



· 综述 ·

山东省水产种业高质量发展战略研究

陈松林^{1*}, 卢 昇¹, 荣小军¹, 刘志鸿¹, 栾 生¹, 张红凤²,
廖梅杰¹, 孙秀俊¹, 隋 娟¹, 王逸翔³

(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. 山东财经大学公共管理学院, 山东 济南 250014;
3. 山东财经大学经济学院, 山东 济南 250014)

摘要: 山东是我国渔业大省, 肩负着打造“蓝色粮仓”, 构筑“海上田园”的重要使命。山东省水产种业的高质量发展, 对于贯彻落实“大食物观”, 保障我国水产品的持续、多样供给具有重要意义。本文基于文献分析、实地调研等方式, 系统地梳理了山东省水产种业发展现状, 指出了山东省水产种业在顶层设计规划、优异种质资源收集与保存、高效育种技术创新与应用、突破性新品种培育以及种业龙头企业打造等方面存在的不足, 有针对性地提出了山东省养殖鱼类、贝类、虾蟹、参藻种业以及种业经济发展的远景目标、重点任务和行动建议, 以为山东省水产种业高质量发展提供参考。

关键词: 水产养殖; 水产种业; 遗传育种; 种质资源; 育种技术

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

山东省是全国渔业大省, 是我国五次海水养殖浪潮的发源地, 形成了以鲆鲷鱼类、扇贝、牡蛎、对虾、海参和海带为特色优势的海水养殖产业。2022年山东省养殖总产量665.12万t, 占比全国养殖总产量的11.95%, 位居第二; 其中, 海水养殖产量556.08万t, 占比24.44%, 位居全国第一; 淡水养殖产量109.04万t, 占比3.31%, 位居全国第十^[1]。2022年山东省渔业产值(海水养殖、淡水养殖、海水捕捞、淡水捕捞、水产苗种)1729.70亿元, 占比11.33%, 位居全国第四^[1]。2021年, 农业农村部公布的20家水产种业“育繁推”一体化优势企业中, 山东省境内上榜7家企业, 数量位居全国第一。2022年, 山东省共有19家水产企业及机构入选国家水产种业阵型企业, 数量位居

全国第一, 包括3家破难题企业, 8家补短板企业, 4家强优势企业和4家专业化平台。目前, 山东省建有全国唯一一家国家海洋渔业生物种质资源库, 省级渔业生物种质资源库2个; 国家级水产原良种场16家, 居全国首位; 省级水产原良种场81家。全省通过国家审定的水产新品种64个, 占全国的28%。由国家投资建设的水产遗传育种中心4家, 其中海水鱼类2家, 贝类和藻类各1家。

尽管山东省已初步形成了以科研单位为支撑、以原良种场为主体、以规模化育苗场为拓展的水产种业发展体系, 但在发展现代水产种业的过程中, 依旧存在一些问题和挑战。如水产种业发展的顶层设计不够, 统筹规划不足, 缺少全面、系

收稿日期: 2024-01-24 修回日期: 2024-05-13

资助项目: 中国工程科技发展战略山东研究院咨询研究项目(202201SDZD02); 山东省泰山学者攀登计划

通信作者: 陈松林, 中国工程院院士, 从事鱼类种质保存、基因组资源发掘与分子育种研究。

E-mail: chensl@ysfri.ac.cn



统的水产种业发展战略指导; 良种选育研究与产业需求联系不够紧密; 缺乏高效育种技术平台; 政府部门、科研院所、大专院校和水产企业之间的合作欠佳; 现有水产种业企业创新不足, 难以成为种业创新的主体, 大型水产种业龙头企业缺少; 适合深远海、盐碱地等新型养殖方式的品种缺乏等问题依旧突出。山东省作为我国渔业大省, 在新形势下, 如何高质量发展现代水产种业, 实现种源自主可控, 对于打赢种业翻身仗, 贯彻落实“大食物观”, 保障种源安全和食品安全具有重要意义。

本文基于文献分析、专题研讨、实地调研等方式, 系统梳理了山东省水产种业发展的现状, 深入剖析了山东省水产种业的优势、劣势, 明晰了山东省水产种业高质量发展的短板和弱项, 据此提出山东省水产种业高质量发展的远景目标、重点任务和行动建议, 以期为山东省水产种业的高质量发展提供参考。

1 山东省水产种业发展现状

1.1 养殖鱼类

海水鱼 自中国水产科学研究院黄海水产研究所创立了大菱鲂“温室大棚+深井海水”工厂化养殖模式后^[2], 以大菱鲂 (*Scophthalmus maximus*)、牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*)、半滑舌鳎 (*Cynoglossus semilaevis*) 为代表的鲆鳎鱼类在山东省迅速发展, 形成了海水养殖业的第四次浪潮。2022年, 山东省海水鱼产量 8.38 万 t, 其中鲆鳎鱼类 3.19 万 t; 培育海水鱼苗 8.53 亿尾, 其中鲆鱼苗种 4.33 亿尾, 占全国鲆鱼苗种的 86.21%^[1]。除了鲆鳎鱼类, 山东省养殖的海水鱼类品种还有日本花鲈 (*Lateolabrax japonicus*)、红鳍东方鲀 (*Takifugu rubripes*)、石斑鱼、许氏平鲈 (*Sebastes schlegelii*)、斑石鲷 (*Oplegnathus punctatus*) 等, 分布在威海、烟台、青岛等地。截至 2023 年, 全国共培育了 19 个海水鱼类国审新品种。其中, 山东省主导培育了大菱鲂“丹法鲆”“多宝 1 号”“多宝 2 号”, 牙鲆“鲆优 1 号”“鲆优 2 号”, 半滑舌鳎“鳎优 1 号”, 云龙石斑鱼 [*Epinephelus moara* (♀) × *E. lanceolatus* (♂)] 和金虎杂交斑 [*E. fuscoguttatus* (♀) × *E. tukula* (♂)] 等 8 个海水鱼类新品种。

淡水鱼 2022 年山东省淡水鱼类养殖产量 92.18 万 t, 占全省淡水养殖产量的 84.54%, 培

育淡水鱼苗 73.95 亿尾, 主要养殖品种包括“四大家鱼”、鲤 (*Cyprinus carpio*)、鲫 (*Carassius auratus*) 和乌鳢 (*Channa argus*) 等, 主要养殖地区分布在济宁、滨州、临沂等地^[1]。目前, 山东省尚未主导培育出淡水鱼类新品种, 但与上海海洋大学、广东尼罗罗非鱼良种场联合培育了尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 新品种“新吉富”, 与广西水产科学研究院联合培育了尼罗罗非鱼新品种“壮罗 1 号”, 与江苏淡水水产研究所、全国水产技术推广总站联合培育了斑点叉尾鲴 (*Ictalurus punctatus*) 新品种“江丰 1 号”。

种业基础研究 中国水产科学研究院黄海水产研究所发现了国内首个鱼类 (半滑舌鳎) 雌性特异分子标记, 建立了鱼类遗传性别检测技术^[3]。随后, 国内相继在黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)^[4]、鲤^[5]、圆斑星鲃 (*Verasper variegatus*)^[6] 等 20 多种经济鱼类发现了性别特异标记, 引领了我国分子性控育种技术的发展。随着基因组测序技术不断发展, 中国水产科学研究院黄海水产研究所绘制了半滑舌鳎全基因组精细图谱^[7], 这是国际首个测定了全基因组序列的比目鱼类, 也是我国完成的首个鱼类基因组测序项目。之后, 中国水产科学研究院黄海水产研究所、中国科学院海洋研究所和中国海洋大学等单位相继破译了菊黄东方鲀 (*T. flavidus*)^[8]、牙鲆^[9]、日本花鲈^[10]、鞍带石斑鱼 (*E. lanceolatus*)^[11]、许氏平鲈^[12]、大菱鲂^[13]、鳃棘鲈 (*Plectropomus leopardus*)^[14]、绿鳍马面鲀 (*Thamnaconus septentrionalis*)^[15]、斑石鲷^[16]、云纹石斑鱼 (*E. moara*)^[17] 等鱼类的全基因组信息, 为揭示重要性状形成的遗传基础和分子机制解析提供了基因组资源, 为山东省重要养殖鱼类分子育种技术的建立和发展奠定了重要基础。

分子育种技术创新 中国水产科学研究院黄海水产研究所率先开展国内海水鱼类的分子育种技术研究, 建立了半滑舌鳎高雌苗种培育技术^[3]; 建立了牙鲆^[18]、半滑舌鳎^[19]、鳃棘鲈^[20] 等重要养殖鱼类抗病全基因组选择技术, 并将其应用于牙鲆“鲆优 2 号”和半滑舌鳎“鳎优 1 号”的遗传选育; 研制了国内首款鱼类抗病育种基因芯片——牙鲆 50K SNP 基因芯片“鱼芯 1 号”^[21]; 突破海水鱼类显微注射基因编辑技术难题^[22], 成功创制出“快大型”半滑舌鳎新种质, 相比正常雄鱼, 基因编辑雄鱼生长速率能够提高 4 倍以上^[23]。分子辅助性控

育种、全基因组选择育种和基因编辑育种等技术的研发和应用为山东省培育优质的养殖鱼类新品种提供了有效的技术支撑。

种质平台和育繁推体系建设 山东省现有 8 个海淡水鱼类国家级原良种场, 包括 5 个鲆鲷鱼类国家级原良种场、1 个日本花鲈国家级原良种场和 2 个尼罗罗非鱼国家级原良种场; 2 家海水鱼类种业“育繁推”一体化优势企业; 5 家国家水产种业阵型企业, 其中破难题阵型企业 1 家(日本花鲈), 补短板阵型企业 4 家(鲆鲷类 2 家, 石斑鱼 2 家); 2 家水产遗传育种中心, 均为鲆鲷鱼类。

1.2 养殖贝类

山东省拥有超过 300 km 的黄金海岸, 近海海域面积约 17 万 m^2 , 占渤海和黄海总面积的 37%。海洋滩涂面积超过 15.6 万 hm^2 , 面积占全国的 15%。山东省近海海域水质良好、饵料丰富, 非常适宜贝类的生长和繁殖, 贝类养殖品种繁多, 主要经济贝类有长牡蛎 (*Crassostrea gigas*)、栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*)、海湾扇贝 (*Argopecten irradians*)、虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*)、菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*)、紫贻贝 (*Mytilus edulis*)、皱纹盘鲍 (*Haliotis discus hannai*) 和缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 等。近几年, 山东省贝类产业发展迅速, 在苗种繁育、养殖技术、精深加工等方面均取得了巨大进展。2022 年山东省海水养殖面积为 61.75 万 hm^2 , 约占全国海水养殖总面积的 29.77%; 其中, 海水贝类养殖面积为 40.26 万 hm^2 , 约占全国海水贝类养殖总面积的 31.69%^[1]。2022 年, 山东省以扇贝、牡蛎和蛤类等为代表的海水贝类养殖产量 442.94 万 t, 约占全国海水贝类养殖总产量的 28.22%, 位居全国首位^[1]。山东省作为我国海水贝类重要的原产地, 逐渐发展成为以栉孔扇贝、海湾扇贝、虾夷扇贝、长牡蛎、菲律宾蛤仔等为主要养殖品种的产业模式, 形成了苗种扩繁、养殖、加工及销售等优势特色产业。目前, 中国海洋大学、中国科学院海洋研究所和青岛农业大学等科研机构通过选择育种和杂交育种技术培育出多个生长快、抗逆性强的扇贝和牡蛎新品种, 包括栉孔扇贝“蓬莱红”“蓬莱红 2 号”“蓬莱红 3 号”、海湾扇贝“中科红”“中科红 2 号”、杂交扇贝 (*A. irradians* × *A. purpuratus*)“渤海红”和长牡蛎“海大 1 号”“海大 2 号”“海大 3 号”“海大

4 号”“海蛎 1 号”“前沿 1 号”等, 并进行了规模化的示范推广, 养殖规模和产量逐年稳步提升, 带动了全省贝类产业的健康可持续发展。

种业基础研究 山东省主导完成了长牡蛎^[24]、虾夷扇贝^[25]、栉孔扇贝^[26]、近江牡蛎 (*C. ariakensis*)^[27] 等重要经济贝类的基因组解析。贝类基因组的解析不仅为揭示贝类重要性状形成的遗传基础和分子机制提供重要基因信息, 也为山东省沿海重要经济贝类分子育种技术的建立与优质贝类新品种的培育奠定了基础。随着高通量测序技术的飞速发展, 通过应用简化基因组、重测序、转录组、代谢组等技术手段, 构建了扇贝、牡蛎等多种贝类的高密度遗传连锁图谱, 从全基因组水平鉴定出一批与贝类重要经济性状关联的分子标记, 定位到多个与贝类生长、壳色、抗逆、品质等重要性状形成相关的功能基因, 为贝类重要性状形成的遗传解析及贝类分子育种提供重要的科学依据。

育种技术创新 选择育种、杂交育种、细胞工程育种等传统育种技术得到广泛应用, 并取得显著成效。近年来, 我国贝类育种专家通过传统选择和杂交育种方法, 采用群体和家系选育相结合的方式, 培育出多个具有优良性状的贝类新品种, 大力推动了我国海水贝类种业的发展。如“海大 1 号”“海大 2 号”“海大 3 号”“海大 4 号”“前沿 1 号”等长牡蛎新品种的成功培育, 从根本上优化了山东省牡蛎养殖结构, 带动牡蛎加工和深加工、出口贸易等相关产业。同时, 分子标记辅助育种、全基因组选择等新一代育种技术也取得了重要进展。在全基因组选择育种技术方面, 中国海洋大学包振民院士团队开发出 2b-RAD 简化基因组分型技术, 建立了贝类全基因组选择技术和全基因组育种网络评估分析系统, 成功培育出第一个利用全基因组选择育成的贝类新品种——栉孔扇贝“蓬莱红 2 号”^[28-29]。随后, 栉孔扇贝“蓬莱红 3 号”“蓬莱红 4 号”和海湾扇贝“海益丰 11”“海益丰 12”等贝类新品种也相继通过全基因组选择技术培育成功, 引领了世界贝类分子育种技术的发展。

种质资源保护和育种体系建设 山东省拥有国家级贝类遗传育种中心和原良种场 2 处, 包括山东省蓬莱虾夷扇贝良种场和中国海大扇贝遗传育种中心, 国家级贝类种质资源保护区 16 处, 省级良种场 13 家, 种业领军企业 5 家。通过建立国家级和省级贝类种质资源保护区、原良种场

和遗传育种中心, 扩大了贝类种质资源保护的规模和规模, 为我国贝类种质资源的高效保护和开发利用发挥了重要作用。借助传统育种技术和现代分子育种技术, 通过产学研相结合加快了贝类新品种的培育进程及养殖示范, 有效支撑了山东省乃至全国贝类养殖业的健康发展。

1.3 养殖虾类

山东省养殖虾类主要包括斑节对虾 (*Penaeus monodon*)、中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*)、日本囊对虾 (*Marsupenaeus japonicus*) 等适宜海水养殖种类, 克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*)、日本沼虾 (*Macrobrachium nipponense*)、罗氏沼虾 (*M. rosenbergii*) 等适宜淡水养殖种类, 以及凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 等适宜海淡水养殖种类。

2022年, 山东省拥有 11 万 hm^2 虾类池塘养殖面积和 500 万 m^2 工厂化养虾面积, 主养地区分布在滨州、东营、潍坊、日照、烟台、威海等沿海地区^[1]。2022年山东省虾类育苗量 4 910 亿尾, 其中凡纳滨对虾苗量 3 884 亿尾、占全省虾类育苗量的 79.1%^[1]。山东省凡纳滨对虾海淡水养殖产量分别为 17.34 万 t、7.65 万 t, 分别占全国海淡水养殖产量的 12.94%、10.08%; 山东省斑节对虾养殖产量 1 174 t、中国明对虾养殖产量 7 178 t、日本囊对虾 2.07 万 t、罗氏沼虾 143 t、日本沼虾 782 t、克氏原螯虾 6 万 t^[1]。相比较其他虾类, 无论从苗种生产量上还是养殖产量上, 凡纳滨对虾是山东省虾类繁育和养殖的支柱品种。截至 2023 年, 山东省主导培育了虾类新品种 12 个, 包括中国明对虾“黄海 1 号”“黄海 2 号”“黄海 3 号”“黄海 4 号”“黄海 5 号”“黄海 6 号”, 凡纳滨对虾“壬海 1 号”“科海 1 号”“广泰 1 号”“渤海 1 号”, 脊尾白虾 (*Palaemon carinicauda*)“科苏红 1 号”“黄育 1 号”, 上述新品种主要由中国水产科学研究院黄海水产研究所和中国科学院海洋研究所等单位选育。

育种技术创新 建立了具有自主知识产权的水产动物多性状复合育种技术体系^[30]; 建成国际首个水产生物的全基因组选择育种平台; 在国际上率先完成了凡纳滨对虾全基因组图谱绘制^[31]; 建立了国际首个凡纳滨对虾 600K 高密度 SNP 芯片“中科芯 1 号”, 并建立了基于靶向测序技术的 10K SNP 芯片“中科芯 2 号”、1.5K SNP 芯片“中科芯 3 号”及多款中低密度 SNP 芯片^[32-35]; 研制出我国首个商业化液相育种芯片“黄海芯 1 号”(55K

SNP)^[36]。

扩繁技术研发 建立了“种虾双循环养殖技术”, 研发出可替代鲜活饵料的“种虾营养料”和“苗期营养料”。

种质平台和育繁推体系建设 全省拥有国家级中国明对虾良种场 1 家, 省级凡纳滨对虾良种场 3 家, 省级中国明对虾良种场 3 家, 省级日本囊对虾良种场 1 家, 省级脊尾白虾良种场 1 家, 省级对虾种业领军企业 3 家, 国家种业振兴企业 3 家, 虾类苗种规模化繁育企业 20 余家。通过产学研相结合, 虾类新品种的育成和示范养殖有效支撑了山东省乃至全国虾类养殖业的健康发展, 初步构建了虾类育繁推体系。

1.4 养殖蟹类

山东省养殖蟹类主要包括三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*) 和中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*), 其中三疣梭子蟹为海水养殖品种, 中华绒螯蟹为淡水养殖品种。近年来, 东营、烟台、日照、青岛等地开展了拟穴青蟹 (*Scylla paramamosain*)、日本蟳 (*Charybdis japonica*)、堪察加拟石蟹 (*Paralithodes camtschaticus*) 试养, 但养殖面积较小, 尚未形成规模化养殖, 其中日本蟳和堪察加拟石蟹主要是以捕捞野生成蟹进行暂养为主。

2022年, 山东省三疣梭子蟹养殖面积 6 993 hm^2 ^[1], 位居全国第二位, 养殖区域主要包括潍坊、烟台、东营、日照、青岛、滨州、威海等, 养殖模式以室外海水池塘混养为主, 包括虾-蟹、虾-蟹-贝、蟹-参、虾-蟹-贝-鱼等; 山东省中华绒螯蟹养殖产量 2.14 万 t^[1], 位居全国第五位, 养殖区域主要包括济宁、东营、泰安、枣庄、青岛、滨州、菏泽、德州、淄博等, 养殖模式包括稻田养殖、池塘养殖、大水面养殖等, 以单养为主, 有些养殖户套养凡纳滨对虾; 山东省拟穴青蟹养殖产量 278 t^[1], 养殖区域主要包括青岛、东营等, 养殖模式以室外海水池塘“虾-蟹”混养为主。山东省三疣梭子蟹种蟹、苗种在全国具有重要地位, 良种种蟹和苗种培育数量居全国首位, 三疣梭子蟹良种覆盖率居于全国前列。山东省三疣梭子蟹良种以“黄选 1 号”“黄选 2 号”为主, 种蟹主要由山东省昌邑市海丰水产养殖有限责任公司、中国水产科学研究院下营增殖实验站培育, 年培育种蟹 4 000 只以上, 良种扩繁在潍坊、日照、青岛、烟台等水产育苗企业完成, 除供应山东省养殖外,

还辐射推广至河北、江苏、浙江等养殖区。中华绒螯蟹种蟹以山东省本地养殖或野生种蟹为主, 其中大眼幼体育苗场主要分布在东营、滨州等地, 扣蟹育苗场主要分布在泰安、东营、枣庄等地; 缺口部分中华绒螯蟹苗种来自江苏等地^[37]。拟穴青蟹种蟹、苗种主要来自浙江等地, 目前中国水产科学研究院下营增殖实验站、山东省中朗海洋科技有限公司等开展了青蟹室内越冬、种蟹培育、苗种繁育及养殖技术研究, 为产业的发展贡献了力量。

从全国来看, 中国水产科学研究院黄海水产研究所、中国科学院海洋研究所等率先开展了三疣梭子蟹遗传育种研究, 目前全国培育三疣梭子蟹国审新品种 3 个: 快速生长新品种“黄选 1 号”、耐低盐新品种“黄选 2 号”和抗溶藻弧菌 (*Vibrio alginolyticus*) 新品种“科甬 1 号”。其中, “黄选 1 号”和“黄选 2 号”为山东省独自培育的 2 个新品种, 由中国水产科学研究院黄海水产研究所联合昌邑市海丰水产养殖有限责任公司育成; “科甬 1 号”为合作培育新品种, 由中国科学院海洋研究所联合宁波大学育成。全国培育中华绒螯蟹国审新品种 6 个, 山东省未参与研发。全国培育拟穴青蟹国审新品种 1 个, 山东省未参与研发。

育繁推体系建设, 山东省拥有全国唯一一家国家级三疣梭子蟹良种场, 省级三疣梭子蟹原良种场 6 家, 省级中华绒螯蟹良种场 2 家, 三疣梭子蟹国家种业振兴企业 1 家, 省级三疣梭子蟹种业领军企业 1 家。

1.5 养殖海参

海参是我国重要的海水养殖物种, 是我国药食同源的水产物种的典范^[38]。我国可食用的海参约 20 种, 其中仿刺参 (*Apostichopus japonicus*) 是海参的主养品种^[39]。进入 21 世纪, 仿刺参规模化养殖技术的突破和广泛推广, 使得养殖产量大幅提升, 实现了仿刺参由高档海珍品向大众餐饮食材的转变, 成为丰富百姓菜篮子的重要品种。此外, 由于其营底栖生活的生物学习性, 以摄食海底丰富的有机质为主, 起到利用、转运有机物和碳汇的生态作用, 稳定海洋底栖生态环境^[40]。不仅在海洋牧场的生态位方面发挥着重要作用, 也是海洋牧场产生良好效益和可持续发展的当家品种^[41-43]。

自 20 世纪 80 年代仿刺参人工规模化繁育技术突破以来, 仿刺参养殖技术日趋成熟, 加工技

术不断进步, 海参产业呈现出蓬勃发展的趋势。2003 年以来海参的养殖总产量和面积一直处于持续增长的趋势, 总产量从 2003 年的 4 万 t 达到 2022 年的 24.85 万 t, 目前养殖产业产值超 300 亿元^[1]。随着我国仿刺参养殖产业的蓬勃发展, 形成了从育苗、养殖、增殖、饲料及投入品到产品加工、流通和市场消费的完整产业链, 是水产业领域中专业化分工水平最高的养殖物种, 全产业链产值估算超 1000 亿元, 是第五次海水养殖浪潮的当家品种。山东省拥有烟台、威海、青岛等原主产区和东营、滨州等仿刺参养殖新兴产业区, 区域养殖面积占全国海参养殖面积的 32.84%, 养殖产量占 40.31%, 其中仿刺参苗种供应量占全国苗种供应量的 63.45%, 具有养殖单产高、苗种供应基地集中的特点, 是全国海参产业苗种供应的核心产区^[1]。目前, 山东省主导培育出仿刺参新品种 7 个, 以生长速率为选育指标的“崆峒岛 1 号”、以体重和疣足数量为目标性状的“安源 1 号”、以体重和度夏成活率为目标性状的“东科 1 号”、以体重和抗病性为目标性状的“参优 1 号”、以体重和养殖成活率为目标性状的“鲁海 1 号”、以体重和耐低盐为目标性状的“鲁海 2 号”及以高温耐受力 and 体重为目标性状的“华春 1 号”。山东省海参良种覆盖率约为 68%, 良种的增产贡献率达到 39%, 海参种业整体处于国内领先水平, 奠定了山东省作为全国仿刺参种业中心的产业地位。

种业基础研究 山东省拥有中国水产科学研究院黄海水产研究所、中国科学院海洋研究所、山东省海洋科学研究院、鲁东大学等育种技术优势科研单位, 在仿刺参育种技术、新品种和种业发展等方面实现了很多“零突破”。中国科学院海洋研究所首次完成仿刺参基因组组装和拼接^[44], 并于 2023 年组装出一套更完整的基因组^[45]。21 世纪以来, 微卫星和 SNP 等分子标记的研究在仿刺参中日趋成熟^[46-48], 大力推动了仿刺参表观性状 QTL 定位^[49-50]、遗传连锁图谱构建^[51]和抗病抗逆机制解析等方面的研究进展^[52-53], 为仿刺参优良种质的培育及分子育种技术的发展提供了丰富的数据基础。

种质平台和育繁推体系建设 山东省建有国家级仿刺参原种场 3 家、国家级仿刺参良种场 2 个、省级仿刺参原种场 3 家、省级仿刺参良种场 4 家和国家级仿刺参水产种质资源保护区 4 个, 拥有山东省安源种业科技有限公司、青岛瑞滋集团有限公司、山东省好当家海洋发展股份

有限公司等海参种业龙头企业, 建成了较为完善的“育繁推”一体化的技术体系。

1.6 养殖藻类

2022年全国养殖海藻总产量272.39万t, 其中山东省养殖海藻总产量62.9万t, 占全国总产量的22%^[1]。山东省主要的海藻养殖种类包括海带(*Saccharina japonica*)、龙须菜(*Gracilariopsis lemaneiformis*)、条斑紫菜(*Neoporphyra yezoensis*)和裙带菜(*Undaria pinnatifida*), 其中以江蓠(*Gracilariaceae*)和海带为主, 2022年江蓠总产量25.3万t, 占山东省养殖海藻总产量的40.2%, 海带总产量23万t, 占山东省养殖海藻总产量36.5%, 裙带菜5.2万t(8.2%), 紫菜1.3万t(2.1%)^[1]。山东省培育出“海清1号”“海清2号”“东方2号”“东方3号”“东方6号”“东方7号”“荣福”“爱伦湾”“黄官1号”等多个海带新品种, 裙带菜新品种“海宝1号”和“海宝2号”, 龙须菜有“2007”和“鲁龙1号”。

种业基础研究 2015年中国水产科学研究院黄海水产研究所发起并主持实施了大型褐藻基因组计划, 解析了世界上首个海带基因组图谱及16个不同地理群体的重测序, 为后续的驯化基因选择及优质品种选育提供了重要的遗传基础^[54]。我国科学家在国际上首次完成了裙带菜野生与栽培主要群体的遗传结构和基因流特征分析、全基因组测序、高密度遗传连锁图谱的构建以及性别决定位点的定位^[55], 同时首次发现并报道了雌雄同体单倍体的现象, 发展了雌雄孢子体杂交育种的技术方法^[56]。2022年中国海洋大学研究团队率先破解了龙须菜的基因组, 并建立了通过基因枪转化Cas12a蛋白与gRNA复合体的技术, 大大简化了实验流程。CRISPR/LbCas12a系统是一种高效的基因编辑手段, 目前已经成功地应用于多个物种中, 实现了基因敲除、激活或抑制。研究团队在大型海藻龙须菜中实现CRISPR/LbCas12a基因编辑, 为龙须菜的基因功能研究提供了重要的技术手段, 对遗传育种具有重要意义^[57]。

育种技术创新 山东省是全球最早开展海带遗传育种研究和产业实践的省份。自20世纪60年代初期开始, 先后创建了海带选择育种、杂交育种和远缘杂交育种、杂种优势利用、分子辅助选择育种等技术, 先后培育出“海清1号”“海清2号”“东方2号”“东方3号”“东方6号”“东方7号”“荣福”“爱伦湾”“黄官1号”等多个海带新品种, 为山东省和我国海带养殖业的提质增效奠定了品

种基础^[58]。两个裙带菜国审新品种“海宝1号”和“海宝2号”, 由中国科学院海洋研究所与大连海宝集团采用单倍体克隆杂交结合定向选育的方法共同培育完成, 做到了裙带菜核心种质材料独立自主, 并终止了从海外引种的历史。龙须菜主要采用诱变育种, 通过化学诱变剂N-甲基-N'-硝基-N-亚硝基胍(MNNG)进行诱变处理, 培育出三个国审新品种“981”“2007”和“鲁龙1号”。“981”具有耐高温、抗逆速生、琼胶含量高等优点, “2007”在耐高温、琼胶含量和品质等方面有提升。“鲁龙1号”弹性大, 抗风浪能力强, 生长优势明显, 产量比传统栽培品种提高15%~30%, 蛋白质含量比传统品种增加12%^[59]。

种质平台和育繁推体系建设 海带种质保存有两条途径, 一是依托高校和科研院所建立的种质库保存海带的雌、雄配子体, 二是依托国家和省级良种场保存海带种菜和雌雄配子体。中国科学院海洋研究所和中国海洋大学分别建立了大型海藻种质库; 中国水产科学研究院黄海水产研究所的国家级海洋渔业生物种质资源库中, 建有大型藻类细胞库。目前山东省共有国家级海带良种场2家, 省级海带良种场1家, 水产遗传育种中心1家, 国家级裙带菜养殖加工标准化示范区1个。

1.7 种业经济

2022年全国水产苗种产值为843.45亿元, 占全国渔业产值的5.52%, 比2021年增加了13.54%; 其中, 山东省水产苗种产值78.33亿元, 占比全省渔业产值的4.53%, 位居全国第二^[1]。近十年来, 全国水产苗种产值在渔业产值中占比大多稳定在5%~6%, 未出现较大波动。山东省水产种业发展紧跟全国水平, 水产苗种产值逐年攀升, 并且在全省渔业产值中占比的波动也较为平稳。山东省水产种业在渔业产值中的占比围绕全国层面上下波动, 不仅说明山东省水产种业发展情况与全国水平趋于一致, 也说明山东省水产种业经济发展水平基本达到国家对于省份层面水产种业的要求。

山东省水产种业经济发展势头良好, 是政府、科研院所、企业三方联动的正向成果。首先, 山东省政府积极响应国家“大力实施种业自主创新工程”“全面实施种业振兴行动方案”“深入实施种业振兴行动”等战略方针, 围绕水产种业提质增效转型升级、强化良种繁育基地建设、“育繁推”一体化联合育种平台构建以及水产龙头企业培养等方

面制订了一系列发展规划, 为水产种业经济快速发展提供了政策保障。

其次, 政府大力支持水产育种的基础性、前沿性和应用性研究, 成立“农业良种工程项目”“农业良种工程种业企业创新能力提升”“重大科技创新工程”等重点研发项目, 鼓励企业和科研院所开展科技创新和优良品种联合培育, 为水产种业经济可持续发展提供了原动力。

最后, 山东省水产商业化育种体系日趋成型。商业化育种体系建设可以提升水产种业经济的高效性、适应性和可持续性, 进而推动水产种业经济高质量发展。高效性方面, 商业化育种体系能够有效联动企业、高校和科研院所, 促进产学研深度融合, 推动水产种业的转型升级。适应性方面, 同传统育种相比, 商业化育种体系始终以市场需求为导向, 能够实现育种资源共享, 加速打造联合育种平台, 培育合适的水产苗种。可持续性方面, 商业化育种体系能够带动苗种、养殖、加工、物流等多个产业的发展, 助力打造水产种业“全产业链”, 确保水产种业的自主可控和可持续。目前, 山东省拥有 7 家水产种业“育繁推”一体化优势企业和 19 家国家水产种业振兴企业, 数量均居全国首位。此外, 省内还遴选出了山东好当家海洋发展股份有限公司、威海长青海洋科技股份有限公司、烟台开发区天源水产有限公司、微山县南四湖渔业有限公司、邦普种业科技有限公司、昌邑市海丰水产养殖有限责任公司、山东省蓝色海洋科技股份有限公司等 26 家省级水产种业领军企业, 助力山东省建设以企业为主体的商业化育种体系, 为山东省水产种业经济高质量发展奠定了基础。

2 山东省水产种业高质量发展短板

2.1 缺乏系统性的水产种业顶层设计

种业是现代农业、渔业发展的基础, 种业作为农业有效稳定发展的源头, 需要将种业做精做好。山东省作为我国水产大省, 目前还缺少系统性的水产种业发展顶层设计。与国外水产种业相比, 山东省在水产种业科技创新、种质创制、育种平台建设、龙头企业培养、“产学研”深度融合、水产种业全产业链打造等方面缺乏系统性的顶层设计, 需要全局谋划山东省水产种业的高质量发展。

2.2 优异、特色种质资源收集、鉴定、挖掘与保存不足

种质资源是保障优异良种可持续供给的基础性资源, 尽管山东省建有国内数量最多的国家级原良种场, 但目前主养鱼、虾、蟹、贝、藻、参等都不同程度地面临着种源不清晰、遗传多样性低、种质衰退、种质资源鉴定评价不足、优异种质挖掘不够等问题。此外, 国家级原良种场还面临引种难度大、保育成本高等问题。

养殖鱼类 鲆鳎鱼类是山东省的优势养殖种类, 拥有大菱鲆、牙鲆、半滑舌鳎、欧洲黄盖鲽 (*Limanda limanda*) 等国家级原良种场 5 家, 同时建立了相应的基因、细胞和活体种质保存技术。游泳型鱼类中, 建有日本花鲈、许氏平鲈、尼罗罗非鱼等国家级原良种场, 而斑石鲷、乌鳢等特色养殖品种缺乏核心种质资源。虽然山东省培育了多个鱼类新品种, 但抗病、抗逆、高产、优质的种质资源发掘仍然不足, 同时缺少适合深远海养殖的品种。

养殖贝类 由于长期缺乏系统有效的育种工作, 山东省沿海贝类育苗场所用亲本大多源于未经遗传改良的养殖亲本, 生长缓慢、成活率低、抗逆性差等问题突出。虽然国内科研机构已培育出多个贝类新品种, 但抗逆贝类新品种仍十分匮乏, 部分海区存在生长慢、肥满度低、大规模死亡等现象。尤其对于菲律宾蛤仔等滩涂贝类, 苗种主要来自福建省, 山东省本地苗种衰退, 制约了山东省贝类产业的高质量发展。

养殖虾蟹 山东省仅有 1 家中国明对虾国家级良种场、1 家三疣梭子蟹国家级良种场, 而凡纳滨对虾、斑节对虾和日本囊对虾缺乏国家级核心种质资源。凡纳滨对虾作为山东省主要的养殖虾类, 在我国没有自然种群分布, 需不定期从原产地引入部分野生亲本或优异种质提高育种基础群体的遗传多样性, 种质资源缺口大。中国明对虾自然分布于中国的黄、渤海海域及朝鲜半岛沿海等。此外, 克氏原螯虾作为山东省仅次于凡纳滨对虾的养殖虾类, 也面临野生资源匮乏、种苗供应能力不足、种苗质量下降等诸多问题, 优质种苗的供给能力和供给数量成为限制产业规模扩增产的瓶颈问题。

养殖参藻 目前野生仿刺参原种资源显著降低, 并且仿刺参可实现种质延续应用的保存方法仅有活体保存一种形式, 未突破仿刺参生殖细

胞保存、胚胎保存等技术, 原种和良种的种质延续保存难度大、风险高。山东省养殖的藻类种质遗传代表性不够丰富, 多数品种的种质资源库建设数量不足, 品种混杂情况突出, 对品种混杂所带来的生物学、生态学效应所知甚少。

2.3 现代育种技术体系建立滞后

育种理论与技术的创新是提高种业核心竞争力的关键要素, 目前山东省水产育种技术处于由传统育种技术向分子育种技术迭代的过渡阶段, 整体低于国际先进水平, 尚未建成现代育种技术体系。

养殖鱼类 仅在少数鲆鲷鱼类中具备较为完善的育种理论和分子育种技术, 大部分主养鱼类没有建立相应体系。随着养殖需求和养殖模式日趋多样化, 抗病、抗逆、优质的鱼类新品种紧缺, 适合深远海网箱、工船等新型养殖模式的鱼类品种缺乏。因此, 需要借助多组学分析技术解析重要经济性性状, 形成完整的原创性育种理论; 需要加速全基因组选择、基因编辑等先进分子育种技术的产业化应用, 推动山东省养殖鱼类现代育种技术体系的建立。

养殖贝类 许多种类存在生长速率慢、抗逆性差、病害加重等问题。然而, 山东省养殖的经济贝类品种繁多, 生长和抗逆的遗传机制十分复杂, 遗传机制解析难度较大。目前, 对于山东省特色优势贝类的育种研究明显滞后于生产, 遗传基础理论研究相对薄弱, 尤其是贝类基因信息资源仍不完善, 基因组组装质量参差不齐, 重要经济性性状的遗传决定机制尚不明确, 极大限制了基因组技术在贝类育种中的应用。

养殖虾蟹 缺少无特定病原 (specific pathogen free, SPF) 苗种培育技术, 亲本扩繁与苗种培育技术标准化程度低, 没有形成成熟稳定的 SPF 苗种规模化扩繁技术, SPF 亲本和苗种产能受限, 种苗质量、数量不稳定, 导致山东省虾蟹种业发展在制种、繁种上“卡脖子”; 缺少“育繁推”一体化企业, 一定程度上导致产业发展牵引力不足, 阻碍山东省虾蟹种业高质量发展。此外, 山东省蟹类育种以传统选育技术为主, 缺乏全基因组选择育种、基因编辑等高效分子育种技术, 导致选育效率偏低, 抗病良种培育进展缓慢。

养殖参藻 仿刺参新品种培育工作相对于其他经济水产生物开展时间较晚, 与畜禽和鱼虾等物种的现代育种技术体系相比, 仿刺参的前沿

育种技术缺乏, 现代育种体系不健全, 对山东省海参种业的核心技术支撑力不足。当前, 仿刺参品种培育仍以传统选择育种和杂交育种为主, 育种进展缓慢、效率低下, 制约了仿刺参良种选育工作的有效推进, 亟须开展仿刺参育种芯片、全基因组选择育种等前沿育种技术, 加快建立精准育种技术体系, 提升育种效率。山东省养殖藻类育苗缺乏高效、集约化的种苗培育技术工艺, 难以满足规模化海藻养殖的需要, 苗种繁育技术效率总体较低, 以传统技术为主。

2.4 满足不同养殖需求的突破性新品种缺乏

山东省培育的新品种多以快速生长为主要目标性状, 而具有抗病、抗逆、高品质的突破性新品种少, 存在“良种不良”“有种无业”的问题。近年来, 养殖过程中出现的种质退化、生长缓慢、养殖周期长、病害频发、抵御环境变化能力差等问题成为制约产业发展的原因。随着全球气候变化加剧、新型养殖模式出现, 现有品种难以满足养殖业快速发展的需求。如缺少生长速率快、抗病、抗应激能力强、适合深远海网箱或养殖工船的适养鱼类良种; 缺少针对大水面生态养殖和适合工厂化养殖的对虾良种; 缺少抗病的三疣梭子蟹良种; 缺少山东省自主培育的中华绒螯蟹、拟穴青蟹良种; 缺少具有生长快、抗逆强、多刺、出皮率高、刺型佳等多种优势性状的仿刺参良种; 缺少高产、优质、抗逆(病)的藻类良种。

2.5 现代水产种业集群尚未形成

山东省水产养殖企业数量超过 5 000 家, 而在 2022 年由农业农村部择优确定为水产种业领军企业的只有 26 家单位, 山东省水产种业行业规模小、分散的问题已经存在很长时间, 这不仅制约了整个行业的健康发展, 也限制了企业在市场竞争中的地位和发展空间。小规模企业生产效率低, 生产成本较高、资源配置不合理、监督管理难度大, 在市场竞争中往往处于劣势, 难以促进行业技术水平的提高, 产品质量无法得到保障。目前, 山东省水产种业行业具有实力和影响力的龙头企业较少, 大部分都是小型企业, 无法形成规模效应和集聚效应, 限制了水产种业经济的高质量发展。

3 山东省水产种业高质量发展建议

3.1 远景目标

养殖鱼类 建立种质资源收集、鉴定、保

存等关键技术, 实现山东省特色优质养殖鱼类原种、良种、野生种的有效收集和保存; 建立多组学分析技术, 规模化发掘重要性状关键基因, 解析性状形成的遗传基础与分子机制, 实现原创性育种基础理论的突破; 综合利用生物技术和信息技术, 实现全基因组选择、基因编辑、分子设计等高效育种技术的产业化应用, 快速改良高产、抗病、抗逆等优良性状, 培育出适合陆基工厂化、深远海网箱、工船等不同养殖模式的山东省特色优质鱼类新品种; 建立“产学研”相结合, “育繁推”一体化的现代育种体系, 培养一批国内领先、具有国际竞争力的鱼类种业龙头企业。

养殖贝类 以国家需求为导向, 立足山东省贝类产业现状, 聚集产学研优势力量, 按照“创新引领、有效供给、绿色发展”的原则, 建立贝类种质资源评价技术, 构建贝类现代育种技术体系和标准化制种技术, 打造贝类种质创制和遗传鉴定技术创新中心, 促进山东省本地苗种行业的规范化发展, 突破贝类育种关键技术, 将传统的贝类养殖业提高到一个新的层次, 优化山东省当前的贝类养殖结构, 提高山东省海水养殖贝类的良种覆盖率, 引领山东省海洋渔业高质量发展新业态, 实现由贝类养殖大省向贝类养殖强省的转变。

养殖虾蟹 建成世界虾蟹种质资源保存中心, 实现山东省凡纳滨对虾、三疣梭子蟹等主要养殖虾蟹种类的活体及基因资源保存; 创建处于国际领先水平的国家级虾蟹联合育种中心, 实现主要养殖虾蟹种类良种的自主化培育; 构建完善的“育繁推”一体化种业体系, 凡纳滨对虾等引进种自主培育良种的市场占有率达到 50% 以上, 三疣梭子蟹等本地种的良种覆盖率达到 100%。

养殖参藻 仿刺参全基因组育种技术取得突破性进展; 种质资源保护和创新利用全面加强, 培育具有目标优势性状新品种 3~5 个; 拓展建立“陆基+海基”的苗种培育新模式; 打造国家级种业平台、科企协同发展联合体 2~3 家, 建成现代水产种业集聚区 1 个; 养殖良种覆盖率达到 80% 以上, 夯实山东省种业领军地位。

广泛收集藻类野生种质资源, 提高海带等重要养殖经济藻类的遗传多样性; 培育耐高温酸化等抗逆抗病新品种, 提高藻类应对气候变化的能力; 建立巨藻、多肋藻等经济藻类的种质收集保存技术、苗种培育技术和人工养殖技术, 拓展和丰富山东省养殖海藻的种类。

种业经济 以水产种业经济高质量发展建设种业强省, 大力实施水产良种工程和水产良种工程攻坚行动, 开展种源“卡脖子”技术攻关, 保护和利用好种质资源, 加强种质库建设。推进国家区域性水产基因库、国家区域性良种繁育基地建设。做好水产良种产学研结合, 大力推广水产良种研究最新科研成果, 提高科研成果转换率, 实现水产种业经济持续发展。力争到 2030 年, 山东省水产种业产值增幅超过 50%, 苗种产量提高 60%, 优质苗种数量提高 30%, 新建国家级水产原良种场 10 家, 新增水产种业领军企业 20 家。

3.2 重点任务

养殖鱼类 建立种质资源精准鉴定和高效评价技术, 实现 3~5 种山东省特色优质养殖鱼类种质资源的有效收集和保存; 建立种用基因高效挖掘技术, 鉴定高种用价值的基因和调控元件 30~50 个, 揭示生长、抗病、抗逆等重要经济性性状形成的分子机制; 建立易于产业化应用的全基因组选择育种技术 2~3 项, 建立鱼类高效基因编辑育种技术 2~3 项, 突破分子设计育种关键技术难关; 创制具有高产、抗病、抗逆等优异性状, 并且满足不同养殖需求的优质突破性新品种 8~10 个, 助力山东省养殖鱼类种业高质量发展。

养殖贝类 收集和保存山东省重要经济贝类的种质资源, 构建贝类表型、基因型的种质资源数据库, 建立贝类种质资源鉴定与评价技术, 建立健全山东省贝类原产地保护区、原良种场及优良苗种繁育基地, 加强对山东省重要经济贝类原良种的资源保护和养护, 深入解析贝类重要性状形成的分子机制, 研发分子育种技术在贝类育种中的应用, 综合运用选择育种、杂交育种、三倍体育种及分子育种等技术加快贝类育种进程, 培育具有高产、优质、抗逆性强的贝类新品种, 推动山东省贝类养殖产业的高质量发展。

养殖虾蟹 加快推进山东省虾蟹种质资源库建设, 加强虾蟹种质资源的收集和保存力度, 突破种质保存的关键技术, 构建遗传变异丰富的虾蟹活体种质资源库 1~2 个, 建立育种核心群体 2~3 个; 研发生长、抗病、品质等重要经济性性状的高通量表型和基因型测定新技术, 创新全基因组选择、基因编辑等多组学育种技术, 搭建联合育种平台, 培育生长速率快、抗性强、品质优的突破性新品种 2~3 个; 突破优质 SPF 亲本和苗种

扩繁生产关键技术, 建设高标准制繁种基地, 规模化标准化生产优质种苗; 创建品种测试分析中心, 研究自动化和数字化智慧渔业养殖新技术, 研发与良种配套的高健康养殖技术工艺, 实现标准化养殖管理, 确保山东省虾蟹种业高质量可持续发展。

养殖参藻 建立仿刺参现代育种技术体系, 在优化选择育种、杂交育种和分子标记辅助育种技术等常规育种技术的基础上, 探索建立仿刺参全基因组选择育种和基因编辑等前沿育种技术; 以市场需求、环境需求和养殖目标需求为导向, 培育具有多刺、适温广、抗病、出皮率高等多种优良经济性状的优势仿刺参新品种; 打造商业化育种体系, 整合科研院所、推广站、龙头企业等产业上下游创新与应用主体, 形成“研、推、用”产学研深度融合机制, 打造以企业为主体的商业化育种技术体系, 集成打造仿刺参良种育、繁、推技术体系和产业化推广平台, 全面提升仿刺参种业自主创新能力和综合竞争力。

收集海带等重要藻类经济物种野生型种质资源, 通过性状和遗传多样性评估, 构建核心种群, 丰富山东省经济藻类遗传多样性。建立符合我国种业产业发展战略需求的重要经济藻类种质中长期保存技术, 为种质保存和新种质创制提供技术支撑。面对气候变化对海藻养殖业影响日益增大的现状, 开展重要经济藻类抗逆抗病关联机制解析, 为新种质创制提供理论基础。建立基于基因编辑等的藻类新种质创制新技术, 培育抗病、抗逆新品种。开展巨藻、多肋藻等经济藻类新品种的养殖, 丰富山东省藻类养殖品种。

种业经济 进一步完善水产种业生产用地制度建设, 明确水产种业用地的界定标准, 合理规划水产种业用地范围, 加强海洋发展规划与土地利用规划的衔接, 提高土地利用效率; 加强水产种业技术创新, 创新水产种业人才培养模式, 加大对水产种业科研人才的激励政策支持, 进一步加强产学研合作, 打造国际一流的产学研平台; 加强大型企业的引领作用, 形成优势产业集群, 实现更大范围的资源共享; 加紧制定与完善水产种业企业污染排放标准, 鼓励水产种业企业污水通过多种形式集中处理, 实现种业的可持续发展。

3.3 行动建议

加强山东省水产种业项目的顶层设计 以

国家重大战略为指引, 以市场迫切需求为导向, 加强山东省水产种业在科技创新、种质创制、平台建设、企业培养等方面的顶层设计, 营造更加良好的政策环境, 全局谋划山东水产种业高质量发展。

建立健全种质资源评价保护体系 完成国内外水产动植物优异种质资源以及山东省特色优质水产动植物原良种的收集、保存、鉴定与评价技术; 建设国家级、省级的活体、细胞、基因资源一体化的种质资源保存平台; 建立完善的种质资源保护体系。

加速解析重要经济性状形成的遗传基础与分子机制 研发高通量表型测定技术, 建立表型组分析技术; 多组学联合解析生长、抗病、抗逆、品质等重要经济性状形成的遗传基础与分子机制, 充分发掘山东省名特优水产动植物重要功能基因资源。

创新传统育种技术与分子育种技术 多学科交叉创新分子辅助性控、全基因组选择、基因编辑等分子育种技术, 建立复合育种技术, 全面提升育种效率, 培育具有抗病、抗逆、速生、优质等多个优异性状的突破性水产动植物新品种, 为工厂化养殖、池塘生态养殖、深远海养殖、养殖工船等不同养殖模式提供良种。

设立重大科研项目推动种业科技升级 建议围绕“山东省特色优质水产种质资源收集、鉴定与评价”“水产动植物重要经济性状遗传机制解析”“分子育种技术创新与良种创制”等设立重大项目, 开展山东省特色优异水产动植物种质资源收集与保存, 阐明生长、抗病、抗逆等重要经济性状形成的遗传基础, 为良种创制奠定基础; 针对分子辅助性控、全基因组选择、基因编辑等分子育种技术中的“卡脖子”问题开展研究, 建立易落地转化、具有自主知识产权的分子育种技术, 提升山东省育种技术水平, 为创制突破性水产动植物新品种提供技术支撑。

健全种业人才培养和评价体系 根据政府、科研院所和企业实际情况, 出台激励措施推动水产种业人才队伍建设, 切实解决水产种业人才工作中存在的任务重、待遇低等问题, 吸引更多人才进入水产种业领域工作。针对科研院所和企业建立不同的人才评价指标, 明确不同类型人才培养的方向和目标, 优化种业人才评价体系, 使科研单位和企业的水产种业人才均衡发展。

完善水产种业生产用地制度及污染排放标准 明确水产种业用地的界定标准, 合理划定水产种业用地范围, 加强海洋发展规划与土地利用规划的衔接, 提高土地利用效率。加紧制定与完善水产种业企业污染排放标准, 鼓励水产种业企业污水通过多种形式集中处理, 实现种业的可持续发展。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [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-2023[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
- Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistic yearbook 2023[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023 (in Chinese).
- [2] 雷霖霖, 门强, 王印庚, 等. 大菱鲆“温室大棚+深井海水”工厂化养殖模式[J]. 海洋水产研究, 2002, 23(4): 1-7.
- Lei J L, Men Q, Wang Y G, et al. Review of “green house+deep well seawater” industrialized culture pattern of turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Marine Fisheries Research, 2002, 23(4): 1-7 (in Chinese).
- [3] 刘洋, 陈松林, 高峰涛, 等. 半滑舌鲷性别特异微卫星标记的 SCAR 转化及其应用[J]. 农业生物技术学报, 2014, 22(6): 787-792.
- Liu Y, Chen S L, Gao F T, et al. SCAR-transformation of sex-specific SSR marker and its application in half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*)[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2014, 22(6): 787-792 (in Chinese).
- [4] Wang D, Mao H L, Chen H X, et al. Isolation of Y- and X-linked SCAR markers in yellow catfish and application in the production of all-male populations[J]. *Animal Genetics*, 2009, 40(6): 978-981.
- [5] Chen J J, Wang Y L, Yue Y Y, et al. A novel male-specific DNA sequence in the common carp, *Cyprinus carpio*[J]. *Molecular and Cellular Probes*, 2009, 23(5): 235-239.
- [6] Ma H Y, Chen S L, Yang J F, et al. Isolation of sex-specific AFLP markers in spotted halibut (*Verasper variegatus*)[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2010, 88(1): 9-14.
- [7] Chen S L, Zhang G J, Shao C W, et al. Whole-genome sequence of a flatfish provides insights into ZW sex chromosome evolution and adaptation to a benthic life-style[J]. *Nature Genetics*, 2014, 46(3): 253-260.
- [8] Gao Y, Gao Q, Zhang H, et al. Draft sequencing and analysis of the genome of pufferfish *Takifugu flavidus*[J]. *DNA Research*, 2014, 21(6): 627-637.
- [9] Shao C W, Bao B L, Xie Z Y, et al. The genome and transcriptome of Japanese flounder provide insights into flatfish asymmetry[J]. *Nature Genetics*, 2017, 49(1): 119-124.
- [10] Shao C W, Li C, Wang N, et al. Chromosome-level genome assembly of the spotted sea bass, *Lateolabrax maculatus*[J]. *GigaScience*, 2018, 7(11): giy114.
- [11] Zhou Q, Gao H Y, Zhang Y, et al. A chromosome-level genome assembly of the giant grouper (*Epinephelus lanceolatus*) provides insights into its innate immunity and rapid growth[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2019, 19(5): 1322-1332.
- [12] He Y, Chang Y, Bao L S, et al. A chromosome-level genome of black rockfish, *Sebastes schlegelii*, provides insights into the evolution of live birth[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2019, 19(5): 1309-1321.
- [13] Xu X W, Shao C W, Xu H, et al. Draft genomes of female and male turbot *Scophthalmus maximus*[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 90.
- [14] Zhou Q, Guo X Y, 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.
- [15] Bian L, Li F H, Ge J L, et al. Chromosome-level genome assembly of the greenfin horse-faced filefish (*Thamnaconus septentrionalis*) using Oxford Nanopore PromethION sequencing and Hi-C technology[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2020, 20(4): 1069-1079.
- [16] Xiao Y S, Xiao Z Z, Ma D Y, et al. Genome sequence of the barred knifejaw *Oplegnathus fasciatus* (Temminck & Schlegel, 1844): the first chromosome-level draft genome in the family Oplegnathidae[J]. *GigaScience*, 2019, 8(3): giz013.
- [17] Zhou Q, Gao H Y, Xu H, et al. A chromosomal-scale reference genome of the kelp grouper *Epinephelus moara*[J]. *Marine Biotechnology*, 2021, 23(1): 12-16.
- [18] 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.
- [19] Lu S, Zhou Q, Chen Y D, 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.
- [20] Lu S, Liu Y, Qu S Y, *et al.* Genomic prediction of survival against *Vibrio harveyi* in leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) using GBLUP, weighted GBLUP, and BayesC π [J]. *Aquaculture*, 2023, 572: 739536.
- [21] 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.
- [22] Cui Z K, Liu Y, Wang W W, *et al.* Genome editing reveals *dmrt1* as an essential male sex-determining gene in Chinese tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*)[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 42213.
- [23] 陈松林, 王德寿, 匡友谊, 等. 中国鱼类基因组编辑育种研究现状及存在问题与展望 [J]. 水产学报, 2023, 47(1): 13-26.
Chen S L, Wang D S, Kuang Y Y, *et al.* Fish genome editing breeding in China: status, problems and prospects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(1): 13-26 (in Chinese).
- [24] Zhang G F, Fang X D, Guo X M, *et al.* The oyster genome reveals stress adaptation and complexity of shell formation[J]. *Nature*, 2012, 490(7418): 49-54.
- [25] Wang S, Zhang J B, Jiao W Q, *et al.* Scallop genome provides insights into evolution of bilaterian karyotype and development[J]. *Nature Ecology and Evolution*, 2017, 1(5): 120.
- [26] 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.
- [27] Wu B, Chen X, Yu M J, *et al.* Chromosome-level genome and population genomic analysis provide insights into the evolution and environmental adaptation of Jinjiang oyster *Crassostrea ariakensis*[J]. *Molecular Ecology Resources*, 2022, 22(4): 1529-1544.
- [28] Wang S, Meyer E, McKay J K, *et al.* 2b-RAD: a simple and flexible method for genome-wide genotyping[J]. *Nature Methods*, 2012, 9(8): 808-810.
- [29] 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(1): 19244.
- [30] 鲁新. "水产动物多性状复合育种技术"研究项目通过专家鉴定 [J]. 现代渔业信息, 2007, 22(10): 31.
Lu X. The research project "Multi-trait compound breeding technology of aquatic animals" has been identified by experts[J]. *Modern Fisheries Information*, 2007, 22(10): 31 (in Chinese).
- [31] Zhang X J, Yuan J B, Sun Y M, *et al.* Penaeid shrimp genome provides insights into benthic adaptation and frequent molting[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 356.
- [32] Yu Y, Luo Z, Wang Q C, *et al.* Development of high throughput SNP genotyping approach using target sequencing in Pacific white shrimp and its application for genetic study[J]. *Aquaculture*, 2020, 528: 735549.
- [33] 中国科学院海洋研究所. 一种用于凡纳滨对虾分子育种的高通量 SNP 分型方法: 中国, CN109706231A[P]. 2019-05-03.
The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. High-throughput SNP typing method used for molecular breeding of *Litopenaeus vannamei*: China, CN109706231A[P]. 2019-05-03 (in Chinese).
- [34] 中国科学院海洋研究所. 一种凡纳滨对虾全基因组 SNP 芯片及其应用: 中国, CN116287297A[P]. 2023-06-23.
The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. *Litopenaeus vannamei* whole genome SNP chip and application thereof: China, CN116287297A[P]. 2023-06-23 (in Chinese).
- [35] 中国科学院海洋研究所. 一种适合凡纳滨对虾全基因组育种应用的 SNP 芯片及应用: 中国, CN116287296A[P]. 2023-06-23.
The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. SNP chip suitable for *Litopenaeus vannamei* whole genome breeding application and application: China, CN116287296A[P]. 2023-06-23 (in Chinese).
- [36] 刘绵宇, 李旭鹏, 孔杰, 等. 液相芯片“黄海芯 1 号”在凡纳滨对虾急性肝胰腺坏死病抗性基础群体遗传评估中的应用 [J]. 水产学报, 2023, 47(1): 019417.
Liu M Y, Li X P, Kong J, *et al.* Application of the liquid chip "Yellow Sea Chip No. 1" in genetic evaluation of the base population with resistance to acute hepatopancreatic necrosis disease in *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(1): 019417 (in Chinese).
- [37] 曹振杰, 姜燕, 徐海强, 等. 山东省河蟹产业情况及发展建议 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(12): 235-236, 239.
Cao Z J, Jiang Y, Xu H Q, *et al.* Present situation and development suggestions of *Eriocheir sinensis* industry in Shandong Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(12): 235-236, 239 (in Chinese).
- [38] 刘淇, 曹荣. 神奇的海参 (典藏版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Liu Q, Cao R. *Magical sea cucumber (collector's edition)*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022 (in Chinese).
- [39] 王印庚. 刺参健康养殖与病害防控技术丛解 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.

- Wang Y G. Sea cucumber culture and disease control technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014 (in Chinese).
- [40] 高菲, 许强, 李秀保, 等. 热带珊瑚礁区海参的生境选择与生态作用[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4301-4312.
- Gao F, Xu Q, Li X B, *et al.* Habitat preference and ecological function of sea cucumber in the tropical coral reef ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11): 4301-4312 (in Chinese).
- [41] 廖梅杰, 王印庚, 李彬, 等. 我国海参养殖产业现状、存在问题及对策探讨(上)[J]. 科学养鱼, 2021(2): 24-25.
- Liao M J, Wang Y G, Li B, *et al.* Present status and existing problem for sea cucumber culture industry in China and discussion on its countermeasures (part1)[J]. *Scientific Fish Farming*, 2021(2): 24-25 (in Chinese).
- [42] 廖梅杰, 王印庚, 李彬, 等. 我国海参养殖产业现状、存在问题及对策探讨(中)[J]. 科学养鱼, 2021(3): 26-27.
- Liao M J, Wang Y G, Li B, *et al.* Present status and existing problem for sea cucumber culture industry in China and discussion on its countermeasures (part2)[J]. *Scientific Fish Farming*, 2021(3): 26-27 (in Chinese).
- [43] 廖梅杰, 王印庚, 李彬, 等. 我国海参养殖产业现状、存在问题及对策探讨(下)[J]. 科学养鱼, 2021(4): 26-27.
- Liao M J, Wang Y G, Li B, *et al.* Present status and existing problem for sea cucumber culture industry in China and discussion on its countermeasures (part3)[J]. *Scientific Fish Farming*, 2021(4): 26-27 (in Chinese).
- [44] Zhang X J, Sun L N, Yuan J B, *et al.* The sea cucumber genome provides insights into morphological evolution and visceral regeneration[J]. *PLoS Biology*, 2017, 15(10): e2003790.
- [45] Sun L N, Jiang C X, Su F, *et al.* Chromosome-level genome assembly of the sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): 454.
- [46] Lv J, Wang Y F, Ni P, *et al.* Development of a high-throughput SNP array for sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) and its application in genomic selection with MCP regularized deep neural networks[J]. *Genomics*, 2022, 114(4): 110426.
- [47] Yang A F, Sun D P, Liu S K, *et al.* Characterization of fifteen SNP markers by mining EST in sea cucumber, *Apostichopus japonicus*[J]. *Journal of Genetics*, 2014, 93(1): 49-53.
- [48] Dong Z G, Chen Y H, Xu G G, *et al.* Twenty-one microsatellite loci from sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka, 1867), an endangered species on the IUCN Red List[J]. *3 Biotech*, 2018, 8(8): 323.
- [49] Cui W, Huo D, Liu S L, *et al.* Construction of a high-density genetic linkage map for the mapping of QTL associated with growth-related traits in sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)[J]. *Biology*, 2021, 11(1): 50.
- [50] Tian M L, Li Y P, Jing J, *et al.* Construction of a high-density genetic map and quantitative trait locus mapping in the sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14852.
- [51] Li Q, Chen L, Kong L. A genetic linkage map of the sea cucumber, *Apostichopus japonicus* (Selenka), based on AFLP and microsatellite markers[J]. *Animal Genetics*, 2009, 40(5): 678-685.
- [52] Li C H, Feng W D, Qiu L H, *et al.* Characterization of skin ulceration syndrome associated microRNAs in sea cucumber *Apostichopus japonicus* by deep sequencing[J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2012, 33(2): 436-441.
- [53] Chang M Y, Ge J L, Liao M J, *et al.* Genome-wide DNA methylation and transcription analysis reveal the potential epigenetic mechanism of heat stress response in the sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1136926.
- [54] Ye N H, Zhang X W, Miao M, *et al.* *Saccharina* genomes provide novel insight into kelp biology[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6986.
- [55] Shan T F, Yuan J B, Su L, *et al.* First genome of the brown alga *Undaria pinnatifida*: chromosome-level assembly using PacBio and Hi-C technologies[J]. *Frontiers in Genetics*, 2020, 11: 140.
- [56] Li J, Pang S J, Shan T F, *et al.* Zoospore-derived monoecious gametophytes in *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae)[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(2): 365-371.
- [57] Zhang J Y, Wu Q, Eléouët M, *et al.* CRISPR/LbCas12a-mediated targeted mutation of *Gracilariopsis lemaneiformis* (Rhodophyta)[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2023, 21(2): 235-237.
- [58] Hu Z M, Shan T F, Zhang J, *et al.* Kelp aquaculture in China: a retrospective and future prospects[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(3): 1324-1351.
- [59] 付峰. 龙须菜紫外诱变育种及抗逆速生优良品系的选育[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Fu F. The ultraviolet mutagenesis breeding and selection of stress tolerance and fast growth strains of *Gracilariopsis lemaneiformis*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).

Strategy research on high-quality development of aquatic seed industry in Shandong Province

CHEN Songlin ^{1*}, LU Sheng ¹, RONG Xiaojun ¹, LIU Zhihong ¹, LUAN Sheng ¹, ZHANG Hongfeng ²,
LIAO Meijie ¹, SUN Xiujun ¹, SUI Juan ¹, WANG Yixiang ³

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

2. *School of Public Management, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China;*

3. *School of Economics, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China)*

Abstract: Shandong is a major fishery province in China, which shoulders the critical mission of building the "blue granary". The high-quality development of the aquatic seed industry in Shandong Province is significant for ensuring the sustainable and diverse supply of aquatic products in China. Based on the results of references analysis and field investigation, this study systematically summarized the status quo of the aquatic seed industry in Shandong Province and then pointed out the drawbacks in overall design and planning, collection and preservation of germplasm resources, innovation and application of breeding technologies, cultivation of new varieties, and formation of leading enterprises. Based on that, we put forward the long-term goals, critical tasks, and suggestions for developing the seed industry of fish, shellfish, shrimps, crabs, sea cucumber, algae, and aquatic seed economy in Shandong Province. This study will provide references for the high-quality development of the aquatic seed industry in Shandong Province.

Key words: aquaculture; aquatic seed industry; genetic breeding; germplasm resources; breeding technologies

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

Funding projects: Consulting Research Project of Shandong Institute of Chinese Engineering S & T Strategy for Development (202201SDZD02); Shandong Taishan Scholar Climbing Project