



桂建芳, 鱼类遗传育种学家。中国科学院院士、发展中国家科学院院士, 研究员, 博士生导师。全国水产原种和良种审定委员会主任委员, 中国动物学会副理事长、中国水产学会副理事长、中国动物学会和中国海洋湖沼学会鱼类学分会理事长。长期从事鱼类遗传育种生物学基础和相



关生物技术研究。系统研究多倍体银鲫的遗传基础和生殖机制, 首次揭示银鲫独特的单性和有性双重生殖方式; 原创银鲫育种技术路线, 培育出有重大应用价值的银鲫养殖新品种; 开拓出一条X和Y染色体连锁标记辅助的全雄鱼培育技术路线。育成新品种4个, 发表SCI论文270多篇, 获授权发明专利10项, 出版专著和研究生教材9部, 多次获得国家级奖励。

胡红浪, 推广研究员。全国水产技术推广总站副站长、中国水产学会副秘书长, 全国水产原种和良种审定委员会副主任委员、秘书长。长期从事水产技术推广、学术交流、水产新品种审定、水产种业体系建设与管理等工作。组织实施“挪威水产遗传育种技术引进与示范项目”, 建立水产动物多性状复合育种技术体系, 应用于中国明对虾、罗氏沼虾、凡纳滨对虾、斑点叉尾鲷等育种项目, 获多项省部级成果; 组织创建斑点叉尾鲷联合育种新机制, 推动凡纳滨对虾、扇贝等示范应用; 主持国家重点研发专项“蓝色粮仓”盐碱绿洲渔业项目华北课题, 建立华北多类型盐碱水综合高效养殖模式示范区; 参加编制《全国水产良种工程建设规划》; 主持编制《水产新品种审定技术规范》《鱼虾遗传育种中心建设标准》《水产良种场建设标准》等。

· 综述 ·

中国水产种业技术创新现状与展望

胡红浪^{1,2}, 韩枫^{1,2}, 桂建芳^{3,4*}

(1. 全国水产技术推广总站, 北京 100125;

2. 中国水产学会, 北京 100125;

3. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

4. 中国科学院大学, 现代农业科学学院, 中国科学院种子创新研究院, 北京 100101)

摘要: 种业是农业发展的基础, 振兴种业是保障国家粮食安全的核心要素, 也是保障国家粮食安全的重要举措。种业发展涉及政策、技术和市场等多种因素。我国水产遗传育种技术发展日新月异, 但与《种业振兴行动方案》提出的要求尚有差距。本文从育种技术研究、发展与应用等角度阐述了我国水产遗传育种技术发展现状, 对照《种业振兴行动方案》提出的目标与任务, 从种质资源保护与利用、育种技术创新、种业生产体系建设和种苗监管等方面分析了我国水产育种技术发展存在的短板, 认为我国水产养殖用种总体有保障、风险可管控, 也存在国内种质资源丰富但遗传改良率不高、科研育种成果多但转化效率不高、种业企业多但核心竞争力不强等3个主要问题。针对短板, 本文提出加强种质资源挖掘保存与创新利用技术研究、加强现代育种技术特别是新种质创制的研究及应用、加强生产体系技术标准化应用、加强育种技术商业化应用研究、加强种业市场监管技术支撑等建议, 以期为我国水产育种技术创新攻关及种业发展政策制定提供参考。

收稿日期: 2022-08-24 修回日期: 2022-11-15

资助项目: 中国科学院咨询项目(2021-SM02-B-010)

第一作者: 胡红浪, 研究方向为水产遗传育种与苗种管理, E-mail: huhonglang1990@163.com

通信作者: 桂建芳, 中国科学院院士, 研究方向为水产遗传育种与鱼类发育遗传学, E-mail: jfgui@ihb.ac.cn

关键词: 水产种业; 育种技术; 种业振兴; 发展建议

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

振兴种业是保障国家粮食安全的核心要素,也是保障国家安全的重要举措。水产种业作为国家种业的重要组成部分,为渔业绿色高质量发展发挥着基础性、先导性和战略性作用。目前,我国已培育水产新品种 266 个^[1-4],拥有水产种业企业 2.1 万余家^[5],年提供苗种 6 万亿尾(粒)以上^[6],产值约 743 亿元^[7],为满足人民群众食品消费需求、提高农民和农村经济收入、实现乡村振兴提供了有力保障。

水产遗传育种学是研究水产生物遗传变异的规律和育种技术的一门分支学科,涵盖鱼、虾蟹、贝、藻、龟鳖、棘皮类等遗传育种研究^[8]。通过搜集、整理、鉴定和利用重要水产种质资源,应用遗传育种技术,培育优质、高产、抗病、抗逆等经济性状优良的水产新品种,在提高水产品产量和质量等方面起到重要作用。水产遗传育种技术创新是水产种业发展的核心要素,是水产种业及养殖业健康发展的第一动力。制约种业发展的因素,既有机制问题,也有技术问题,本文仅从技术视角,通过分析水产遗传育种技术研究与应用现状,结合种业振兴行动的目标和任务,对水产遗传育种技术发展方向提出建议。

1 水产遗传育种技术研究、发展与应用

1.1 水产遗传育种技术发展现状

我国是世界上最早开展水产选择育种技术研究的国家之一,20 世纪 70 年代初就建立了专门从事鱼类遗传育种的研究所^[9]。经过 50 年的发展,水产遗传育种科技综合实力已在国际上处于先进水平,近 10 年来,我国水产遗传育种新技术和新方法不断涌现,水产育种技术开始从传统的选择育种、杂交育种,逐渐向传统育种与现代分子辅助及基因组选择育种技术相结合的方向发展^[10]。

种质资源鉴定评价与保存技术日趋完善 一是种质资源鉴定评价技术不断创新。目前,一些重要的养殖品种已经建立了从形态学、细胞学、生物化学和分子生物学到经济性状的一整套种质鉴定技术;分别依托转录组、简化基因组测序等技术手段,开发了大量 SSR、SNP 等新的遗传标

记资源,逐步取代早期的 RFLP、AFLP、STS 等标记。二是建立并应用水产种质低温冷冻保存技术。有团队发明了鱼类胚胎玻璃化和程序化冷冻技术^[11],建立和完善了细胞、精子、胚胎等 3 个层次的鱼类种质保存技术体系;开展了七带石斑鱼 (*Epinephelus septemfasciatus*)^[12]、牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*)^[13] 等水生动物胚胎冷冻保存技术;对 181 种鱼类精子进行了冷冻保存^[14],实现了产业化应用;相继开发了配子体超低温冷冻、固相培养和无菌液相保存等藻类种质保存新技术。

传统育种技术逐步成熟 一是利用群体或家系选育技术,培育了一大批水产养殖新品种。在自主培育的 236 个品种里,超过 64% 的品种为选育种,选育技术的广泛应用有效提升了我国水产养殖遗传改良水平。二是利用杂种优势,通过种内、种间和远缘杂交技术,培育并获得了具有生长速度快、抗逆性强、后代不育等特点的鱼类、贝类、刺参等一大批水产养殖新品种。三是利用细胞工程技术、倍性育种技术和性控技术,培育并获得了具有单性率高、生长速度快、适应性强和成活率高等特点的新品种,如异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 系列品种、全雄黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)、全雌牙鲆、全雌三倍体虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 和湘云鲫 (*Carassius auratus Triploid*) 等,这些技术具有广阔的应用前景。

传统育种技术与现代技术深度融合 一是基于 BLUP 遗传评估,融合数量遗传学、生物统计学和计算机技术创立的“水产动物多性状复合育种技术”^[15],应用该技术培育并获得了中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*)、罗氏沼虾 (*Macrobrachium rosenbergii*)、斑点叉尾鲷 (*Ictalurus punctatus*)、扇贝、大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)、牙鲆、鲤 (*Cyprinus carpio*) 等多个养殖新品种,达到国际先进水平。二是利用分子生物技术,针对不同的目标性状,开发了大量的连锁遗传标记与数量性状位点 (QTL),与传统育种技术进行深度融合,开展分子标记辅助育种^[16],加快了育种进程,成功培育出如“海大金贝”、全雄黄颡鱼、全雄罗非鱼、高雌半滑舌鳎 (*Cynoglossus semilaevis*) 等新品种,达到国际领先水平。

生物育种技术不断创新 一是基于 REML 和 BLUP 为核心的多性状遗传评估技术, 整合了 GBLUP、MixP 和 gsBay 等全基因组选择算法, 开发了一套以贝类为代表的基因组选择育种新平台, 实现快速准确地估计全基因组育种值, 并建立了高通量、低成本 SNP 标记开发和分型技术, 采用 GWAS 分析和全基因组选育技术, 培育出栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*)“蓬莱红 2 号”新品种^[17]。二是最近几年发展起来的对基因组进行定点修饰的基因组编辑技术已在罗非鱼、半滑舌鳎、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*)、鲫和脊尾白虾 (*Exopalaemon carinicauda*) 等种类上开始探索研究^[18], 可以预计在不远的将来, 该项技术定会在水产育种中得到广泛应用。

1.2 水产育种技术专利情况

专利制度是鼓励科技创新、保护知识产权的重要制度, 其在水产种业领域的应用保障了我国水产产业发展的创新动力, 有效驱动了我国水产养殖业转型升级。

从专利的数量来看, 我国水产种业的发展处于世界领先地位, 相关专利规模处于绝对优势: 通过国际专利数据分析服务检索的 876 条水产育种专利中, 我国有 813 条记录, 占比 92.8%; 同时, 我国水产种业相关专利数量总体呈现逐年递增趋势。

从专利的技术领域来看, 水产新品种养殖、生物化学测定或检测方法、育种方法领域的专利较多。以国际专利 (IPC) 分类划分为例, 涉及水产新品种养殖类 (A01K61/00) 的专利约占总数的 38.1%, 涉及核酸等生化测定或免疫检测 (C12N15/11) 的专利约占总数的 22.4%, 涉及基因工程、遗传工程或杂交 (C12N15/11、C12N15/12、C12N15/10、A01H1/02) 等育种方法的专利约占 23%^[19]。

1.3 水产遗传育种技术应用情况

创制育种新材料 我国水产科研人员应用种质鉴别、群体选育、杂交育种、雌核生殖等技术, 创制了一批育种新材料。例如: 鉴别出具有单性雌核生殖等多种生殖潜能的银鲫不同克隆系^[20]、超雄罗非鱼^[21]和黄颡鱼^[22], 创制出有育种价值的新种质; 通过远缘杂交培育各类多倍体和育种新材料, 如: 适温广的七带石斑鱼群体, 易人工繁育的棕点石斑鱼群体, 通过攻毒实验培育牙鲆抗鳃弧菌病群体及抗迟缓爱德华氏菌群体,

以及选育生长快、抗逆性强的刺参新品系等。

培育水产新品种 20 多年来, 我国科研人员应用常规育种和现代育种技术培育出一批水产新品种。截至 2022 年, 通过全国水产原种和良种审定委员会审定并经农业农村部公告的水产养殖新品种 266 个, 其中: 自主培育品种 236 个, 包括 152 个选育品种、73 个杂交品种和 11 个其他品种, 涵盖鱼、虾蟹、贝、藻、龟鳖、棘皮类等主要养殖种类。在新品种培育过程中, 大部分品种综合应用了多种遗传育种技术, 并且这一趋势在近年品种培育工作中愈发明显^[10]。概括来说, 一般是以群体选育、家系选育或杂交选育为基础, 单独或联合使用分子标记辅助育种、BLUP 遗传评估、全基因组选择育种、雌核生殖、诱变 (藻类) 等育种技术。

2 以种业振兴行动视角看育种技术短板

2021 年 7 月 9 日, 中央全面深化改革委员会第二十次会议审议通过《种业振兴行动方案》(简称《方案》)。这是继 1962 年出台《关于加强种子工作的决定》后, 中央再次对种业发展作出的重要部署。《方案》明确了实现种业科技自立自强、种源自主可控的总目标, 并围绕种质资源保护利用、创新攻关、企业扶优、基地提升、市场净化等 5 个方面提出具体目标任务, 为我国种业发展提供了路线图与任务书。对照《方案》总体要求, 我国水产养殖用种总体有保障、风险可管控, 也表现出了 3 个短板问题, 即: 国内种质资源丰富但遗传改良率不高、科研育种成果多但产业转化率不高、种业企业多但核心竞争力不强^[23]。具体体现在资源保护利用不够、育种创新水平不高、企业竞争力不强、市场环境亟待优化等方面。

2.1 种质资源保护与利用方面

我国是世界上水产种质资源最丰富的国家之一, 有近 2 万种水生生物, 其中鱼类 4000 种以上, 虾类、蟹类、贝类、头足类和藻类等水生生物数量众多。一方面, 我国积极推进水产种质资源保护区建设和种质资源场建设, 对水产种质资源及其产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道等进行保护。另一方面, 我国初步搭建了具有重要经济价值和遗传价值的水产种质资源体系建设框架。

2021 年, 我国在水产养殖种质资源保护与利用等方面取得积极进展。首次启动全国水产养殖

种质资源普查, 并于年内完成基本情况普查; 发布水产十大优异种质资源; 国家海洋渔业生物种质资源库揭牌运行, 淡水渔业种质资源库和南海渔业种质资源库推进建设; 水环境污染、水工建筑物对渔业资源造成的生态损害正在逐步得到重视; 水产种质资源保护与利用得到了前所未有的社会关注。然而, 种质资源保护利用程度依然无法满足水产种业可持续发展的需要。

水产种质资源搜集鉴定工作尚不能满足产业发展需求 截至目前, 虽已完成水产养殖种质资源基本情况普查, 但对于新种质研发极为重要的野生水产种质资源情况仍缺少面上情况了解, 其资源总量、空间分布、遗传基因信息、消失风险性等不甚清晰。同时, 凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)、鲢鳙等水产种质资源仍受制于国外, 大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)、斑点叉尾鲷等养殖业快速发展、但种质资源保有量存在不同程度的不足, 限制了育种研发工作。

水产种质资源利用体系建设与产业需求不平衡 从国家级水产种质资源保护区分布看, 存在空间布局不平衡的问题。如西南地区及河口地区相关水系保护不足, 与其丰富的生物多样性和生态功能完整性保护的要求不符。从主要保护对象的设置看, 优异种质资源鉴定和保存的深度、广度均不足, 尚有 69 种国家级重点保护经济水生动植物未被纳入^[24]。

种质资源有效利用率不高, 共享机制尚未建立 当前, 我国水产种质资源的搜集、鉴定、登记和保存等工作均处于起步阶段。无论是相比国内的作物、畜禽种质资源收集利用体系, 还是相比国外, 均处于落后水平。比如, 美国种质资源搜集、鉴定和利用体系——国家植物种质资源系统 (National Plant Germplasm System, NPGS) 具有分工合理、信息共享、权属清晰、合作转化效率高等特点^[25], 值得我们研究、学习和借鉴。

2.2 育种技术创新攻关方面

当前, 四大家鱼、鲤、鲫、鳊、鲂、罗非鱼、罗氏沼虾、扇贝、海带、紫菜等种质资源完全自给; 我国水产养殖遗传改良率为 52.8%^[14], 其中, 鲤、鲫、罗非鱼、中国明对虾、扇贝、海带等遗传改良率达到 100%。然而, 四大家鱼等重要养殖产量贡献种, 因性成熟周期长、经济效益不高等原因, 列入国家、地方或企业育种计划的还很少,

青鱼和草鱼还一直依赖于原种繁育苗种来满足养殖生产需要。

育种核心技术相对落后 目前, 国际种业发达国家育种处于“常规育种+现代生物技术育种+信息化育种”时代, 我国水产育种技术研发虽然已达世界先进水平, 但在实际育种技术应用方面仍以群体选育、杂交等传统技术为主, 育种工作的科学性、精准性难以体现, 育种效率、效果不尽人意。首先, 相对于数百个养殖品种和更多的种质资源鉴定和保护的潜在需求, 分子标记与性状鉴定、基因与遗传解析技术、保种维持技术等种质资源保护中应用有限, 处于起步阶段。其次, 育种技术, 尤其是先进育种技术在育种实践中集成和应用不足。我国许多传统养殖对象的利用仍长期停留在较为原始的驯养阶段。

育种创新成果转化机制尚不成熟 当前, 我国水产育种主体是公益性的科研院所、大专院校, 在通过国家审定的 236 个自主研发的水产新品种中, 科研院所及大专院校作为第一研发单位的占比超过 80%^[26]。但丰厚的新品种成果尚缺少成熟的育种创新成果转化机制予以配套。一方面, 科研单位内部的创新成果转化机制还不顺畅, 公益性育种单位的研发动力同产业需求不完全一致, 商业化运营的动力先天不足; 另一方面, 科研单位与企业之间的成果转化衔接机制还不成熟, 企业与科研单位距离建立起有助于双方发展壮大的稳定的商业化育种机制仍有差距。造成这个问题的主要原因是科研成果权益分配制度还不健全, 我国虽然在顶层设计方面有较好的成果转化政策与措施, 但在具体实践过程中, 迟迟不能落地, 科研单位无法享受科研成果转化带来的利益分配, 导致其缺少创新成果产业化的动力, 进而也抑制了新品种研发的热情。

育种创新专业人才难以满足需求 经过多年建设与发展, 我国建立了一批实力较强的水产育种创新团队。据不完全统计, 包括科研院所、大专院校、推广机构及企业等在内, 我国种业技术创新主体主要有 67 家, 水产种业专业人才近 5 万人, 其中: 专业育种人才约 700 人、种业推广人才约 3300 人、育苗和经营人才约 4.5 万人。但相比我国水产养殖种类繁多、规模巨大的实际, 急需培养一批具有国际视野、先进理念和专业能力的育种科研、种业生产管理人才, 特别是商业化育种的顶层设计、经营管理和一线生产技术

人才。

2.3 种业生产体系建设方面

1998年,我国启动了水产原良种生产体系建设。截止目前,已有遗传育种中心31个、国家级水产原良种场87家、省级水产原良种场900多家及2万余家苗种繁育场,基本形成了以水产原良种场为核心、以遗传育种中心为支撑、直达养殖端的水产种苗生产供应体系。总体上看,发展态势良好;但从长远发展角度考虑,现有保种供种能力还不能满足种业振兴发展的需要^[27]。

水产种业企业育种创新能力不强 观察国内外作物、畜禽、水产种业领域,做大做强者均为企业,企业的天然逐利性给予了其强大生命力,商业化育种是做强种业的必由之路,但我国商业化育种还处于起步阶段。水产苗种企业中年均销售收入超过1000万元的企业仅有67家,大部分企业没有育种研发投入,即使有研发投入的企业,其投入占销售额之比也很低。普遍存在企业创新能力不足、投入能力有限、抗风险能力弱等问题^[26]。

种业生产体系技术力量不足 伴随产业的不断发展,水产种业对技术支撑水平的要求也越来越高,特别是在种业技术方面的资金政策投入与发展需求不相适应的问题愈发凸显,主要表现在“三个”不平衡:一是软、硬实力投入不平衡,政策、资金投入均集中在“看得见”的基础设备等硬件方面,对种业人才培养、技术水平提升等方面投入较少,“看不见”的软实力提升速度有限;二是种业全产业链投入不平衡,投入过于侧重生产环节,对种质资源保护、育种创新、品种测试和良种推广等种业生产上下游技术提升投入较少;三是种业投入资金不平衡,投入比较分散,资金分配比例与产业发展规模不相适应,重要养殖品种支持不足。

2.4 水产种苗监管方面

当前,我国实行水产苗种生产许可制度,在流通过程中对苗种药残及疫病情况进行检验检疫,一定程度上保障了苗种质量安全,但与产业发展需求相比,仍有不足。

水产苗种质量监管缺失 当前,我国缺少对亲本质量及苗种生产过程的有效监管,苗种市场上流通大量符合药残及疫病检验检疫要求、但

质量参差不齐的产品。同时,劣币驱逐良币的现象时有发生,劣质苗种凭借低价挤占市场,影响了优质苗种的生产经营,优苗优价的市场机制还没有完全实现。

知识产权保护机制尚未建立 当前,我国缺少水产新品种知识产权保护政策,申报相关专利也只能从技术路线方面着手,自我保护能力有限,品种培育单位面对套牌、剽窃等侵权行为维权困难,相关机制建设不能满足产业发展需要。若没有保护自主培育的种质资源不外流的控种策略,辛苦多年培育的品种仅需自繁一代就易主他人,严重打击了品种创新主体的积极性。

3 水产遗传育种技术研究发展展望

进入新世纪以来,由于结构解析、定向突变、计算机模拟等技术的不断突破,新兴学科高度交叉,前沿技术深度融合,重大理论与技术创新不断涌现,使在分子水平上对生命及其大分子的人工设计和改造成为可能,全球科技创新速度显著加快,从认识生命、改造生命走向合成生命、设计生命,不断孕育农业新动能和新业态。特别是最近几年来,水产品作为“蓝色食品”可提升国民营养及其低碳排放的环境友好性能,已成国际共识,中国水产养殖业的成功经验塑造了全球渔业蓝色转型的动能。水产养殖在保障全球食品安全中的作用再次引发了国际科技界的高度关注,水产遗传育种技术创新和水产种业发展的竞争趋势已经形成。日新月异的鱼类等水产生物遗传和发育基础研究突破^[28-29]已催生出多条鱼类精准育种技术路径,如基于基因编辑技术路径可导入有益基因或移除不利基因,基于性别特异标记技术路径能培育单性群体,基于可控原始生殖细胞开关技术路径可生产不育子代,基于借腹怀胎技术路径能提升育种效率,基于基因组整合与有性生殖重新获得可创制基因组重构的人工合成多倍体,等等。然而,技术发展始终要服务于产业需求,面对《方案》对种业发展提出的目标与要求,我们在奋力提升核心技术水平的同时,应注重向当前发展阶段亟待优化的种业薄弱环节投入更多关注^[30-31]。

3.1 加强种质资源保存与创新利用技术研究

加强种质保存技术研究 种质资源活体保存技术受制于成本高、抵抗风险能力弱等原因发

展缓慢。当前, 配子与胚胎冷冻保存正逐步成为替代活体保种的最有效方式。在水产领域, 目前只有部分物种精子冷冻技术应用效果较好。因此, 加强精子冷冻保存及活力恢复技术研究, 开展生殖干细胞、卵母细胞、胚胎等保存及活力恢复技术研究, 是种质资源保护与利用领域技术研究的重点方向之一。

加强生殖细胞移植技术研究 生殖细胞移植 (germ cell transplantation, GCT) 技术是通过显微注射, 将供体的生殖干细胞注射到宿主体内, 进而形成供体的功能性雌雄配子。在种质保存中应用 GCT 技术, 可以提升濒危物种种质资源保护以及性成熟时间长的名贵物种的种苗繁育能力, 为进一步提高水产种质资源保存的种类和数量提供技术保障。

加强全基因组测序及重测序技术研究 基因组保存着种质的全部特性, 是种质资源最根本的信息载体。对主要养殖品种开展全基因组测序及重测序工作, 可以建立目标物种的基因组序列图谱、分析不同个体基因组间的结构差异并形成电子基因库; 同时, 深化基因型与表型的因果关系研究, 形成“表型-基因型大词典”等“工具书”, 完成 SNP 及基因组结构注释等工作, 为种质创新利用积累基础数据、提供重要支撑。

3.2 加强现代育种技术创新及应用

加强精准育种基因编辑等技术研究 基因编辑等精准育种是利用分子生物学技术, 在基因层面进行选择、聚合、剔除或改造等操作, 实现对育种对象定向设计目标性状的快速改良, 提升育种工作的精准性与效率。最近, 关于鱼类肌间刺主效基因鉴定及其剔除技术研究已在斑马鱼、团头鲂、鲫和银鲫中取得了重要进展^[32-33], 在金鱼观赏性状的因果基因鉴定和理想性状再造上也取得重要突破^[34-35]。因此, 在夯实水产常规育种技术的基础上, 进一步布局基因编辑等精准育种技术研究, 建立技术储备, 实现“弯道超车”, 是水产育种的当务之急。

加强跨界技术融合应用研究 伴随现代科技发展的日新月异, 应用现代生物统计、计算机及数据分析等技术辅助开展育种的趋势愈发明显。以分子设计育种为例, 在解析各种性状的主效基因、关键基因及其信号通路的基础上, 先在计算机平台上对育种对象的生长、发育等目标性

状进行模拟预测, 设计目标品种的基因蓝图, 再应用相关育种技术培育新品种。加强生物育种技术研发的同时, 应注重应用大数据分析、信息化、智能化等技术, 进一步提升育种效率、缩短育种周期。

3.3 加强种苗扩繁技术标准化研究及应用

加强水产种苗扩繁生产技术标准化研究 水产种苗质量水平不仅与品种本身特性有关, 也与亲本扩繁、后备亲本培育及人工育苗的生产方式、流程是否科学合理有关。应深入研究育种对象的繁殖生理学及其在人工繁育环境中的生长发育规律, 通过开展规模化生产实践, 总结提炼不同品种的标准化扩繁、育苗生产模式, 制订或修订相关标准, 推进重要水产养殖物种种苗生产的规范化、标准化。

加强水产良种良法配套技术研究与应用

优良品种需要在良好的环境、适宜的养殖条件下才能展示其优良品质或性状, 特别是水产养殖环境的水质理化因子复杂多变, 更需要研究适应不同区域、不同水温、不同水质、不同养殖方式的水产动物养殖(藻类栽培)技术, 建立 1(品种)+N(养殖技术) 配套技术, 实现良种效应的最大化。

3.4 加强育种技术商业化应用

加强大规模表型测试系统研究 准确快速获取大规模群体表型数据对育种, 特别是对效率要求较高的商业化育种具有重要意义。在水产领域中, 多数表型数据获取仍依赖人工测量, 速度慢、误差大; 同时, 测量结果也难以开展高效的数据保存与分析。完整的表型检测系统应包含大规模表型检测的设备及分析处理数据的数学模型, 可以显著提升育种工作效率, 节约时间、降低成本, 减少商业化育种周期。

加强商业化育种全流程技术优化与集成研究 同传统育种模式相比, 商业化育种依赖其高度流程化的育种工作模式可持续推出新品种。规模化的育种材料储备、测配组合、按计划与比例提升品种特性是商业化育种模式能够高效率推出新品种的关键。为此, 应研究、学习并借鉴国际水产动物商业化育种全流程技术, 结合产业实际, 建立标准化的性状测定、育种工艺、设备设施等技术体系, 不断提升育种的精准性和效率, 进一步提升我国水产商业化育种技术水平。

3.5 加强种业市场监管技术支撑

加强品种保护控制技术研究 国内外动物新品种知识产权保护制度尚未建立, 应加强水产新品种知识产权保护相关技术策略研究。应用细胞工程育种技术培育单性品种、三倍体不育品种, 应用大规模家系育种、杂交育种技术获得配套系并与商业化扩繁、育苗结合的生产方式, 可以有效控制核心种质资源的输出。研究探索更多更好的品种保护控制技术策略, 实现水产新品种知识产权自我保护。

加强品种特异性检测技术研究 长期以来, 种业侵权执法工作面临追溯难、取证难、查处难等问题, 打击假冒伪劣套牌侵权, 首先要做到科学识假、准确辨假。为此, 研究基于分子标记技术的品种 DNA“防伪标签”, 搭建国审新品种 DNA 指纹库, 将为今后开展水产品种侵权案件维权提供重要依据。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 全国水产技术推广总站. 中国水产种业发展报告: 1949—2019[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 33-99. National Fisheries Technology Extension Center. Report on the Development of China's Aquatic Seed Industry: 1949-2019[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021: 33-99 (in Chinese).
- [2] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业农村部公告第 324 号 [EB/OL]. (2020-08-20)[2022-07-23]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202008/t20200827_6351056.htm. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Announcement No. 324 of the Ministry of agriculture and rural development of the people's Republic of China[EB/OL]. (2020-08-20)[2022-07-23]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202008/t20200827_6351056.htm (in Chinese).
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业农村部公告第 451 号 [EB/OL]. (2021-07-28)[2022-07-23]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202108/t20210802_6373286.htm. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Announcement No. 451 of the Ministry of agriculture and rural development of the people's Republic of China[EB/OL]. (2021-07-28)[2022-07-23]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202108/t20210802_6373286.htm (in Chinese).
- [4] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业农村部公告第 578 号 [EB/OL]. (2022-07-14)[2022-07-20]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202207/t20220714_6404711.htm. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Announcement No. 578 of the Ministry of agriculture and rural development of the people's Republic of China[EB/OL]. (2022-07-14)[2022-07-20]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202207/t20220714_6404711.htm (in Chinese).
- [5] 中华人民共和国农业农村部. 对十三届全国人大四次会议第 2606 号建议的答复 [EB/OL]. (2022-01-11)[2022-03-18]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202201/t20220111_6386713.htm. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Reply to recommendation No. 2606 of the fourth session of the 13th National People's Congress[EB/OL]. (2022-01-11)[2022-03-18]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202201/t20220111_6386713.htm (in Chinese).
- [6] 农业农村部新闻办公室. 构建国家种业企业阵型 加快打造种业振兴骨干力量 [EB/OL]. (2022-08-09)[2022-08-12]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202208/t20220809_6406502.htm. Information Office, Ministry of Agriculture and Rural Areas of the People's Republic of China. Build a national seed industry enterprise formation and accelerate the building of a backbone force for the revitalization of the seed industry[EB/OL]. (2022-08-09)[2022-08-12]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202208/t20220809_6406502.htm (in Chinese).
- [7] 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. 2022 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2022: 3. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2022 China Fisheries Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022: 3 (in Chinese).
- [8] 桂建芳, 周莉, 殷战, 等. 水产遗传育种学 [M]. 北京: 科

- 学出版社, 2021 .
- Gui J F, Zhou L, Yin Z, *et al.* Genetic Breeding in Aquaculture[M]. Beijing: Science Press, 2021 (in Chinese).
- [9] 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).
- [10] 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]. Scientia Sinica Vitae, 2019, 49(11): 1409-1429 (in Chinese).
- [11] 鱼类种质低温冷冻保存技术的建立与应用 [Z]. 青岛: 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 2012.
- Establishment and application of fish Germplasm Cryopreservation Technology[Z]. Qingdao: Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, 2012 (in Chinese).
- [12] 姜静, 田永胜, 翟介明, 等. 超低温冷冻保存对七带石斑鱼胚胎酶活性的影响[J]. 农业生物技术学报, 2014, 22(4): 476-485.
- Jiang J, Tian Y S, Zhai J M, *et al.* Effects of cryopreservation on enzyme activity in seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* embryos[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2014, 22(4): 476-485 (in Chinese).
- [13] 武鹏飞. 牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*) 胚胎冷冻保存研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- Wu P F. Study on cryopreservation of Flounder (*Paralichthys olivaceus*) embryos[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009 (in Chinese).
- [14] 本刊讯. 中国水产种业发展报告(1949—2019年)[J]. 中国水产, 2020(9): 11-21.
- Newsletter. Report on the development of China's aquatic seed industry (1949—2019)[J]. China Fisheries, 2020(9): 11-21 (in Chinese).
- [15] 栾生, 隋娟, 孟宪红, 等. 最佳遗传贡献理论及其在水产动物选择育种中的应用前景[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(6): 133-140.
- Luan S, Sui J, Meng X H, *et al.* Optimum contribution theory and the prospect of its application in selective breeding in aquaculture[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(6): 133-140 (in Chinese).
- [16] 鲁翠云, 匡友谊, 郑先虎, 等. 水产动物分子标记辅助育种研究进展[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 36-53.
- Lu C Y, Kuang Y Y, Zheng X H, *et al.* Advances of molecular marker-assisted breeding for aquatic species[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(1): 36-53 (in Chinese).
- [17] 《中国水产》编辑部. 栉孔扇贝“蓬莱红2号”[J]. 中国水产, 2014(10): 47-48.
- Editorial Office of China Fisheries. *Chlamys farreri* "Penglai red No. 2"[J]. China Fisheries, 2014(10): 47-48 (in Chinese).
- [18] 王巍, 胡红霞. 基因编辑技术在鱼类中的研究及在水产养殖中的应用展望[J]. 中国水产, 2019(9): 87-88.
- Wang W, Hu H X. Research on gene editing technology in fish and its application prospect in aquaculture[J]. China Fisheries, 2019(9): 87-88 (in Chinese).
- [19] 任鹏, 王建波, 王晓璇, 等. 我国水产种业专利发展概况及分析[J]. 中国水产, 2019(6): 33-36.
- Ren P, Wang J B, Wang X X, *et al.* Development status and analysis of the patents in aquatic breeding industry of China[J]. China Fisheries, 2019(6): 33-36 (in Chinese).
- [20] Lu M, Li Z, Zhu Z Y, *et al.* Changes in ploidy drive reproduction transition and genomic diversity in a polyploid fish complex[J]. Molecular Biology and Evolution, 2022, 39(9): msac188.
- [21] 杨永铨, 张海明, 陈远生. WY♀-YY♂型罗非鱼繁殖体系研究[J]. 淡水渔业, 2013, 43(1): 89-93.
- Yang Y Q, Zhang H M, Chen Y S. Research of propagation system of WY♀-YY♂ type tilapia[J]. Freshwater Fisheries, 2013, 43(1): 89-93 (in Chinese).
- [22] 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.
- [23] 乔金亮. 解读中央经济工作会议精神: 以科技创新打好种业翻身仗 [N]. 经济日报, 2020-12-26(2).
- Qiao J L. Interpretation of the spirit of the central economic work conference: Fight the seed industry turnaround with scientific and technological innovation[N]. Economic Daily, 2020-12-26(2) (in Chinese).

- [24] 盛强, 茹辉军, 李云峰, 等. 中国国家级水产种质资源保护区分布格局现状与分析[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 62-80.
Sheng Q, Ru H J, Li Y F, *et al.* The distribution pattern of national aquatic germplasm reserves in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(1): 62-80 (in Chinese).
- [25] 黎裕, 王天宇. 美国植物种质资源保护与研究利用[J]. 作物杂志, 2018(6): 1-9.
Li Y, Wang T Y. Preservation and researches on plant germplasm resources in the U. S. A.[J]. *Crops*, 2018(6): 1-9 (in Chinese).
- [26] 韩枫, 孙广伟, 史博, 等. 我国水产商业化育种现状与发展建议[J]. 渔业研究, 2022, 44(4): 387-394.
Han F, Sun G W, Shi B, *et al.* Current situation and development suggestions of aquaculture commercial breeding in China[J]. Journal of Fisheries Research, 2022, 44(4): 387-394 (in Chinese).
- [27] 操建华, 孙东升. 中国现代水产种业创新发展的路径思考[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(3): 377-389.
Cao J H, Sun D S. The innovative development path of modern aquaculture seed industry in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(3): 377-389 (in Chinese).
- [28] Li X Y, Mei J, Ge C T, *et al.* Sex determination mechanisms and sex control approaches in aquaculture animals[J]. *Science China Life Sciences*, 2022, 65(6): 1091-1122.
- [29] 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.
- [30] 王建波. 现代水产种业引领水产养殖绿色发展[J]. 中国水产, 2018(12): 61-64.
Wang J B. Modern aquatic seed industry leads the green development of aquaculture[J]. China Fisheries, 2018(12): 61-64 (in Chinese).
- [31] 胡红浪, 王建波, 韩枫. 水产养殖用种创新进展与展望[J]. 农村工作通讯, 2022(16): 29-31.
Hu H L, Wang J B, Han F. Innovation progress and prospect of aquaculture seed[J]. Newsletter About Work in Rural Areas, 2022(16): 29-31 (in Chinese).
- [32] 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): nwac152.
- [33] Xu H, Tong G X, Yan T, *et al.* Transcriptomic analysis provides insights to reveal the *bmp6* function related to the development of intermuscular bones in zebrafish[J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 2022, 10: 821471.
- [34] Yu P, Wang Y, Yang W T, *et al.* Upregulation of the PPAR signaling pathway and accumulation of lipids are related to the morphological and structural transformation of the dragon-eye goldfish eye[J]. *Science China Life Sciences*, 2021, 64(7): 1031-1049.
- [35] Yu P, Wang Y, Li Z, *et al.* Causal gene identification and desirable trait recreation in goldfish[J]. *Science China Life Sciences*, 2022, 65(12): 2341-2353.

Current situation and prospect of technological innovation in China's aquatic seed industry

HU Honglang^{1,2}, HAN Feng^{1,2}, GUI Jianfang^{3,4*}

(1. *National Fisheries Technology Extension Center, Beijing 100125, China;*

2. *China Society of Fisheries, Beijing 100125, China;*

3. *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;*

4. *Innovative Academy of Seed Design, Chinese Academy of Sciences, College of Modern Agriculture Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*

Abstract: Seed industry is the foundation of agricultural development, and a flourishing seed industry is the core element to ensure national food security, as well as an important measure to ensure national security. The development of seed industry involves many factors such as policies, technology and market. The development of aquatic genetic breeding technology in China is progressing with each passing day, but there is still a gap when compared to requirements put forward in the action plan for the revitalization of the seed industry. This paper expounds the current situation of aquatic genetic breeding technology in China from the perspectives of the research, development and application of breeding technologies, and analyzes the shortcomings of aquatic breeding technology in China in terms of genetic resources protection and utilization, breeding technology innovation, breeding production system construction and monitoring and management of juveniles. Overall, the supply of juveniles is sufficient and the risks are manageable, but there are three main problems: the domestic genetic resources are rich but the genetic improvement rate is not high, the scientific research and breeding achievements are many but the transformation efficiency is not high, and the seed industry enterprises are many but the core competitiveness is not strong. In view of the short board, this paper puts forward some suggestions, such as strengthening the research of genetic resources mining and conservation and innovative utilization technology, strengthening the research and application of modern breeding technology, especially the creation and application of new genetic resources, strengthening the application of production system technology standardization, strengthening the research of breeding technology commercialization application, and strengthening the technical support for seed industry market supervision, so as to provide reference for the research direction of aquatic breeding technology innovation and the formulation of seed industry development policies in China.

Key words: aquatic seed industry; breeding technology; seed industry revitalization; development proposal

Corresponding author: GUI Jianfang. E-mail: jfgui@ihb.ac.cn

Funding projects: Consulting Project of Chinese Academy of Sciences (2021—SM02—B—010)