



刘永新。博士，研究员。现任中国水产科学研究院国际合作处处长。研究方向为渔业科研管理、水产遗传育种与健康养殖。承担国家级发展规划与战略研究报告编制，主导农业农村部《“十三五”渔业科技发展规划》等科技规划，主笔科技部《面向2035年国家中长期科技发展规划-渔业现代化专题战略》等研究报告；策划重大科技计划与重点专项建议，参与编制了国家重点研发计划《蓝色粮仓科技创新》《海洋农业与淡水渔业科技创新》等重点专项、《农业生物育种》重大专项的实施方案。编写报告建议60余篇，发表学术论文40余篇，主编专著1部、参编专著3部，获授权专利5项。

· 综述 ·

中国水产育种研究现状与发展建议

刘永新^{1*}， 邵长伟²， 侯吉伦³， 张殿昌⁴， 郑先虎⁵

(1. 中国水产科学研究院，北京 100141；

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所，山东 青岛 266071；

3. 中国水产科学研究院北戴河中心实验站，河北 秦皇岛 066100；

4. 中国水产科学研究院南海水产研究所，广东 广州 510300；

5. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所，黑龙江 哈尔滨 150076)

摘要：水产育种是世界各国竞相发展的热点研究领域，育种技术开发和优良品种培育充分体现了一个国家的综合创新能力和市场竞争能力。开展水产养殖生物的遗传育种研究，可提高种质资源开发强度和基因资源挖掘深度，发掘我国水产种业科技潜能和增强产业化应用水平。我国水产育种涵盖了完整的品种育成和扩繁推两大系统，已经成为推动水产养殖业绿色发展的重中之重，在保障优质蛋白稳定供给、提升种业强国竞争实力和改善国民饮食习惯等方面展示了杰出功效。随着生命科学特别是分子生物学和基因组学的飞速发展，我国水产育种取得了丰硕的科研成果，但也遇到了诸多核心瓶颈和制约因素。本文概括性总结了开展水产育种研究的重要意义，分析了当前我国水产育种研究的整体现状，凝练了亟需突破和解决的关键问题，提出了强化种质资源挖掘与高效利用、重视基础研究开展源头创新、研发前沿技术进行重点攻关、聚焦市场需求培育优良新品种等今后研究重点任务，形成了建设种质资源保藏体系、建成创新支撑平台、推进保护政策扶持、打造新型研发主体等对策建议，以期为我国引领世界水产育种研究和新时代渔业转型升级提供参考资料。

关键词：水产育种；研究现状；产业发展；对策建议

中图分类号: S 965

文献标志码: A

水产育种的内涵是针对鱼类、甲壳类、贝类和藻类等主要水产养殖经济物种，利用传统育种技术和现代生物技术进行目标性状的遗传改良，培育品优、高抗、速生、稳产等水产生物新品种

或新品系的过程^[1-2]。自1996年，以兴国红鲤(*Cyprinus carpio* var. *xingguonensis*)为代表的33个水产新品种通过全国水产原种和良种审定委员会审定以来，中国水产育种研究工作取得了杰出的

收稿日期: 2022-11-14 修回日期: 2022-12-20

资助项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2022YJ04)

通信作者: 刘永新, 从事渔业科研管理研究, E-mail: liuyx@cafs.ac.cn

科研进展和丰硕的科研成果, 为推动水产养殖业健康有序发展做出了重大贡献。数量众多、性状优异的水产新品种创制与推广, 不仅极大程度丰富了我国水产养殖的主要对象, 更是提供了鱼、虾、蟹、贝、藻、参等多类优质的水产蛋白, 优化了国民的传统饮食习惯和膳食结构, 增强了消费者的个性化需求与营养健康水平, 创造了可观的经济效益和显著的生态效益^[3-4]。本文综述了开展水产育种研究工作的重要意义, 概括性总结了我国水产育种研究的总体现状与最新进展, 分析了当前面临的典型问题和存在短板, 提出了亟需攻关的重点科研任务, 凝练了深化水产育种研究的对策与建议, 以期为推动中国水产种业绿色高质量发展提供参考依据。

1 水产育种研究的重要意义

种业是现代农业发展的“生命线”, 民族种业强大不起来, 中国的粮食安全就无从谈起。水产种业是发展现代渔业的第一产业要素, 亦是确保水产优质蛋白稳定持续供给的物质基础, 具有源头性、战略性、基础性和不可替代性的特点^[5]。强化其科学研究与技术研发, 能够满足推动产业发展的迫切需要, 提供水产养殖业发展的原始动力, 已成为未来世界面对食物短缺、解决食物来源的根本途径。

1.1 丰富的水产种质资源是保障优质蛋白稳定供给的物质基础

食品安全始终是关系国民经济发展、社会稳定和国家自立的全局性战略命题。水产品已成为继谷类、牛奶之后食物蛋白的第三大来源, 全球 70 亿人口的动物蛋白摄入, 15% 以上来源于水产品。中国 2021 年水产品总产量为 6 690.29 万 t, 人均水产品占有量 47.36 kg, 居民人均水产品消费量 14.2 kg, 是世界平均水平的 2 倍, 满足了国民 30% 的动物蛋白需求^[6]。由此可见, 水产品在保障食物稳定供应方面的现实地位和作用发挥日益彰显。要高效稳定供应优质水产品, 将国人的食物安全掌握在自己手中, 就必须牢牢攥住水产育种这个核心。我国各主要流域和各海域的不同生态功能区自然禀赋不同, 孕育了种类丰富、类型多样的水产种质资源, 如三北地区冷水性鱼类种质、长江流域大宗特色养殖种类、珠江流域名优养殖种、沿海地区高档海珍品等等。以储量雄厚的水产种质资源为基础, 通过大规模的收集保

存和鉴定评价, 可以完善国家级水产种质资源保藏库馆的储量和内容^[7-8]。更重要的是, 优异水产种质资源能够拓宽选育目标种类的遗传基础, 提升育成品种拥有的突出经济性能, 实现具有市场潜力的养殖新对象开发与推广。新品种培育和新对象繁养, 能够调整和优化我国传统水产养殖业的结构, 推动新兴特色养殖产业的发展壮大, 从而维持我国水产品产量长期稳定和优质蛋白持续供给^[9-10]。

1.2 水产核心育种技术创新是提升种业强国竞争实力的重要措施

农以种为先, 种业是推动养殖业发展最活跃、最重要的引领性要素, 是农业领域科技创新的前沿阵地。随着全球经济一体化的不断发展, 种业面临的竞争必将更加激烈, 有无优良新品种, 直接决定了中国种业在国际市场上的竞争能力。竞争的关键在于技术创新, 只有源源不断的技术创新, 才能持续向市场推出新品种, 不断提高产品的科技含量和知识含量。发达国家入侵中国种业市场的案例比比皆是, 如转基因棉花、转基因大豆、高产奶牛等。在水产领域, 少数代表性主要养殖物种长期被国外企业掌控中国种业市场的主动权。如凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)^[11]、大西洋鲑 (*Salmo salar*)^[12]、虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)^[13] 等种源, 过去 30 年一直由外国公司所控制, 其不仅在中国攫取了超高额利润, 更是梦想控制中国食物安全的命脉。因此, 坚持秉承我国水产养殖品种开发和管理理念, 制定重点养殖对象的研究发展规划, 将各类高效技术和先进方法融入实际育种路线当中, 加速中国主要水产养殖对象育成优良品种的选育进程, 促进水产养殖良种的产业化, 取得理想的养殖效益与经济效益, 同时达到最佳的生态环境保护效果^[14-17]。从而扭转部分主养经济物种种源受制国外的不利局面, 推动中国自主培育品种进军国际市场, 提供中国水产养殖产业转型升级的强大动力。

1.3 优异水产新品种培育是改善国民饮食消费习惯的根本途径

俗语说, “无鱼不成席”。春节的宴席上, 少不了一道美味的鱼肴, 寓意“吉庆有余(鱼)”。在改革开放初期, “吃鱼难”、“吃活鱼更难”的问题尤为突显。因此, 水产育种研究关注的目标性状都是生长速率快、抗逆境、抗病害等, 目的就是

尽快、尽可能多地生产出水产品, 从而满足国民对水产品的迫切需求。现如今, 伴随着经济社会的快速发展与进步, 人们对于水产品产量的需求已然得到满足, 转而更加关注于质的需要, “吃好鱼”、“吃放心鱼”成为新阶段的主要研究方向; “便于烹饪、易于食用、营养丰富、味道鲜美”更是成为新时期水产品的主导消费需求和增长点。少肌间刺、高不饱和脂肪酸、优质肌肉弹性等不同类型经济性状的改变与提升引发了更多的热点关注, 促使中国水产品市场消费需求呈现出多层次、多元化和多样化特征。因此, 当前育种研究的目标性状应抓住其中的关键点和突破点, 造就更多成功的典型案例与样板, 推动复制推广和产业放大。要想水产养殖对象拥有满足消费者饮食变化需求的经济性状, 唯有通过水产育种的方式来进行遗传改良, 培育出品质优异、性别单一、抗逆抗病、营养丰富的突破性水产养殖新品种。这些新品种的产出不仅能够满足消费者饮食需求, 更具备相对较高的销售价格且供不应求, 可显著提升养殖良种的综合收益, 推动经营方式由生产主导型向市场主导型转变。

2 水产育种研究总体现状

20 世纪 50 年代, 青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙 (*Aristichthys nobilis*) “四大家鱼”人工繁殖技术实现了历史性突破, 攻克了千百年来完全依赖自然江河捕捞鱼苗进行养殖的难关, 也开启了中国水产育种研究工作的帷幕^[18]。而后的 70 余年, 水产种质资源收集保藏与精准鉴定、育种理论与技术创新、品种培育与良种体系建设等全链条科技创新均取得了显著成效。其中, 以水产生物全基因组精细图谱绘制与功能基因遗传解析为代表的热点研究处于国际领先地位^[19-23]。

2.1 种质资源收集保藏与鉴定评价深入推进

早在 20 世纪 80 年代, 我国已开始水产生物种质资源收集与保护研究, 开展了长江、珠江、黑龙江等内陆流域草鱼、鲢、鳙等原种收集与考种, 建立了主要养殖鱼类的种质保存技术标准等。进入 21 世纪以来, 依托国家水产种质资源共享服务平台, 构建了活体、细胞和基因等多层次水产种质资源保存体系, 收集与保存各类水产种质资

源 10 余万份。2019 年, 以国家水产种质资源平台为基础组建了国家海洋水产种质资源库和国家淡水水产种质资源库; 2021 年, 国家海洋渔业生物种质资源库正式启动运行, 初步形成了以种质库为主体的水产种质资源收集保藏体系; 2021 年, 启动了第一次全国水产养殖种质资源调查, 至今基本摸清了 313 种水产养殖种质资源家底。在种质资源收集保藏基础上, 我国也系统开展了水产种质资源表型和基因型鉴定与评价。迄今为止, 多数水产生物的表型鉴定评价集中于主要养殖种类生长、品质、抗病、抗逆、性别、体色等重要经济性状的外观鉴定评价方面, 以多不饱和脂肪酸含量、代谢水平、消化酶活性和贝类心率等为代表的生理生化指标的表型鉴定也取得了一定进展。在基因型鉴定方面, 研发了水产种质资源低成本、高通量基因分型技术, 在栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*)、鲤、大黄鱼 (*Larimichthys crocea*)、石斑鱼 (*Epinephelus* spp.)、凡纳滨对虾等数十种重要养殖种类中实现了高通量基因型的精准鉴定与评价。

2.2 水产育种理论与技术研究实现国际领跑

近年来, 我国在水产生物基因组图谱绘制, 重要经济性状遗传解析等方面取得了显著成就。迄今为止, 共计完成半滑舌鳎 (*Cynoglossus semilaevis*)、银鲫 (*Carassius auratus gibelio*)、中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*)、中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*)、长牡蛎 (*Crassostrea gigas*)、虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*)、海带 (*Laminaria japonica*) 等 50 余种重要水产养殖生物基因组图谱^[24-31]。从 2012 年完成牡蛎作为第一个水产生物基因组以来, 短短 10 余年间, 我国在水产生物基因组研究方面实现了从跟跑、并跑到领跑的跨越式发展。在基因组图谱绘制基础上, 开展了生长^[32-34]、抗性^[35-37]、品质^[38-39]、免疫^[40-41]、性别^[42-43]、发育^[44-45]、饲料转化率^[46-47]等目标经济性状功能基因挖掘与鉴定的系列研究。诸如聚焦草鱼生长性状的改良, 采用 RNA-Seq 技术挖掘到 1 937 个差异表达基因和 4 个 SNP 位点作为分子辅助育种工具^[48]。针对比目鱼发育性状的机制解析, 鉴定了 153 个特异的基因家族、12 个扩张的基因家族和 106 个正选择基因, 发现其与眼睛大小调控、视网膜神经递质等比目鱼变态过程中的生物学现象密切相关^[49]。锚定四倍体鲤进化与选育遗传基础阐释, 观察到亚基因组趋同进化现象, 破解了松浦镜鲤、黄河鲤 (*C. carpio haematopterus*) 和福瑞

鲤的基因组结构变异及其规律, 为鲤经济性状改良提供了新的理论依据^[50]。

我国在选择育种、杂交育种为代表的传统育种技术和分子标记辅助、转基因、全基因组选择、分子模块设计、基因编辑等新一代育种技术方面也取得了重要进展^[51]。从 1996—2022 年, 群体选育和杂交育种是我国品种培育的主流技术, 在不同年份育种过程中的应用占比超过了 50% (图 1)。2008 年之后, 家系选育技术的应用占比约为 10%~25%。雌核发育、细胞工程和性别控制等技术是育成单性品种的常用技术, 培育出杂交鳊“雄鳊 1 号”、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)“全雄 1 号”、牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*)“北鲆 1 号”、翘嘴鲌 (*Culter alburnus*)“全雌 1 号”和虹鳟“全雌 1 号”等典型代表。结合分子标记辅助育种技术, 育成了建鲤 (*Cyprinus carpio* var. *jian*)“2 号”、文蛤 (*Meretrix meretrix*)“科浙 2 号”、异育银鲫“中科 5 号”等标志性品种。人工诱变和单倍体克隆是藻类优良品种培育的独有技术。新一代育种技术在水产生物品种培育过程中的运用正在逐步拓展与深入, 但育成品种的整体数量还不多。全基因组选择育种技术应用于栉孔扇贝“蓬莱红 3 号”^[52] 等

4 个品种培育, 是世界范围内探索性应用的实践案例。基因模块辅助育种仅见于长牡蛎“海蛎 1 号”品种培育, 而转基因和基因组编辑由于生态安全、审定标准等问题, 至今尚未在已有育成品种的技术路线中出现。

2.3 水产良种培育和优异种质创制并行跨越

截至 2022 年, 经全国水产原种和良种审定委员会审定的水产新品种总计 266 个。覆盖的水产养殖对象包括: 鱼类 134 种、虾类 29 种、蟹类 9 种、贝类 53 种、藻类 23 种、棘皮类 10 种, 两栖类 8 种。其中, 鱼类在培育品种总数的占比达到 50%。按照品种培育方式来划分, 主要包括: 选育品种 152 个、杂交品种 73 个、引进种 30 个、其他品种 11 个 (表 1)。其中, 选育品种占比最高, 为 57%, 其次为杂交品种 27%, 引进种为 11%, 其他品种最低, 为 4%, 表明传统和现代育种技术对于加速品种培育进程发挥了重要作用。依据培育主体来分类, 科研院所培育品种 134 种, 高等院校培育品种 75 种, 良种场培育品种 14 种, 企业培育品种 33 种, 推广机构培育品种 10 种。科研院所是水产优良品种培育的主力军, 所占比例

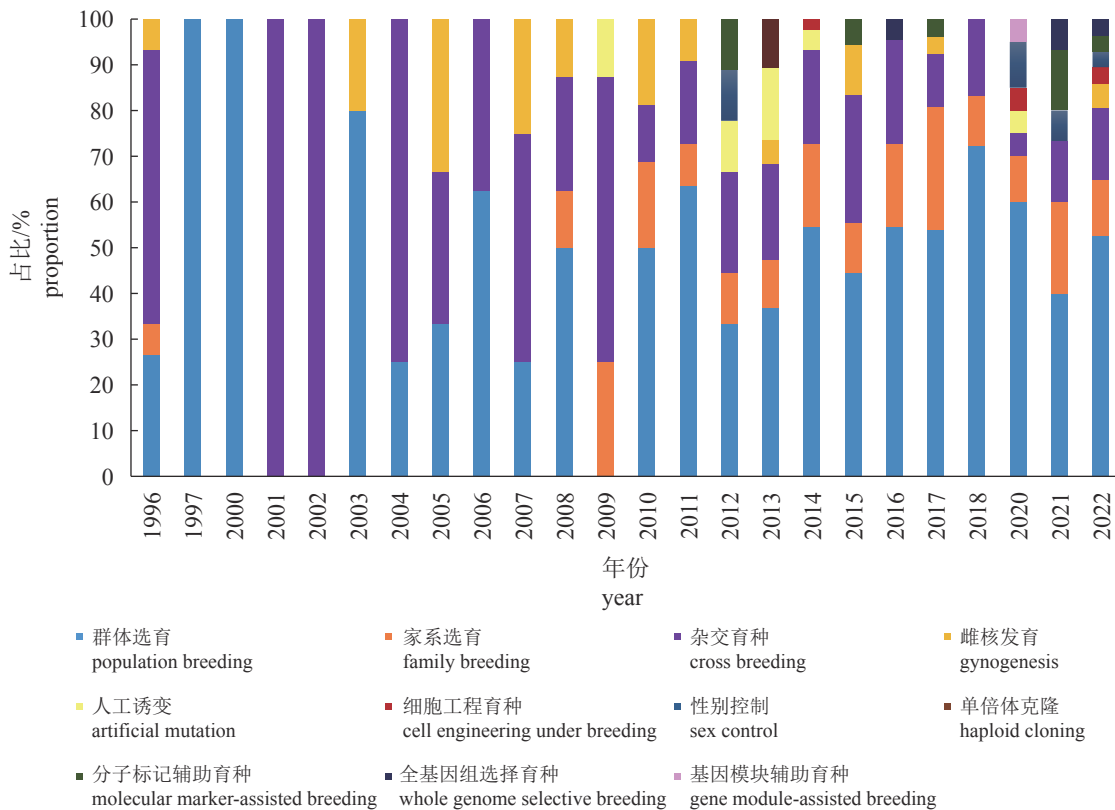


图 1 各年份水产新品种培育应用的育种技术占比

Fig. 1 Proportion of applied breeding technology of aquatic new variety in every year

接近 50%; 高等院校亦是品种培育的有生力量, 所占比例为 28%。根据养殖水域环境, 海水养殖

品种 119 种, 淡水养殖品种 133 种, 海淡水均可养殖品种 14 种。

表 1 水产新品种门类和培育方式比较

Tab. 1 Comparison of category and cultivated method for aquatic new variety

种类 species	选育品种 bred variety	杂交品种 hybrid variety	引进种 introduced variety	其他品种 other variety	合计 total
鱼类 fish	57	48	20	9	134
虾类 shrimp	22	5	2		29
蟹类 crab	8	1			9
贝类 shellfish	37	12	4		53
藻类 algae	16	5		2	23
棘皮类 echinodermata	9	1			10
两栖类 amphibian	3	1	4		8
合计 total	152	73	30	11	266

利用实用性的育种技术, 创制了一批品优、速生、抗逆、抗病的水产新品种。以显微注射的方式, 培育出快速生长的转基因黑龙江鲤, 且子代能够获得外源整合基因^[53-55]。运用 CRISPR-Cas9 基因编辑技术, 构建了团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) *runx2b* 基因 F₀ 突变体, 经过雌雄交配繁育出无肌间刺的 F₁ 群体^[56]; 此外在银鲫中敲除 *runx2b* 的两个部分同源基因 (*runx2b-A* 和 *runx2b-B*) 的所有等位基因, 获得约 300 尾无肌间刺雌核生殖银鲫 F₁ 个体。通过敲除调控肌间刺发育的 *bmp6* 基因, 筛选到无肌间刺 F₁ 突变体, 经自交已获得发育正常的无肌间刺 F₃ 群体。采用静水压处理, 通过抑制卵裂制备牙鲆有丝分裂雌核发育二倍体^[57], 经再次诱导减数分裂雌核发育建立了克隆系^[58]。采用性别控制育种技术, 创制了全雄黄颡鱼^[59]、尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)^[60] 和乌鳢 (*Channa argus*), 全雌大黄鱼^[61] 和大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)。利用与抗病性状紧密连锁的分子标记, 培育出镜鲤 (*C. carpio* var. *specularis*) 抗疱疹病毒 F₄ 品系^[62]、虹鳟抗传染性造血器官坏死病家系^[63] 和草鱼抗出血病新品系^[64]。

伴随现代科学技术的不断发展, 水产生物育种正逐步进入“生物技术+人工智能”的新时代。联合国《2022 世界渔业和水产养殖状况》报告指出, 2020 年水生动物产量达 8750 万 t, 高于 2001—2010 年平均水平的 30%^[65]。随着渔业和水产养殖业的迅猛发展, 针对水产食品的生产、管理、贸易和消费方式开展“蓝色转型”已势在必行。为了满足水产养殖转型发展的现实需求, 水产育种研

究也将会在总结遗传和发育等理论研究的基础上, 开辟出我国水产养殖生物精准育种技术新路径, 破解制约水产种业发展的“卡脖子”系列问题。

3 水产育种研究面临的问题

虽然中国水产育种研究取得了较多成绩, 为水产养殖业提供了多样的培育品种, 带动了养殖产量和经济效益的不断提升。但在种质资源挖掘利用、目标经济性性状的选择、前沿育种技术的研发、少数育成品种种源的掌握及构筑选育研究的根基等方面还存在诸多亟待解决的卡点和受制于人的难点, 需要在今后水产育种科技创新过程中引起足够重视, 突破自身瓶颈。

3.1 种质资源挖掘利用有待深化

我国现有鱼类^[66-68]、甲壳类^[69-71]、贝类^[72-75]、棘皮动物^[76]、两栖类^[77] 和藻类等各类种质资源 17 627 种^[78], 总量和类型都极为丰富。但与庞大的储量相比, 中国水产种质资源的收集、保存和研发还处于起步阶段, 已有的种质保存工作比较零散、缺乏系统性和规模化。种质资源收集保存种类和数量不多, 表型测量、精准鉴定与系统评价范围和规模还不广, 表型和基因型联合数据库尚未建立。现存水产种质资源保存机构的研发能力和基础设施有待进一步提高与完善, 高效挖掘和利用效率相对偏低。重要经济性性状的遗传基础与调控机制解析不够深入, 有育种利用价值和自主知识产权的新基因较少, 分子标记辅助品种选育的进程需要加速。由我国自主研发的水产实用

性育种技术还不多, 以日本鳗鲡 (*Anguilla japonica*) 为代表的高经济价值物种人工繁育技术尚未突破。此外, 少数水产生物种源诸如生长速率快、适应植物性蛋白源饲料的大西洋鲑、三倍体虹鳟、SIS 凡纳滨对虾等仍然受制于国外。

3.2 育成品种改良性状相对单一

在通过国家审定的 266 个水产新品种中, 90% 以上品种改良的生产性能都以快速生长为主, 少数品种兼具颜色、单性、品质、抗性性状。如中国明对虾“黄海 2 号”收获体质量提高 30%, 染病死亡时间延长 10%; 福瑞鲤 2 号养殖 16 个月时的生长速率与同龄普通鲤相比平均提高 22.9%, 成活率平均提高 6.5%; 易捕鲤 2 龄鱼两网起捕率为 96.5%, 比黑龙江鲤、松浦镜鲤和松荷鲤分别提高 96.7%、56.1% 和 71.3%, 生长速率和成活率与松荷鲤相近; 仿刺参 (*Apostichopus japonicus*) “参优 1 号”6 月龄养成收获体质量平均提高 26.5%, 抗灿烂弧菌 (*Vibrio splendidus*) 感染力平均提高 11.7%, 成活率平均提高 23.5%。但总体来说, 兼具生长快、抗病、抗逆、高饲料转化率等多个经济性状的品种还十分稀少, 难以满足养殖对多性状和适应能力强新品种现实需求。一些突破性经济性状的选育工作, 如可食用面积大、营养成分含量高、适宜特定养殖模式等目标性状的遗传改良研究还未开展。

3.3 育种过程中新技术应用不多

选择育种、杂交育种和性控育种是目前培育水产新品种的主要技术与手段, 这些方法作用显著、功效突出, 实现了目标物种的经济性状遗传改良。但在整个育种技术路线中, 全基因组选择^[79]、基因组编辑^[80]、生殖干细胞移植、合成生物学等前沿育种技术与育种工作的有机结合才刚刚起步, 应用不多、推进不深。已培育品种中, 仅有栉孔扇贝“蓬莱红 2 号”、牙鲆“鲆优 2 号”、海湾扇贝 (*Argopecten irradians*) “海益丰 12”、“海益丰 11”等品种在育种过程中采用了全基因组选择技术^[81-83]。基因编辑、合成生物学等新技术与现实育种过程的结合紧密度还不够。特别是针对性成熟时间长、育种周期长的水产养殖生物, 大幅缩短育种周期、显著提高育种效率, 延长优势性状保持能力, 摆脱在自然群体中筛选突变个体耗时长、进展慢、效率低的实际困境, 是水产遗传育种领域未来的攻关重点。

3.4 商业化育种体系还不够健全

虽然我国水产种业的市场化水平显著提高, 但良种创制依然主要由科研院所和高等院校主导。数量众多的水产苗种企业在良种培育、繁育、推广中发挥的作用还有限, 尚未确立其种业的主体地位。相比国外龙头企业在水产育种中的创新主体作用, 诸如以 SIS 等为代表的凡纳滨对虾企业选育的良种占全球市场的 70% 以上, 我国仍然存在较大差距, 主要表现在我国水产育种企业自主创新能力不足, 市场竞争力弱。尽管我国目前注册的水产苗种企业有 11 000 多家, 但绝大多数企业仍处于原始积累阶段。水产苗种企业繁育基础设施落后, 抗自然灾害风险能力差, 机械化、智能化水平低, 育种研发与自主创新能力弱。企业开展种质创新的主动性不强, 重要原因是水产育种投入的时间之长、经费之多让目前大多数苗种生产企业望而却步。以企业为主体的商业化育种体系尚不完善, 造成了水产新品种的推广应用进展缓慢, 良种生产的集约化程度不高, 市场竞争能力不强。

4 水产育种研究的重点任务

水产育种一直是国内外竞相关注的焦点, 伴随实用性育种技术的不断发展, 显著加快了优良品种的选育进程, 更多样、更优质、更美味的育种产品源源不断地涌入市场。要增强中国水产育种研究的科技创新能力, 需要在品种、技术、种源和平台等多方面持续开展科学研究与硬件升级, 推进科研成果与产业应用有机衔接, 确保我国水产育种的国际领先地位。

4.1 以种质资源为基石强化挖掘利用

我国储量丰富的水产种质资源为多元化的水产新品种培育孕育了先天优势条件。加快提高保有水产种质资源的挖掘利用效率, 研发水产优质种质大规模、生态化保存与维持技术, 完善与良种培育紧密衔接的卵子和胚胎冷冻保存技术, 构建水产养殖生物活体、细胞、基因资源保存体系; 研发基于高分辨率光谱或成像技术的水产种质资源高通量表型鉴定与持续监测技术, 建立水产种质细胞和基因资源精准鉴定与评价技术; 利用优异种质资源, 开发具有市场潜力的养殖新对象, 推动新兴特色养殖产业发展壮大, 提高种质资源开发利用的综合能力和技术水平。

4.2 以基础研究为着力点开展源头创新

基础研究是加速推进水产生物育种工作的重要前提。绘制优异水产种质资源的基因组精细图谱, 解析优异种质资源形成与演化规律; 应用基因组学、分子遗传学、生理生化等方法, 开发主要水产养殖生物基因资源, 发掘主要水产养殖生物生长、性别、抗病、抗逆、品质等重要经济性状调控基因和功能元件, 绘制遗传调控网络, 揭示经济性状形成的遗传基础与分子调控机制, 筛选能够真正应用于育种过程的分子标记和关键功能基因; 解析表型-基因型-环境互作的遗传基础与表观调控机理, 阐释高产、优质、抗病、抗逆、性别等多性状互作机制。

4.3 以前沿技术研发为靶目标重点攻关

水产生物遗传基础研究以及生物技术的突破已催生出多条鱼类精准育种技术路径^[84]。优化和完善选择育种、杂交育种、性控育种、分子标记辅助等常规育种技术, 创新和升级基因编辑、全基因组选择、生殖干细胞移植、分子模块设计、合成生物等前沿育种技术, 建设多元化现代水产育种技术体系。重点研发适用于水产动物的高效、高特异性、低脱靶率的基因编辑载体系统, 建立具有物种可适性、新型高效的水产生物基因导入技术体系; 融合鱼类生殖干细胞移植和基因编辑等前沿技术, 提升实际育种效率和遗传进展, 显著缩短选育世代间隔。

4.4 以市场需求为导向培育优良新品种

以消费者需求、市场需求和环境需求为导向, 重点选育能够改变消费者传统饮食方式的目标性状, 如肌间刺少、可食用面积大、微量元素含量高、易于进行产品加工等品质性状^[85]。选育能够引导消费习惯的性状, 如提升鲢鳙鱼头占体长的比例, 克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*) 的软壳、方便剥离和食用部分多。选育能够提升产品终端价值的性状, 如中华绒螯蟹的大规格和整齐度, 红鳍东方鲀 (*Takifugu rubripes*) 的单性种质创制和性腺快速发育成熟。培育高品质、单性别、抗逆境、抗病害、市场竞争力强的突破性水产养殖新品种。

5 水产育种研究发展建议

水产育种研究是一项长期性、系统性和基础性的工作, 是推动中国水产种业科技创新与进步

的重要源头。伴随国内大循环为主体、国内国际双循环发展格局逐步形成, 是否能够掌握重要的核心种质资源, 是否拥有经济性状足够突出的优良新品种, 直接决定了中国自主培育产品占据国内种业市场的硬实力和抢占国际种业市场的主动权。

5.1 建设国家级水产种质资源保藏体系

推进国家淡水水产种质资源库、国家海洋水产种质资源库、国家水生生物种质资源库等科技基础条件平台建设。国家淡水水产种质资源库覆盖黑龙江、黄河、长江和珠江等4大内陆流域, 聚焦大宗种、名优种、濒危种等3类种质收集保藏; 国家海洋水产种质资源库覆盖黄渤海、东海和南海等3大海区, 开展经济种、生态种、特有种和稀有种等4类种质收集保藏; 国家水生生物种质资源库则主攻斑马鱼模式生物、长江特色及珍稀水生生物收集保藏。升级国家级海洋渔业生物种质资源库, 建成自动化、信息化和现代化水平最高, 收集保藏技术和管理水平最先进, 世界上保存量最多的海洋渔业生物种质资源库。通过各类保藏库建设, 建立国家统筹、分级负责、有机衔接的水产种质资源保存利用体系。

5.2 建成实用化科技创新支撑平台

推动水产生物表型组重大科学基础设施建设, 建立单一、多元、复合环境精准控制平台, 研制最新的分子检测、活体表型测量、品质与抗性鉴定等仪器设备和信息系统, 实现典型水产生物表型的高通量、高分辨和多尺度实时动态精准分析。谋划种质鉴定评价中心、品种生产性能测试中心和标准化种苗扩繁基地建设。种质鉴定评价中心负责评估水产种质资源的遗传潜力, 筛选出性状优异的各类水产种质资源纳入国家级种质资源库进行保存; 品种生产性能测试中心负责检测新品种的遗传特征和多样性, 进行新品种拥有优势经济性状突出性、一致性和稳定性的测试评估; 标准化种苗扩繁基地负责研发科学、高效、低成本的制种方法, 开展主要水产养殖生物良种规模化生产与高效繁育。

5.3 推进水产新品种保护政策扶持

将应用水产良种的财政支持纳入中央财政范畴, 对重要水产养殖对象主导品种的亲本更新和良种推广实施政策性补贴; 建立中央、地方两级水产良种补贴制度, 增强养殖户使用水产优良品

种的积极性和主动性, 实现水产良种的典型示范与大面积推广, 提高我国水产养殖的良种覆盖率和增产贡献率。研究制订水产新品种知识产权保护方案, 主要包括鼓励申请水产新品种相关的国家发明专利与实用新型专利, 加强育成水产新品种的地理标志产品保护及商标注册, 建立地理标志产品的国家、行业或企业标准。健全完善我国水产育种领域相关法规和管理体系, 颁布实施水产新品种研发、保护和使用等方面的法律和条例, 在全国水产主养区建立水产新品种保护与管理机构, 确保制订的法律和条例能够落地执行。

5.4 打造新型育种研发创新主体

打破束缚科研院所与企业之间的体制机制桎梏, 助推科研单位和种业企业形成有效的利益联结体, 加快育种资源、人才、技术从科研单位向企业聚集, 探索科技资源整合和产学研融合的新模式。支持科研院所与行业骨干企业联合组建的协同创新中心, 在科技计划改革和相关资源配置工作中, 重点在优惠政策和资源配置方面给予扶持, 设置重大专项以探索建立持续高效的资助方式, 形成对不同类型和阶段创新力量的协同支持格局。推动科研院所和龙头企业共建现代高效水产育种体系, 打造符合市场化利益回馈机制的科企融合研究实体, 探索企业“出题、出资”, 创新团队“答题”方式, 构建联合研发平台, 全面开创科企合作共赢新局面。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 吴仲庆. 水产生物遗传育种学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2000.
Wu Z Q. Genetics and breeding of aquatic biology[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2000 (in Chinese).
- [2] 范兆廷. 水产动物育种学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Fan Z T. Aquatic animal breeding[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese).
- [3] 刘永新, 李梦龙, 方辉, 等. 我国水产种业的发展现状与展望[J]. 水产学杂志, 2018, 31(2): 50-56.
Liu Y X, Li M L, Fang H, *et al.* Advances and prospects on aquaculture seed industry in China[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2018, 31(2): 50-56 (in Chinese).

- [4] 刘永新, 邵长伟, 王书, 等. 简述我国水产种业发展现状、问题与展望[J]. 中国农村科技, 2021(6): 62-65.
Liu Y X, Shao C W, Wang S, *et al.* The aquatic seed industry development present situation, problems and prospects in China[J]. *China Rural Science & Technology*, 2021(6): 62-65 (in Chinese).
- [5] 王帅. 水产种业科技创新与养殖业可持续发展 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2017.
Wang S. Scientific and technological innovation of aquatic seed industry and sustainable development of aquaculture[M]. Changchun: Jilin University Press, 2017 (in Chinese).
- [6] 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 2022[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Edited by China Society of Fisheries, China Aquatic Technology Extension Station, Fisheries Administration Bureau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fisheries statistical yearbook 2022[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022 (in Chinese).
- [7] 杨文波, 曹坤, 李继龙, 等. 我国水产种质资源保护浅析[J]. 中国水产, 2020(8): 24-26.
Yang W B, Cao K, Li J L, *et al.* Analysis on the protection of aquatic germplasm resources in China[J]. *China Fisheries*, 2020(8): 24-26 (in Chinese).
- [8] 贾敬敦, 刘英杰, 蒋丹平, 等. 中国水产种业科技创新发展报告 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.
Jia J D, Liu Y J, Jiang D P, *et al.* Report on scientific and technological innovation of aquaculture seed Industry in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015 (in Chinese).
- [9] 唐启升. 中国水产种业创新驱动发展战略研究报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Tang Q S. Research report on innovation-driven development strategy of aquatic seed industry in China[M]. Beijing: Science Press, 2014 (in Chinese).
- [10] 相建海. 中国水产种业发展过程回顾、现状与展望[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 1-7.
Xiang J H. Retrospect, status and prospect of seed industry development of aquaculture in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(6): 1-7 (in Chinese).
- [11] 孔杰, 栾生, 谭建, 等. 对虾选择育种研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(9): 81-97.
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- Kong J, Luan S, Tan J, *et al.* Progress of study on penaeid shrimp selective breeding[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(9): 81-97 (in Chinese).
- [12] 陆亚男, 刘翀, 王茜, 等. 挪威大西洋鲑良种选育的发展历程及其对我国水产种业工作的借鉴[J]. *渔业信息与战略*, 2021, 36(4): 289-296.
- Lu Y N, Liu C, Wang Q, *et al.* Review of the selection and breeding process of Norwegian Atlantic salmon and its reference to Chinese aquatic breeding industry[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2021, 36(4): 289-296 (in Chinese).
- [13] 户国, 王炳谦. 国际虹鳟育种产业简介及其对我国的借鉴意义[J]. *水产学杂志*, 2017, 30(3): 1-6.
- Hu G, Wang B Q. An overview of global rainbow trout breeding industry with insight into reference to China[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2017, 30(3): 1-6 (in Chinese).
- [14] 桂建芳, 包振民, 张晓娟. 水产遗传育种与水产种业发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 8-14.
- Gui J F, Bao Z M, Zhang X J. Development strategy for aquaculture genetic breeding and seed industry[J]. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(3): 8-14 (in Chinese).
- [15] 邓伟, 李巍, 张振东, 等. 中国现代水产种业建设的思考[J]. *中国渔业经济*, 2013, 31(2): 5-12.
- Deng W, Li W, Zhang Z D, *et al.* Consideration on development of modern aquatic seed industry in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2013, 31(2): 5-12 (in Chinese).
- [16] 杨红生. 现代水产种业硅谷建设的几点思考[J]. *海洋科学*, 2018, 42(10): 1-7.
- Yang H S. Several strategies for the modernization of the construction of the aquaculture seed industry silicon valley[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(10): 1-7 (in Chinese).
- [17] 海洋农业产业科技创新战略研究组良种选育与苗种繁育专题组. 创新驱动海洋种业的建议及对策[J]. *中国农村科技*, 2013(11): 70-73.
- Marine Agricultural Industry Strategy & Technology Innovation Group. Recommendations and countermeasures on innovation driven seed industry[J]. *China Rural Science & Technology*, 2013(11): 70-73 (in Chinese).
- [18] 钟麟. 家鱼的生物学和人工繁殖 [M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- Zhong L. Biology and artificial reproduction of domestic fish[M]. Beijing: Science Press, 1965 (in Chinese).
- [19] Qi X Z, Xue M Y, Yang S B, *et al.* Ammonia exposure alters the expression of immune-related and antioxidant enzymes-related genes and the gut microbial community of crucian carp (*Carassius auratus*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 70: 485-492.
- [20] Lv H Z, Zhou T, Dong C J, *et al.* Genome-wide identification, evolution, and mRNA expression of complement genes in common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020, 96: 190-200.
- [21] Lu X B, Chen Y X, Cui Z W, *et al.* Characterization of grass carp CD40 and CD154 genes and the association between their polymorphisms and resistance to grass carp reovirus[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 81: 304-308.
- [22] Li X P, Meng X H, Luan S, *et al.* Isolation and characterization of a Raf gene from Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis* in response to white spot syndrome virus infection[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 83: 341-347.
- [23] Li L, Tan K, Zhang H K, *et al.* Effects of high stocking density on the galectin gene expression in noble scallop *Chlamys nobilis* under bacterial infection[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020, 105: 263-269.
- [24] Xu P, Zhang X F, Wang X M, *et al.* Genome sequence and genetic diversity of the common carp, *Cyprinus carpio*[J]. *Nature Genetics*, 2014, 46(11): 1212-1219.
- [25] 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.
- [26] Wang Y P, Lu Y, Zhang Y, *et al.* The draft genome of the grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) provides insights into its evolution and vegetarian adaptation[J]. *Nature Genetics*, 2015, 47(6): 625-631.
- [27] Wu C W, Zhang D, Kan M Y, *et al.* The draft genome of the large yellow croaker reveals well-developed innate immunity[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5227.
- [28] 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.
- [29] 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): 120.

- [30] 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.
- [31] Ye N H, Zhang X W, Miao M, *et al.* *Saccharina* genomes provide novel insight into kelp biology[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6986.
- [32] 李胜杰, 白俊杰, 赵萃, 等. 大口黑鲈EST-SNP标记开发及其与生长性状的相关性分析[J]. *海洋渔业*, 2018, 40(1): 38-46.
- Li S J, Bai J J, Zhao L, *et al.* Development of EST-SNPs in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) and analysis of their correlation with growth traits[J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(1): 38-46 (in Chinese).
- [33] Sun C F, Sun H L, Dong J J, *et al.* Correlation analysis of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) growth hormone gene polymorphisms and growth traits[J]. *Journal of Genetics*, 2019, 98(2): 58.
- [34] Wang X H, Liu H Y, Pang M X, *et al.* Construction of a high-density genetic linkage map and mapping of quantitative trait loci for growth-related traits in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 17506.
- [35] Huang W, Cheng C H, Liu J S, *et al.* Fine mapping of the high-pH tolerance and growth trait-related quantitative trait loci (QTLs) and identification of the candidate genes in pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Marine Biotechnology*, 2020, 22(1): 1-18.
- [36] Fu Q, Yang Y J, Li C, *et al.* The CC and CXC chemokine receptors in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and their involvement in disease and hypoxia responses[J]. *Developmental & Comparative Immunology*, 2017, 77: 241-251.
- [37] Yu Y, Liu J W, Li F H, *et al.* Gene set based association analyses for the WSSV resistance of pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40549.
- [38] 张萍, 薛伟伟, 蒋雪薇, 等. 锦鲤 $\Delta 6$ 脂肪酸去饱和酶基因克隆及表达研究[J]. *生物技术通报*, 2015, 31(12): 158-166.
- Zhang P, Xue W W, Jiang X W, *et al.* The cloning and gene expression of delta 6 fatty acid desaturase of koi carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2015, 31(12): 158-166 (in Chinese).
- [39] Zhao H H, Xia J G, Zhang X, *et al.* Diet affects muscle quality and growth traits of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*): a comparison between grass and artificial feed[J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 283.
- [40] Liu X D, Chen N, Gao X J, *et al.* The infection of red seabream iridovirus in mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) and the host immune related gene expression profiles[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 74: 474-484.
- [41] Hu N N, Lian S S, Zhu X M, *et al.* Interferon regulatory factors functioned as activators of the interferon pathway in the scallop *Chlamys farreri*[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 865707.
- [42] Tao W J, Chen J L, Tan D J, *et al.* Transcriptome display during tilapia sex determination and differentiation as revealed by RNA-Seq analysis[J]. *BMC Genomics*, 2018, 19(1): 363.
- [43] 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 lifestyle[J]. *Nature Genetics*, 2014, 46(3): 253-260.
- [44] Wang Y L, Li Q, Xie J, *et al.* Involvement of the single *Cul4* gene of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* in spermatogenesis[J]. *Gene*, 2014, 536(1): 9-17.
- [45] Llera-Herrera R, García-Gasca A, Abreu-Goodger C, *et al.* Identification of male gametogenesis expressed genes from the scallop *Nodipecten subnodosus* by suppressive subtraction hybridization and pyrosequencing[J]. *PLoS One*, 2013, 8(9): e73176.
- [46] 王宣朋, 张晓峰, 李文升, 等. 鲤饲料转化率性状的QTL定位及遗传效应分析[J]. *水生生物学报*, 2012, 36(2): 177-196.
- Wang X P, Zhang X F, Li W S, *et al.* Mapping and genetic effect analysis on quantitative trait loci related to feed conversion ratio of common carp (*Cyprinus carpio* L.) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(2): 177-196 (in Chinese).
- [47] 李鸥, 曹顶臣, 张研, 等. 利用EST-SSR分子标记研究鲤的饲料转化率性状[J]. *水产学报*, 2009, 33(4): 624-631.
- Li O, Cao D C, Zhang Y, *et al.* Studies on feed conversion ratio trait of common carp (*Cyprinus carpio* L.) using EST-SSR marker[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(4): 624-631 (in Chinese).
- [48] 孙雪, 李胜杰, 姜鹏, 等. 利用RNA-Seq技术分析草鱼生长性状相关基因和SNP标记[J]. *水产学报*, 2021, 45(3):

- 333-344.
- Sun X, Li S J, Jiang P, *et al.* RNA sequencing to identify genes and SNP markers associated with growth traits in *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(3): 333-344 (in Chinese).
- [49] Shao C W, Bao B B, 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.
- [50] Li J T, Wang Q, Yang M D H, *et al.* Parallel subgenome structure and divergent expression evolution of allo-tetraploid common carp and goldfish[J]. *Nature Genetics*, 2021, 53(10): 1493-1503.
- [51] 张晓娟, 周莉, 桂建芳. 遗传育种生物技术创新与水产养殖绿色发展[J]. *中国科学:生命科学*, 2019, 49(11): 1409-1429.
- Zhang X J, Zhou L, Gui J F. Biotechnological innovation in genetic breeding and sustainable green development in Chinese aquaculture[J]. *Science China Vitae*, 2019, 49(11): 1409-1429 (in Chinese).
- [52] 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.
- [53] 汪亚平, 何利波. 我国转基因鱼研制的历史回顾与展望[J]. *生物工程学报*, 2016, 32(7): 851-860.
- Wang Y P, He L B. Retrospect and prospect of transgenic fish breeding in China[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2016, 32(7): 851-860 (in Chinese).
- [54] 梁利群, 孙效文, 沈俊宝, 等. 转基因“超级鲤”的构建[J]. *高技术通讯*, 1999(4): 52-54.
- Liang L Q, Sun X W, Shen J B, *et al.* Production of transgenic “super common carp”[J]. *High Technology Letters*, 1999(4): 52-54 (in Chinese).
- [55] 孙效文, 梁利群, 闫学春, 等. 转生长激素基因鲤的快速生长效应及传代[J]. *水产学报*, 2002, 26(5): 391-395.
- Sun X W, Liang L Q, Yan X C, *et al.* The faster growth effect of transgenic common carp with growth hormone gene and its progenies[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(5): 391-395 (in Chinese).
- [56] Nie C H, Wan S M, Chen Y L, *et al.* Single-cell transcriptomes and *runx2b*^{-/-} mutants reveal the genetic signatures of intermuscular bone formation in zebrafish[J]. *National Science Review*, 2022, 9(11): 152.
- [57] 刘永新, 刘海金, 薛玲玲, 等. 牙鲆有丝分裂雌核发育二倍体的制备[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(1): 197-202.
- Liu Y X, Liu H J, Xue L L, *et al.* Production of mitotic gynogenetic diploid Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(1): 197-202 (in Chinese).
- [58] Liu Y X, Wang G X, Liu Y, *et al.* Genetic verification of doubled haploid Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus* by genotyping telomeric microsatellite loci[J]. *Aquaculture*, 2012, 324-325: 60-63.
- [59] Liu H Q, Guan B, Xu J, *et al.* Genetic manipulation of sex ratio for the large-scale breeding of YY super-male and XY all-male yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco* (Richardson))[J]. *Marine Biotechnology*, 2013, 15(3): 321-328.
- [60] 江东能, 焦开智, 张峻铭, 等. 罗非鱼性别控制遗传育种研究进展[J]. *广东海洋大学学报*, 2022, 42(2): 148-156.
- Jiang D N, Jiao K Z, Zhang J M, *et al.* A review of on genetic sex control breeding of tilapia[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, 42(2): 148-156 (in Chinese).
- [61] 苗亮. 大黄鱼异源精子诱导雌核发育及性别特异性 AFLP 标记筛选 [D]. 宁波: 宁波大学, 2012.
- Miao L. Induction of gynogenesis by heterologous sperm and isolation of sex-specific AFLP markers in *Larimichthys crocea*[D]. Ningbo: Ningbo University, 2012 (in Chinese).
- [62] 孙佳鑫, 石连玉, 姜晓娜, 等. 镜鲤抗疱疹病毒(CyHV-3) F₄抗病品系病毒表达量评估[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(2): 258-265.
- Sun J X, Shi L Y, Jiang X N, *et al.* Research on expression of virus in Cyprinid herpesvirus 3 (CyHV-3) F₄ disease resistant strains[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(2): 258-265 (in Chinese).
- [63] 王炳谦, 姜再胜, 户国, 等. 虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*) 传染性造血器官坏死病(IHN)抗病力遗传参数估计及其抗病家系筛选[J]. *东北农业大学学报*, 2013, 44(9): 120-126.
- Wang B Q, Jiang Z S, Hu G, *et al.* Estimation of genetic parameters for resistance to infectious hematopoietic necrosis and screening for higher resistance families in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(9): 120-126 (in Chinese).

- [64] 王铁辉, 刘汉勤, 陈宏溪, 等. 抗出血病草鱼子代抗病力的分析[J]. *水生生物学报*, 1998, 22(4): 389-390.
Wang T H, Liu H Q, Chen H X, *et al.* Analysis of the disease-resistance of the offsprings of the hemorrhage-resistant grass carp[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1998, 22(4): 389-390 (in Chinese).
- [65] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022[M]. Rome: FAO, 2022.
- [66] 成庆泰, 郑葆珊. 中国鱼类系统检索 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Cheng Q T, Zheng B S. Systematic retrieval of fish in China[M]. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese).
- [67] 孟庆闻. 鱼类分类学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
Meng Q W. Fish taxonomy[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996 (in Chinese).
- [68] 中国科学院中国动物志编辑委员会. 中国动物志 圆口纲 软骨鱼纲 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Editorial Committee of Zoology of China, Chinese Academy of Sciences. Fauna of China Cyclostomata Chondrichthyes[M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese).
- [69] 沈嘉瑞, 戴爱云. 中国动物图谱-甲壳动物 (第2册)[M]. 北京: 科学出版社, 1964.
Shen J R, Dai A Y. Animal atlas of China-Crustaceans (Leaflet 2)[M]. Beijing: Science Press, 1964 (in Chinese).
- [70] 中国科学院北京动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物图谱-甲壳动物 (第4册)[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
Crustaceans Research Group, Beijing Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences. Animal atlas of China-Crustaceans (Leaflet 4)[M]. Beijing: Science Press, 1980 (in Chinese).
- [71] 董聿茂, 戴爱云, 蒋燮治, 等. 中国动物图谱-甲壳动物 (第1册)[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
Dong Y M, Dai A Y, Jiang X Z, *et al.* Animal atlas of China-Crustaceans (Leaflet 1)[M]. Beijing: Science Press, 1982 (in Chinese).
- [72] 张玺, 齐钟彦, 楼子康, 等. 中国动物图谱-软体动物 (第1册)[M]. 北京: 科学出版社, 1964.
Zhang X, Qi Z Y, Lou Z K, *et al.* Animal atlas of China-Mollusk (Leaflet1)[M]. Beijing: Science Press, 1964 (in Chinese).
- [73] 齐钟彦, 马绣同, 刘月英, 等. 中国动物图谱-软体动物 (第4册)[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Qi Z Y, Ma X T, Liu Y Y, *et al.* Animal atlas of China-Mollusk (Leaflet 4)[M]. Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese).
- [74] 齐钟彦, 林光宇, 马绣同, 等. 中国动物图谱-软体动物 (第3册)[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
Qi Z Y, Lin G Y, Ma X T, *et al.* Animal atlas of China-Mollusk (Leaflet 3)[M]. Beijing: Science Press, 1986 (in Chinese).
- [75] 齐钟彦, 马绣同, 楼子康, 等. 中国动物图谱-软体动物 (第2册)[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
Qi Z Y, Ma X T, Lou Z K, *et al.* Animal atlas of China-Mollusk (Leaflet 2)[M]. Beijing: Science Press, 1986 (in Chinese).
- [76] 张凤瀛, 廖玉麟, 吴宝铃, 等. 中国动物图谱-棘皮动物 [M]. 北京: 科学出版社, 1964.
Zhang F Y, Liao Y L, Wu B L, *et al.* Animal atlas of China-Echinodermata[M]. Beijing: Science Press, 1964 (in Chinese).
- [77] 胡淑琴, 赵尔宓. 中国动物图谱-两栖类-爬行类 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1987.
Hu S Q, Zhao E M. Animal atlas of China- Amphibian-Reptile[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese).
- [78] 刘永新, 邵长伟, 张殿昌, 等. 我国水生生物遗传资源保护现状与策略[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(9): 1089-1097.
Liu Y X, Shao C W, Zhang D C, *et al.* Status and strategy of aquatic genetic resource protection in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(9): 1089-1097 (in Chinese).
- [79] 石米娟, 张婉婷, 程莹寅, 等. 基于全基因组分析技术的鱼类育种技术原理与应用[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(2): 33-41.
Shi M J, Zhang W T, Cheng Y Y, *et al.* Fish breeding technology based on whole genome analysis and its application[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(2): 33-41 (in Chinese).
- [80] 于笛, 迟小妹, 滕炜鸣, 等. 基因编辑CRISPR技术在海洋生物遗传育种的应用进展[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(1): 169-176.
Yu D, Chi X M, Teng W M, *et al.* Application perspective of CRISPR technology in marine organisms genetic

- breeding: a review[J]. [Journal of Dalian Ocean University](#), 2021, 36(1): 169-176 (in Chinese).
- [81] 苏海林, 王扬帆, 胡晓丽, 等. 贝类全基因组遗传育种评估与分析系统的开发[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(10): 65-72.
- Su H L, Wang Y F, Hu X L, *et al.* Development of the genomic analysis and evaluation system for shellfish genetic breeding[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(10): 65-72 (in Chinese).
- [82] 张璐. 全基因组选择在栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 育种中的应用 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- Zhang L. Application of genome selection in breeding of Zhikong scallop (*Chlamys farreri*)[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015 (in Chinese).
- [83] 苏海林. 贝类全基因组选择技术建立及其在扇贝育种中的应用 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Su H L. Establishment of genomic selection technology in shellfish and its application in scallop breeding[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [84] Gui J F, Zhou L, Li X Y. Rethinking fish biology and biotechnologies in the challenge era for burgeoning genome resources and strengthening food security[J]. [Water Biology and Security](#), 2022, 1(1): 100002.
- [85] 莽琦, 徐钢春, 朱健, 等. 中国水产养殖发展现状与前景展望[J]. [渔业现代化](#), 2022, 49(2): 1-9.
- Mang Q, Xu G C, Zhu J, *et al.* Developmental status and prospective vision for China's aquaculture[J]. [Fishery Modernization](#), 2022, 49(2): 1-9 (in Chinese).

Research status and development suggestion of China's aquaculture breeding

LIU Yongxin^{1*}, SHAO Changwei², HOU Jilun³, ZAHNG Dianchang⁴, ZHENG Xianhu⁵

(1. Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

3. Beidaihe Central Experimental Station, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qinhuangdao 066100, China;

4. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

5. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150076, China)

Abstract: Aquatic products have become the third most important source of food protein after cereals and milk all over the world. Fifteen percent of food protein intake for a global population of 7 billion people originates from aquatic products. In China, the largest production and consumption country in the world, aquatic products meet 30% of animal protein demand for its people. It is a global scientific goal to maintain the sustainable and stable supply of aquatic products, where aquaculture genetic breeding plays an important role. Aquaculture breeding is a research hot spot in which countries all over the world compete for development. The development of breeding technology and the cultivation of fine varieties fully reflect comprehensive innovation strength and market competitiveness of the country. Since the 1950s, artificial spawning, insemination and hatching of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead (*Aristichthys nobilis*) were realized, which marked China taking the leading role in the technology and theory of artificial propagation of freshwater fish in the world. After that, China's aquaculture breeding has achieved great achievements in scientific research and made irreplaceable contribution to the development of the industry. Carrying out genetic breeding research on aquaculture species can improve the intensity of germplasm resources development and the depth of gene resources mining, exploit the scientific and technological potential of China's aquaculture seed industry, and enhance the level of industrial application. Aquatic breeding in China covers two major systems, namely, the breeding and promotion of new varieties, which has become the top priority to promote the green development of the aquaculture industry. It has demonstrated outstanding effectiveness in ensuring stable and high-quality protein supply, enhancing competitiveness of China as a seed industry powerhouse as well as improving people's eating and consumption habits. With the rapid development of life science, especially molecular biology and genomics, China's aquaculture breeding has achieved fruitful scientific research results, but also encountered many bottlenecks and constraints. This paper synthetically summarizes the significance of carrying out aquaculture breeding research and analyzes the general situation of aquaculture breeding research in China. We also present the key problems that need to be tackled and solved, whose focus was mainly on four aspects. Firstly, the efficiency of germplasm resources utilization was still lower. Secondly, the traits owned by the cultivated varieties were not diverse enough. There are, in addition, seldom new techniques applied in the process of breeding and the imperfect commercial breeding system. On the basis of the research goals, the key scientific and technical tasks in the future are proposed that involve strengthening the excavation and efficient utilization of germplasm resources, attaching importance to fundamental research to strengthen source innovation, developing cutting-edge technologies to tackle key problems as well as focusing on market demand to cultivate excellent new varieties. Relevant countermeasures and suggestions are also made, such as building a germplasm resources conservation system, constructing a platform to support innovation, promoting the policy support for protection, and creating new research and development entities, etc. In summary, it is expected the information of this review could provide reference materials for China to lead the world in aquaculture breeding research and the transformation and upgrading of fisheries in the new era.

Key words: aquaculture breeding; research status; industrial development; countermeasure and suggestion

Corresponding author: LIU Yongxin. E-mail: liuyx@cafs.ac.cn

Funding projects: Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, Chinese Academy of Fishery Sciences (2022YJ04)