfu, WANG Yuanlong. Reproductive cycle of the scallop *Chlamys farreri* (Jones et Preston) at Qingdao[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1983, 7(1): 1-13.
- [10] 冠宝增. 栉孔扇贝人工育苗工艺规程暂行规定[J]. *水产科学*, 1981, 1(1): 6-12.
- [11] 王兴章, 张起信. 栉孔扇贝亲贝暂养促熟技术的探讨[J]. *海洋科学*, 1988, 12(6): 63-64.
- [12] 梁玉波, 张福绥. 温度、盐度对栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)胚胎和幼虫的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(4): 334-340.
LIANG Yubo, ZHANG Fusui. Effects of temperature/salinity on development of embryos and larvae of scallop *Chlamys farreri*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(4): 334-340.
- [13] 于瑞海, 王如才, 梁英, 等. 栉孔扇贝升温育苗高产技术[J]. *海洋湖沼通报*, 1992, 14(2): 68-71.
YU Ruihai, WANG Rucai, LIANG Ying, et al. High-yield techniques of raising water temperature to cultivate larvae of *Chlamys farreri*[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1992, 14(2): 68-71.
- [14] 杜美荣. 栉孔扇贝春苗繁育与扇贝幼虫高效附着技术的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
DU Meirong. Preliminary studies on the techniques of spring seed production of *Chlamys farreri* and new treatment method for inducing the settlement of eye-spot larvae[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [15] 王玲玲, 方建光, 毛玉泽, 等. 栉孔扇贝秋季苗种培育, 生长特性的初步研究[J]. *海洋水产研究*, 2007, 28(5): 60-65.
WANG Lingling, FANG Jianguang, MAO Yuze, et al. Studies on artificial seeding rearing in autumn and its growth characteristics of scallop (*Chlamys farrei*)[J]. *Marine Fisheries Research*, 2007, 28(5): 60-65.
- [16] 王子臣. 栉孔扇贝的人工育苗与试养[J]. *动物学杂志*, 1977, 21(4): 6-9.
- [17] 罗有声. 扇贝养殖技术基础的初步研究[J]. *水产科学*, 1981, 1(2): 34-39.
- [18] 柳中传, 王云杰. 缩短栉孔扇贝养殖周期的技术探讨[J]. *海洋科学*, 1986, 10(4): 40-41.
LIU Zhongchuan, WANG Yunjie. Shortening of *Chlamys farreri* cultivation period[J]. *Marine Sciences*, 1986, 10(4): 40-41.
- [19] 于瑞海, 林治安, 毕明勇. 缩短栉孔扇贝养殖周期新措施的探讨[J]. *海洋湖沼通报*, 1994, 16(1): 74-77.
YU Ruihai, LIN Zhian, BI Mingyong. Study on new methods of shorting the culturing period of scallop, *Chlamys farreri*[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1994, 16(1): 74-77.
- [20] 宋微波, 王崇明, 王秀华, 等. 栉孔扇贝大规模死亡的病原研究新进展[J]. *海洋科学*, 2001, 25(12): 23-26.

- SONG Weibo, WANG Chongming, WANG Xiuhua, et al. New research progress on massive mortality of cultured scallop *Chlamys farreri*[J]. Marine Sciences, 2001, 25(12): 23-26.
- [21] 王崇明, 王秀华, 艾海新, 等. 栉孔扇贝大规模死亡致病病原的研究[J]. 水产学报, 2004, 28(5): 547-553.
WANG Chongming, WANG Xiuhua, AI Haixin, et al. The viral pathogen of massive mortality in *Chlamys farreri*[J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(5): 547-553.
- [22] REN W, CHEN H, RENAULT T, et al. Complete genome sequence of acute viral necrosis virus associated with massive mortality outbreaks in the Chinese scallop, *Chlamys farreri*[J]. Virology Journal, 2013, 10: 110.
- [23] 张福绥, 杨红生. 山东沿岸夏季栉孔扇贝大规模死亡原因分析[J]. 海洋科学, 1999, 23(1): 44-47.
ZHANG Fusui, YANG Hongsheng. Analysis of the causes of mass mortality of farming *Chlamys farreri* in summer in coastal areas of Shandong, China[J]. Marine Sciences, 1999, 23(1): 44-47.
- [24] 张景山. 养殖栉孔扇贝大量死亡的原因和预防对策[J]. 水产科学, 1999, 18(1): 44-46.
- [25] 陈慕雁. 栉孔扇贝 *Chlamys farreri* 生态免疫机制的基础研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2007.
CHEN Muyan. Mechanism of ecological immunity in *Chlamys farreri*[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [26] 孙慧玲, 匡世焕, 方建光, 等. 桑沟湾栉孔扇贝不同养殖方式及适宜养殖水层研究[J]. 中国水产科学, 1996, 3(4): 61-66.
SUN Huiling, KUANG Shihuan, FANG Jianguang, et al. Studies on suitable cultures depths and method for scallop in Sanggou bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1996, 3(4): 61-66.
- [27] 麦康森, 徐皓, 薛长湖, 等. 开拓我国深远海养殖新空间的战略研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 90-95.
MAI Kangsen, XU Hao, XUE Changhu, et al. Study on strategies for developing offshore as the new spaces for mariculture in China[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18 (3): 90-95.
- [28] 王光花, 蒋增杰, 方建光. 浅海远岸水域筏养栉孔扇贝数量性状的相关性及通径分析[J]. 现代农业科技, 2011, 23(19): 327-328.
WANG Guanghua, JIANG Zengjie, FANG Jianguang. Correlation and path analysis on quantitative traits of *Chlamys farreri* in offshore area[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011, 23(19): 327-328.
- [29] 舒予, 史令, 赖思琦, 等. 不同水深养殖栉孔扇贝的形态测量学研究 and 比较[J]. 水生生物学报, 2021, 45(1): 132-139.
- SHU Yu, SHI Ling, LAI Siqi, et al. Morphometric study and comparison of scallops (*Chlamys farreri*) cultured in different water depth[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(1): 132-139.
- [30] 成慧中, 王俊鹏, 马汝芳, 等. 山东省贝类养殖现状分析及发展建议[J]. 中国水产, 2020, 27(10): 67-69.
CHENG Huizhong, WANG Junpeng, MA Rufang, et al. Current situation analysis and development suggestion of shellfish culture in Shandong Province[J]. China Fisheries, 2020, 27(10): 67-69.
- [31] 李成林, 宋爱环, 胡炜, 等. 山东省扇贝养殖产业现状分析与发展对策[J]. 海洋科学, 2011, 35(3): 92-98.
LI Chenglin, SONG Aihuan, HU Wei, et al. Status analyzing and developing counter-measure of cultured scallop industry in Shandong Province [J]. Marine Sciences, 2011, 35(3): 92-98.
- [32] 刘小林, 常亚青, 相建海, 等. 栉孔扇贝壳尺寸性状对活体重的影响效果分析[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 673-678.
LIU Xiaolin, CHANG Yaqing, XIANG Jianhai, et al. Analysis of effects of shell size characters on live weight in Chinese scallop *Chlamys farreri*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(6): 673-678.
- [33] 王冲. 栉孔扇贝不同性别间重要经济性性状比较及通径分析[J]. 水产科学, 2013, 32(8): 441-446.
WANG Chong. Comparison and path analysis of important economic traits between genders of scallop *Chlamys farreri*[J]. Fisheries Science, 2013, 32(8): 441-446.
- [34] 杜美荣, 方建光, 高亚平, 等. 不同贝龄栉孔扇贝数量性状的相关性和通径分析[J]. 水产学报, 2017, 41(4): 580-587.
DU Meirong, FANG Jianguang, GAO Yaping, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of different-age *Chlamys farreri*[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(4): 580-587.
- [35] 常亚青, 刘小林, 相建海, 等. 栉孔扇贝中国种群与日本种群杂交一代的早期生长发育[J]. 水产学报, 2002, 26(5): 385-390.
CHANG Yaqing, LIU Xiaolin, XIANG Jianhai, et al. The juvenile growth and survival of hybrid between Chinese population and Japanese population of *Chlamys farreri*[J]. Journal of Fisheries of China, 2002, 26(5): 385-390.
- [36] 刘小林, 常亚青, 相建海, 等. 栉孔扇贝中国种群与日本种群杂交一代的中期生长发育[J]. 水产学报, 2003, 27(3): 193-199.
LIU Xiaolin, CHANG Yaqing, XIANG Jianhai, et al. The medium-term growth and development of hybrid between Chinese and Japanese populations of *Chlamys farreri*[J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(3): 193-199.

- [37] LIU X L, CHANG Y Q, XIANG J H. Hybridization effects of three populations of *Chlamys farreri* from China, Korea and Japan[J]. Journal of Shellfish Research, 2004, 23(2): 501-505.
- [38] 于瑞海, 包振民, 王昭萍, 等. 栉孔扇贝×虾夷扇贝的杂交技术[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 85-88.
YU Ruihai, BAO Zhenmin, WANG Zhaoping, et al. A study on hybridization between scallops *Chlamys farreri* and *Patinopecten yessoensis*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(1): 85-88.
- [39] 杨爱国, 王清印, 刘志鸿, 等. 栉孔扇贝与虾夷扇贝杂交及子一代的遗传性状[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(5): 1-5.
YANG Aiguo, WANG Qingyin, LIU Zhihong, et al. The hybrid between the scallops *Chlamys farreri* and *Patinopecten yessoensis* and the inheritance characteristics of its first filial generation[J]. Marine Fisheries Research, 2004, 25(5): 1-5.
- [40] 孙长森, 包振民, 王师, 等. 栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)与华贵栉孔扇贝(*C. nobilis*)远缘杂交子代的胚胎发生及幼虫生长发育的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(3): 227-233.
SUN Changsen, BAO Zhenmin, WANG Shi, et al. Primary study on embryogenesis and growth of distant hybrid larvae of *Chlamys farreri* × *C. nobilis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(3): 227-233.
- [41] 张哲, 于瑞海, 李玲蔚, 等. 栉孔扇贝♀×海湾扇贝♂受精细胞学观察及杂交后代生长发育的观察[J]. 海洋湖沼通报, 2018, 40(4): 58-65.
ZHANG Zhe, YU Ruihai, LI Lingwei, et al. Cytological observation on cross fertilization of *Chlamys farreri* and *Argopecten irradians* with fluorescent microscope and studies on the growth and development of filial generation[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018, 40(4): 58-65.
- [42] 王子臣, 毛连菊, 陈来钊, 等. 温度休克诱导栉孔扇贝和虾夷扇贝三倍体的初步研究[J]. 大连海洋大学学报, 1990, 5(3): 1-6.
WANG Zichen, MAO Lianju, CHEN Laizhao, et al. A preliminary study on induced triploidy in the *Chlamys farreri* and *Patinopecten yessoensis* by temperature shock[J]. Journal of Dalian Fisheries College, 1990, 5(3): 1-6.
- [43] 吕隋芬, 王如才. 细胞松弛素 B 诱导栉孔扇贝产生三倍体的研究[J]. 海洋湖沼通报, 1992, 13(2): 40-45.
LV Suifen, WANG Rucai. The study of polyploidy in the scallop, *Chlamys farreri* (Jones & Preston) by cytochalasin B[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1992, 13(2): 40-45.
- [44] 王清印, 杨爱国. 栉孔扇贝三倍体研究进展和展望[J]. 中国水产科学, 2000, 7(3): 93-96.
WANG Qingyin, YANG Aiguo. Progress and perspectives of triploid research on scallop *Chlamys farreri*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2000, 7(3): 93-96.
- [45] 李红蕾, 宋林生, 刘保忠, 等. 栉孔扇贝不同种群的遗传结构及其杂种优势[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(2): 188-195.
LI Honglei, SONG Linsheng, LIU Baozhong, et al. Studies on the genetic structure of different population of *Chlamys farreri* and their hybrids' heterosis[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(2): 188-195.
- [46] ZHAO C, LI Q, KONG L. Inheritance of AFLP markers and their use for genetic diversity analysis in wild and farmed scallop (*Chlamys farreri*)[J]. Aquaculture, 2009, 287(1/2): 67-74.
- [47] 战爱斌. 栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)微卫星标记的筛选及应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
ZHAN Aibin. Development, characterization and application of microsatellite markers in Zhikong scallop (*Chlamys farreri*) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [48] ZHANG X, ZHAO C, CHAO H, et al. A BAC-based physical map of Zhikong Scallop (*Chlamys farreri* Jones et Preston)[J]. PLoS One, 2012, 6(11): e27612.
- [49] BROITMAN B R, LARA C, FLORES R P, et al. Environmental variability and larval supply to wild and cultured shellfish populations[J]. Aquaculture, 2022, 548: 737639.
- [50] 蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 滤食性贝类养殖碳汇功能研究进展及未来值得关注的科学问题[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 106-114.
JIANG Zengjie, FANG Jianguang, MAO Yuze, et al. Research progress on the carbon sink function of filter-feeding shellfish mariculture and future scientific issues[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 106-114.
- [51] VAN DER SCHATTE OLIVIER A, JONES L, VAY LL, et al. A global review of the ecosystem services provided by bivalve aquaculture[J]. Reviews in Aquaculture, 2020, 12(1): 3-25.

Culture and breeding of *Chlamys farreri* in China: reviews and prospects

YU Dao-de, LIU Kai-kai, ZHANG Shao-chun, QIU Zhao-xing
(Marine Science Research Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China)

Received: Sep. 1, 2022

Key words: *Chlamys farreri*; seedling; culture; breeding

Abstract: The scallop *Chlamys farreri* is a type of bivalve shellfish that has high nutritional and economic value, thereby playing an important role in marine aquaculture in China. Since the 1950s, the *C. farreri* culture industry has undergone several processes involving the collection of natural seedlings, semi-artificial breeding, artificial breeding, purification and rejuvenation, and cultivation of new varieties. Thus, *C. farreri* has gradually become the main shallow sea-floating raft culture species in Northern China. In this paper, the development of *Chlamys farreri* aquaculture industry has been reviewed, briefly summarizing the process-related issues of culture and breeding and discussing the future developmental prospects.

(本文编辑: 杨 悦)