

DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20250903002

http://www.yykxjz.cn/

王娜, 邵长伟, 刘志鸿, 张晓雯, 廖梅杰, 高保全, 吴彪, 孙秀俊, 陈张帆, 刘宇岩, 陈松林. 我国水产种质资源利用安全战略研究. 渔业科学进展, 2025, 46(6): 11–20

WANG N, SHAO C W, LIU Z H, ZHANG X W, LIAO M J, GAO B Q, WU B, SUN X J, CHEN Z F, LIU Y Y, CHEN S L. Strategic study on the safety of aquatic germplasm resource utilization in China. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(6): 11–20

我国水产种质资源利用安全战略研究*

王 娜^{1,2} 邵长伟^{1,2} 刘志鸿^{1,2} 张晓雯^{1,2} 廖梅杰^{1,2} 高保全^{1,2}
吴 彪^{1,2} 孙秀俊^{1,2} 陈张帆^{1,2} 刘宇岩^{1,2} 陈松林^{1,2①}

(1. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科技中心海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266237)

摘要 水产种质资源是指水产动植物中具有实际或潜在价值的遗传材料, 包括种、亚种、品种、品系等。这些资源在渔业和农业领域具有重要的经济、生态和科学价值, 是水产养殖、品种改良和生物多样性保护的基础。水产种质资源涵盖鱼类、虾类、贝类、蟹类、藻类及其他经济价值的水生生物及其遗传物质, 不仅是支撑水产养殖业可持续发展和国际竞争力的核心要素, 更是维护国家食物安全、生态安全和生物多样性的战略性资源。在强化水产种质资源保护的基础上, 如何加强优异水产种质的科学利用及创新发展, 既是国家生物和遗传多样性安全的迫切需要, 也是人们日益增长的对优质健康水产品的迫切需求。本文从水产种质资源利用的基础研究、技术和平台、人工培育和基因改良种质等三个方面开展了安全性评估, 在综述其研究进展的基础上, 分析了这三个方面存在的问题, 并提出了提升水产种质资源利用安全性的建议。未来提升我国水产种质资源利用安全的建议主要包括: 加快建设我国自主知识产权的水产物种基因组资源共享平台, 加大对经济性状遗传机制的解析力度; 加强低成本、高通量、智能化的表型和基因型精准测定技术的研发和功能基因精准操作平台的开发; 加强转基因及基因编辑等科普宣传, 加大品种知识产权保护力度。

关键词 水产种质资源; 利用安全; 基因组资源共享平台; 经济性状遗传机制解析; 知识产权保护
中图分类号 S937 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)06-0011-10

水产种质资源是指具有较高经济价值和遗传育种价值, 可为捕捞、养殖等渔业生产以及其他人类活动所开发利用和科学研究的水生生物资源。我国是世界上水产种质资源最为丰富的国家之一, 第一次全国水产养殖种质资源普查发现全国水产养殖种质资源共有 857 个。在强化水产种质资源保护的基础上, 如何加强优异水产种质的科学利用及创新发展, 既是国

家生物和遗传多样性安全的迫切需要, 也是人们日益增长的对优质健康水产品的迫切需求。

本文将从水产种质资源利用的基础研究、技术和平台以及人工培育和基因改良利用的安全性评估三个方面展开论述, 分别评估其研究进展、存在问题并提出加强安全性的建议, 以期为保障我国水产种质资源利用安全、推动水产业高质量发展提供支持。

* 中国工程院发展战略研究重大项目“水产种质资源安全战略研究”(2023-JB-02-05)、山东省重点研发计划(院士专项)(2023ZLYS02)、中国水产科学研究院创新团队(2023-TD-20)、山东省泰山学者攀登计划专项和青年专家项目共同资助。

王 娜, 研究员, Email: wangna@ysfri.ac.cn

① 通信作者: 陈松林, 院士, 研究员, Email: chensl@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2025-09-03, 收修改稿日期: 2025-09-15

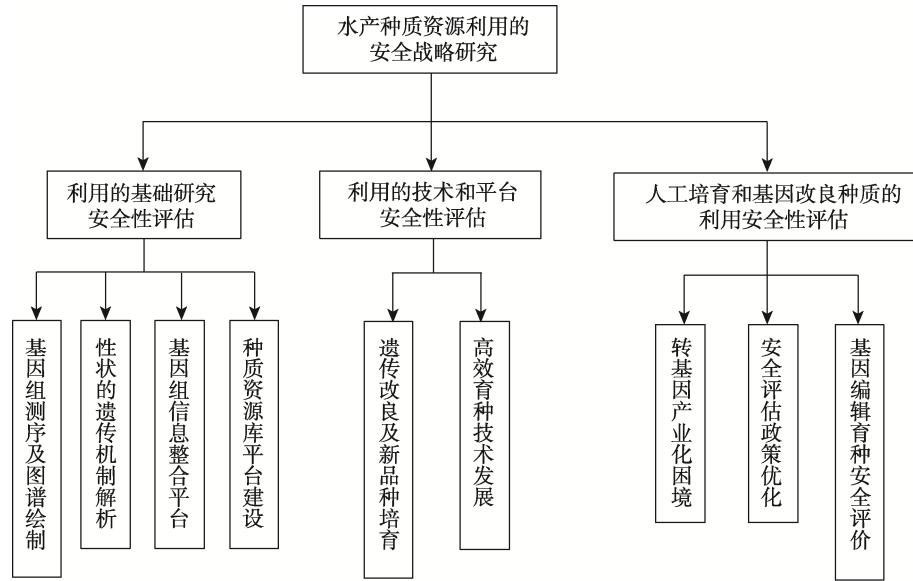


图1 水产种质资源利用安全评估的研究思路

Fig.1 Research approach for safety assessment of aquatic germplasm resource utilization

1 水产种质资源利用的基础研究安全性评估

水产种质资源的科学利用,离不开对物种遗传组成及演化规律的认知。水产种质资源处于驯化早期,具有丰富多样的基因资源,极具选择性育种潜力。水产种质资源在生殖、性别、品质等方面具有多样性和特殊性,功能基因资源的利用前景广阔。

1.1 水产种质资源利用的基础研究进展

1.1.1 我国水产种质资源的基因组测序及图谱绘制方面的基础研究总体处于国际先进地位

自2012年完成牡蛎基因组测序(Zhang *et al.*, 2012)以来,我国已完成了100多种水产种质资源包括半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、海马(*Hippocampus*)、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)、黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)、凡纳对虾(*Penaeus vannamei*)、海参、海带等基因组测序及精细图谱绘制(Chen *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2021; Shao *et al.*, 2017、2023; Wang *et al.*, 2022c; Xu *et al.*, 2019、2014),相关研究成果相继发表在Nature、Cell、Nature Genetics等国际高水平学术刊物。这些重要水产养殖生物基因组图谱绘制及进化机制的研究,一方面使我国水产动物基因组研究跃居国际先进水平,其中在个别种类和方向达到国际领先水平;另一方面,基因组测序产生的遗传信息数据库为水产种质资源的经济性状遗传解析、分子育种技术

创新及品种改良奠定了科学基础。

1.1.2 我国在水产动物重要经济性状的遗传机制解析方面取得丰硕成果

水产动物重要经济性状涵盖生长发育、性别调控、品质形成、抗逆抗病等,其遗传机制解析是种质资源高效利用的关键基础。水产动物的性别决定方式多样,不仅存在基因决定型、环境决定型、年龄决定型等多种类型,而且各种类型之间还具有错综复杂的关系,部分物种存在的雌雄同体及性逆转等现象更凸显了水产动物性别决定的复杂性。近年来,我国科学家在鱼类、龟类等基因型及环境型性别决定机制等研究方面取得重要突破。中国水产科学研究院黄海水产研究所陈松林团队2014年发现*dmrt1*是半滑舌鳎精巢特异表达的雄性决定基因,阐明了性别决定分子机制,揭示了雄鱼比例高达80%的原因及其表观遗传调控机制,成果在Nature Genetics和Genome Research发表(Chen *et al.*, 2014; Shao *et al.*, 2014)。浙江万里学院钱国英、葛楚天团队揭示了龟温度依赖型性别决定的上游调控通路,提出了“pSTAT3-KDM6B 保守盒”调控假说,为全面破译ESD机制指明了方向(Ge *et al.*, 2018; Weber *et al.*, 2020)。比目鱼的眼睛移动是进化研究领域的一个经典问题。中国水产科学研究院黄海水产研究所联合上海海洋大学等单位,发现视黄酸在牙鲆眼睛移动和变态发育中发挥重要的调控作用,揭示比目鱼类变态是通过甲状腺素和视黄酸的双重拮抗调控实现的,相关成果发表在Nature Genetics(Shao *et al.*, 2017)。西北工业大学王文团队发现比目鱼类基因组中与体轴形成相关的视黄酸(RA)通路和WNT通

路的核心基因出现了左右两侧的不对称表达,揭示其不对称体轴发育形成的机制(Lü *et al*, 2021)。中国科学院海洋研究所刘保忠团队首次发现埋栖贝类文蛤(*Meretrix petechialis*)能在体内特定细胞中合成、储存、分泌内源性的红霉素(Yue *et al*, 2022),打破了只有放线菌能合成红霉素的已有认知,基于此发现提出了埋栖贝类适应环境与抵御微生物侵染的新策略,为经济贝类的健康养殖和抗性育种提供了新思路。在鱼类神经内分泌调控方面,中国科学院水生生物研究所殷战团队发现 GH-IGF 轴可激活维生素 D3 对脂肪的吸收利用从而加快鱼体生长(Peng *et al*, 2017),利用 POMCa 突变的银鲫(*Carassius auratus*)和斑马鱼(*Danio rerio*)发现 HPA 轴的钝化可能也是促进鱼体生长的重要因素(Shi *et al*, 2020)。

1.1.3 我国水产种质资源的基因组信息整合平台建设存在物种间发展不均衡现象

在鱼类条形码资源平台构建方面,中国水产科学研究院珠江水产研究所牟希东团队构建了一个包含线粒体基因 COI 和核基因 18S rRNA 条形码的鱼类综合参考数据库——CoSFISH, 包含 21 535 条 COI 条形码和 1 074 条 18S rRNA 条形码,涵盖 8 个纲和 90 个目的 21 589 种鱼类,为鱼类多样性、系统发育学和生物进化研究提供了数据支撑(Wang *et al*, 2024)。而基因组资源整合平台建设方面存在物种间发展不均衡现象。例如,在鱼类基因组资源平台方面,华大基因联合多家单位开展了“万种鱼基因组计划”(https://fish10k.genomics.cn/progress/) (Fan *et al*, 2020),已完成 100 余种高质量基因组序列的组装工作,但整合分析功能尚未健全。该单位联合山东大学等单位构建了超过 4.31 万个海洋微生物基因组的数据库 GOMC (https://db.cngb.org/maya/datasets/MDb0000002) (Chen *et al*, 2024),将极大助力新型基因编辑工具、抗菌肽、塑料降解酶的开发利用。中国海洋大学包振民团队 2020 年构建了物种覆盖度最广、组学资源最丰富、功能最全面的软体动物基因组学分析平台 MolluscDB (Liu *et al*, 2021); 2024 年该团队又推出了国际首个整合宏观/微观进化基因组和功能基因组的综合分析工具 PanSyn (Yu *et al*, 2024),为全面解析基因组进化和功能、基因资源开发利用等提供了有力工具。中国海洋大学刘涛团队构建了藻类细胞器资源数据库 (http://ogda.ytu.edu.cn/), 包括 1 055 个质体基因组和 755 个线粒体基因组。

1.1.4 我国水产种质资源库的平台建设取得阶段性进展

近年来,水产种质领域从国家层面到省级层面陆

续建立了多个种质资源信息平台,通过标准化的数据加工处理建立了较完整、实用、方便、高效的水产种质资源信息系统,使种质资源数据管理更加科学化、规范化。例如,科技部于 2000 年资助中国水产科学研究院通过“我国水产种质资源数据库和网络系统建设”项目,建成了我国水产种质资源信息系统,目前该系统已纳入中国科技资源共享网(https://escience.org.cn/),主要包括科学数据、生物种质与实验材料、重大科研基础设施及大型科研仪器等内容。国家淡水水产种质资源库(http://freshwater.fishinfo.cn)和国家海洋水产种质资源库(http://marine.fishinfo.cn)分别依托中国水产科学研究院、中国水产科学研究院黄海水产研究所牵头组建,在线服务系统涵盖了平台概况、新闻动态、种质资源、平台服务、国际合作、媒体资源、标准规范、规章制度等栏目,能够支持物种资源的高级检索、智能排序,突出种质资源、平台服务、国际合作等平台的主体工作。国家水生生物种质资源库(http://www.nabrc.org.cn)依托中国科学院水生生物研究所于 2019 年 6 月获批建设,亦是由科技部和财政部支持建立的国家科技资源共享服务平台,包括国家斑马鱼资源中心、藻类和原生动物种质资源库、长江鱼类种质资源库、水生植物种质资源库、特色水生动物种质资源库和珍稀水生动物资源库。

1.2 水产种质资源利用基础研究方面存在的问题

1.2.1 基因组信息的整合应用平台和技术不足

相较于基因组解析的高速发展,还存在基因组资源高效整合和共享应用平台滞后、多性状互作的调控网络机制解析不够深入、遗传操作技术平台滞后等问题。国家种质资源库普遍存在优异种质资源发掘手段不够先进、创新应用平台匮乏等问题,无法满足大规模发掘与利用的需要。

1.2.2 水产种质资源的遗传机制等基础理论研究薄弱

由于生存环境的特殊性,水产种质资源的经济性状容易受到环境因素的影响。目前水产种质资源的表型-基因型-环境互作调控机制、多性状互作的调控网络机制等解析不够深入;水产种质的遗传操作技术平台严重滞后,制约了遗传机制解析及育种应用。

1.3 提升水产种质资源利用基础研究的建议

1.3.1 加强建设我国自主知识产权的水产物种基因组资源共享平台,推进水产遗传资源数字化

以种质资源库为基础,建立重要水产种质资源的大数据公共平台,为提高分子育种效率、加大种质资源和数据共享力度,打赢“种业翻身仗”提供基础支撑。

1.3.2 加大对经济性状遗传机制的解析力度

优异种质资源的开发利用离不开对其遗传机制的深度解析,建议充分利用多组学数据平台及先进的分子生物学手段,多维度揭示水产生物生长发育、抗病抗逆、繁殖调控等重要生物学过程的遗传机制,推动水产生物学理论研究的进步,并为遗传育种提供重要基因资源。

2 水产种质资源利用技术和平台的安全性评估

对水产种质资源进行遗传改良,培育具有生长速度快、抗逆(病)能力强、养殖产量高、品质优良等性状的新品种,是水产种质资源高效利用以及水产养殖业健康持续发展的重要保证。而转基因、倍性育种、分子标记辅助育种、基因组选择、基因组编辑、生殖干细胞移植等高效育种技术的创新和应用,是助推水产优质种质资源遗传改良的重要手段。

2.1 水产种质资源利用安全研究进展

2.1.1 我国水产种质资源遗传改良及水产新品种培育成效显著

在国家“863”计划、国家重点研发计划、现代农业产业技术体系等项目资助下,我国科研院所、高校、企业等单位联合攻关,育成一批生产性状显著改良的水产新品种。截至2024年,通过全国水产原种和良种审定委员会审定的水产新品种有306个,包括鱼类150个、虾蟹类49个、贝类62个、藻类24个、棘皮类11个、两爬类(两栖纲、爬行纲)9个、腔肠动物1个。主要采用的育种技术包括传统家系和群体选育、全基因组选育、多性状复合育种、性控育种、杂交育种等。在国家水产推广部门、科研院所、高校及水产企业共同推动下,大多数水产新品种基本实现了产业化应用,大幅提升了养殖效益,不仅带领渔民脱贫致富,同时带动加工、饲料、运输和餐饮等相关产业的良性发展,实现了养殖增产、养殖户增收,推动了我国水产良种的产业化进程,引领我国传统水产养殖业向绿色高质量发展,为乡村振兴提供了技术支撑和种源保障,经济社会效益显著。此外,水产新品种的产业化推广应用,减少了野生自然资源的捕捞量,保护了自然种质资源,部分养殖品种基本实现了良种全覆盖,不需要再捕捞野生资源,生态效益显著。多项水产新品种培育及产业化应用等相关研究成果荣获省部级以上科技奖励,近20年获得国家科技奖励7项,包括“鱼类种质低温冷冻保存技术的建立与应用”获2006年国家技术发明奖二等奖;“半滑舌鲷苗种规模

化繁育及健康养殖技术开发与应用”获2010年国家科技进步奖二等奖;“海水鲆鲽鱼类基因资源发掘及种质创制技术建立与应用”获2014年度国家技术发明奖二等奖、“鲤优良品种选育技术与产业化”、“刺参健康养殖综合技术研究及产业化应用”获2015年度国家科技进步奖二等奖、“扇贝分子育种技术创建与新品种培育”获2018年度国家技术发明奖二等奖、“淡水鱼类远缘杂交关键技术及应用”获2018年度国家科技进步奖二等奖。此外,水产新品种的产业化应用也支撑了一批水产种业企业的快速发展。2022年2月,农业农村部公布广东海兴农集团有限公司等20家企业为2021年中国水产种业育繁推一体化优势企业。2022年7月,农业农村部公布95家水产种业企业和26个专业化平台共121家国家水产种业阵型企业。水产种业企业的快速发展将加快水产商业化育种体系建设,支撑我国水产养殖业健康可持续发展。

2.1.2 高效育种技术的创新发展为水产种质资源的高效利用提供驱动力

近年来,我国水产生物育种技术在鱼类、贝类等品种选育上加快应用,为良种选育打开了全新视角。转基因鱼育种是诞生在中国的一项自主创新研究。自1985年中国科学院水生生物研究所朱作言团队创制出世界上首例转基因鱼以来(Zhu *et al.*, 1985),世界范围内已成功研制出30多种转基因鱼,这些转基因鱼包括了世界水产养殖的许多重要品种,如鲤、罗非、鲇类及鲑鳟类等,其目标性状包括促生长、抗病、抗寒、抗低氧、提升营养品质等诸多方面(Guillén *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2010; White *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2013)。其中5种快速生长的转生长激素基因鱼已建立了稳定遗传的家系,包括我国培育的转 gh 基因(growth hormone)鲤,美国、加拿大、英国和韩国等培育出的转 gh 基因大西洋鲑(*Salmo salar*)、罗非鱼、银大马哈鱼(*Oncorhynchus kisutch*)和泥鳅(*Misgurnus*)等。

我国水产动物多倍体诱导育种研究起始于20世纪70年代,目前已利用该技术研制出三倍体鲤鱼,并实现了产业化应用。分子标记辅助育种技术在鱼类上成功建立,主要集中在性别特异标记辅助性控育种方面。陈松林团队发现了我国首个鱼类性别特异分子标记(Chen *et al.*, 2007),开创了我国鱼类分子标记辅助性别控制研究的先河。开发的半滑舌鲷雌性特异分子标记成为水产育种中“一个标记解决一个产业问题”的典范。以半滑舌鲷为例,基于雌性特异分子标记的半滑舌鲷遗传性别快速检测技术和伪雄亲鱼现场检测技术,成功建立了半滑舌鲷高雌苗种制备技术,解决了半滑舌鲷养殖群体中生理雌性比例过低

(20%以下)的问题,为半滑舌鲷高产抗病新品种“鲷优 1 号”的创制提供了技术手段(Liu *et al*, 2014)。在半滑舌鲷性别特异分子标记研究成果的带动下,我国科学家先后在黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)、鲤鱼、圆斑星鲷(*Verasper variegatus*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)等 30 多种鱼类中开发出性别特异分子标记(Chen *et al*, 2019; Chen *et al*, 2015; Ma *et al*, 2011),有力推动了我国鱼类性别决定分子机制和性控育种的研究进程。近年来,基因组测序和分型技术的突飞猛进极大降低了基因型检测的价格,为基因组选择育种技术的广泛应用提供了契机。陈松林团队与海阳市黄海水产有限公司合作,采用家系选育和基因组选择技术培育出了牙鲆新品种“鲆优 2 号”,这是我国首个利用基因组选择技术改良抗病性状的国审新品种。在相同养殖条件下,“鲆优 2 号”比普通牙鲆生长速度提高 20%左右,养殖成活率提高 20%左右,在山东、河北、天津和辽宁等地具有良好的推广应用效果。广西水产科学研究院朱佳杰团队以 2003 年从国家级青岛罗非鱼良种场引进的吉富罗非鱼后代为基础群体,充分利用家系选育技术和基因组选择技术,培育出了抗病高产的吉富罗非鱼新品种“壮罗 1 号”。与普通吉富罗非鱼相比,“壮罗 1 号”抗无乳链球菌(*Streptococcus agalactiae*)侵染能力平均提高 25.57%,养殖成活率平均提高 19.19%,生长速度平均提高 12.06%,适宜在广西、广东、海南和云南等省区养殖。基因组编辑育种技术是精准育种的重要技术之一。我国科研人员在水产养殖生物基因编辑方面开展了大量工作,创制了一系列具有优良性状的突变体。例如,西南大学王德寿团队在国际上率先建立养殖鱼类(罗非鱼)基因编辑技术,开创鱼类基因编辑育种新途径,已针对肌肉生长抑素 *mstn* (Wu *et al*, 2023)、雄性(*amhy*、*gsdf*)和雌性关键基因(*foxl2*、*cyp19a1a*) (Li *et al*, 2017; Zhou *et al*, 2021a)、体色相关基因 *pmel*、*tyrb*、*csflra* 等(Lu *et al*, 2022a、2022b; Wang *et al*, 2022a)开展了基因编辑研究,构建了 100 多个罗非鱼基因编辑突变系,分别表现出性逆转、生长加快、不育、体色多样化等表型,为培育基因编辑罗非鱼新品种提供了技术支撑。陈松林团队率先建立了海水养殖鱼类半滑舌鲷基因编辑技术,成功将性别决定基因 *dmrt1* 敲除(Cui *et al*, 2017),发现基因编辑雄鱼比普通雄鱼生长快 4 倍以上,大小接近普通雌鱼,由此开辟了半滑舌鲷基因编辑性控育种新途径,为解决阻碍半滑舌鲷养殖产业发展的雄鱼生长慢、个体小的产业问题提供了新的技术途径和技术支撑。在鱼类肌间刺的基因编辑育种研究方面,中国水产科学研究院黑龙江研究所匡友谊团

队、华中农业大学高泽霞团队及中国科学院水生生物研究所桂建芳团队分别运用基因编辑技术,培育出无肌间刺鲫、武昌鱼(*Megalobrama amblycephala*)、草鱼以及银鲫等(Dong *et al*, 2023; Kuang *et al*, 2023),为促进淡水鱼的消费和加工产业发展提供了技术支撑。自 2003 年,日本 Goro Yoshizaki 团队将虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)原始生殖细胞注射到樱鳟胚胎生产了供体后代,开展了世界首例养殖鱼类生殖细胞移植实验(Takeuchi *et al*, 2003)以来,鱼类生殖干细胞移植技术逐渐在虹鳟、五条鲈(*Seriola quinqueradiata*)、金枪鱼(*Thunnus*)、尼罗罗非鱼、红鳍东方鲀(*Fugu rubripes*)、长鳍叉尾鲷(*Ictalurus furcatus*)、大西洋鲑等苗种高效繁育、珍稀濒危鱼类保护等方面显示出巨大应用潜力。近十年来,我国科学家已在部分经济鱼种或濒危鱼种,例如箕作黄姑鱼(*Nibea mitsukurii*)、鲆鲽类、中华鲟(*Acipenser sinensis*)、许氏平鲈(*Sebastods schlegelii*)、海马、黄鳍(*Monopterus albus*)等实现了细胞移植技术的突破(Ye *et al*, 2017、2022; Zhou *et al*, 2021b),但仍未见创制优良性状新种质的相关报道。

2.2 水产种质资源利用安全存在的问题

2.2.1 部分物种人工规模化繁育技术亟待突破

鳗鱼(*Anguilla*)作为农业农村部推荐的主导养殖品种,年产值超过 300 亿元,我国鳗鱼养殖总产量占世界总量的 80%以上。近年来,长期依赖进口鳗鱼的日本已在鳗鱼苗人工孵化技术上实现重大突破,实现了鱼苗大规模孵化的低成本化(单尾孵化成本从 2016 年的约 4 万日元下降至 2024 年的 1 800 日元),为鳗鱼产业迈向可持续发展打开新局。然而,当前我国鳗鱼的繁育研究仍处于相对滞后阶段,鳗鱼全人工繁育和苗种规模化生产成为制约产业健康发展的“卡脖子”难题。

大黄鱼作为我国传统四大海产品之首,2024 年养殖产量达 29 万 t,不仅具有独特的生长周期和洄游习性,还承载着重要的生态价值和经济意义。由于过度捕捞等因素影响,大黄鱼存在野生资源枯竭、遗传多样性低、优质苗种覆盖率低等问题。目前我国在硃洲族大黄鱼的人工规模化繁育方面取得一定突破,但仍需选育开发更多优质突破性新品种以满足市场需求。

2.2.2 已创制多个转基因和基因编辑新种质,但产业化应用落后于国外

以转基因鱼为例,2015 年 11 月 19 日,美国食品与药品监督管理局(FDA)批准转基因三文鱼上市,成为世界上首例被批准产业化的食用转基因鱼(Ben

Hafsa *et al.*, 2016)。而中国的转基因鱼从 1983 年研发至今已经超过 30 年, 一直未见产业化上市。企业参与度不足、政府决策及审批程序不成熟等是产业化落后的重要原因。

2.2.3 高通量精准表型测定技术亟待开发, 多性状基因组选择育种技术亟需建立

表型是研究“基因型-表型-环境”作用机制的重要桥梁, 研发具有自主知识产权的水产种质资源表型数据采集平台对于加速精准育种进程具有重要意义, 目前这一平台仍处于落后水平。此外, 集成生长、抗病、品质等多性状的基因组选择育种技术也亟待建立。

2.2.4 水产动物生殖干细胞移植起步较晚, 育种应用还处于跟跑状态

由于鱼类供体生殖干细胞系难以长期培养、受体内源性生殖干细胞不易全部清除、传统移植方式存在非定向性迁移等诸多因素影响, 生殖干细胞移植技术在养殖鱼类单性种质创制中的广泛应用受到极大限制。因此, 突破鱼类体外生殖干细胞稳定传代、受体不育系高效制备、生殖干细胞靶向移植等系列关键技术环节, 实现鱼类生殖干细胞的快速、高效、精准移植, 是创制鱼类单性新种质迫切需要解决的产业技术难题。

2.2.5 水产生物分子设计育种在国内外均处于起步阶段, 缺乏基于大数据和机器学习及人工智能算法的高效智能育种技术体系

分子设计育种是伴随着遗传学、分子生物学、基因组学理论以及现代生物技术等的发展而形成的高效、精准育种技术。目前水产生物的分子设计育种还处于起步阶段, 需要在大数据集成、机器学习及人工智能算法等方面投入更多研发力量。

2.3 提升水产种质资源利用技术和平台安全性的建议

2.3.1 加强低成本、高通量、智能化的表型和基因型精准测定技术研发

随着测序技术的普及和待测材料的规模化, 传统的表型和基因型测定手段已经不能满足水产种质资源基因组学的需求, 严重阻碍了优异种质资源的挖掘及利用。建议充分利用人工智能及高通量测序和芯片等手段, 开发以智能化、高通量、动态无损测量为主要特征的表型组学技术, 研制高效低成本的生物育种基因芯片。

2.3.2 搭建功能基因精准遗传操作平台

以基因编辑育种、分子设计育种、智慧育种等为攻关方向, 攻克育种技术难题。重点建立高效多性状

基因组选择育种技术, 创建高效基因组编辑育种技术体系, 研发生殖干细胞体外培养和移植技术, 建立基因组重构育种技术, 研发多基因聚合和分子模块育种技术, 构建分子设计育种技术平台, 为水产生物突破性新品种创制提供关键技术支撑。

3 人工培育和基因改良水产种质资源的安全性评估

水产种质资源种类繁多, 遗传资源丰富, 采用转基因、基因编辑等技术培育出的具有优良性状的基因改良种质资源将为我国水产养殖绿色发展战略提供重要的科技支撑。然而另一方面, 由于这些现代生物技术的复杂性、不确定性、超前性及超越常规性等特点, 导致其在技术研究、开发与应用的过程中, 不可避免地会引起物种安全风险。究其原因, 主要与人们对现代生物技术科学认知能力的有限性、技术异化引起的负向价值以及政府科技创新风险治理能力的局限性相关。

3.1 人工培育和基因改良水产种质资源的研究进展

3.1.1 我国转基因鱼研究起步最早, 却面临迟迟无法产业化的困境

转基因鱼育种是诞生在中国的一项自主创新研究。1985 年, 朱作言团队开创了鱼类基因工程育种研究新领域, 创制出世界上首例转基因鱼, 建立了转基因鱼育种理论模型, 随后又培育出具有优良养殖性状的转全鱼生长激素 *gh* 基因“冠鲤”。冠鲤具有完全自主知识产权, 与对照鲤相比, 其生长速度提高约 42%~114.92%, 具有优良的养殖性状。自 1985 年转基因鱼研究开始, 全世界范围内至少有 30 多种转基因鱼集中在高产、优质、抗病抗逆、性别和生殖控制等方面。2015 年 11 月, 美国食品与药品管理局(FDA)批准了转全鱼生长激素基因大西洋鲑“水优三文鱼”为第一种可供食用的转基因动物产品, 实现了世界转基因动物育种研究与产业化的历史性突破。转基因三文鱼的产业化不仅成为世界转基因动物育种研究与产业化应用里程碑事件, 是转基因动物产业化的典范, 而且对今后转基因动物的研发将产生深远影响。与此同时, 欧美等发达国家在重要经济性状相关基因克隆、转基因鱼种质研发等方面进行了大量战略储备研究, 转基因鱼优良品种的培育已成为提升国家水产产业竞争力的重要领域。然而, 国内仍未见基因改良水产种质的应用。冠鲤生态安全评价的研究比已经产业化的转基因三文鱼更为超前, 实验更为充分, 数据更为详尽, 为世界同行所公认和瞩目。

3.1.2 安全评估政策优化是促进基因改良种质应用的必要措施

对比我国转基因作物的发展历程,不难看出,安全评估政策的优化是保障基因改良种质得以产业化的必要措施。《农业转基因生物安全评价管理办法》(2022年1月21日农业农村部令2022年第2号修订)中规定,农业转基因生物是指利用基因工程技术改变基因组构成,用于农业生产或者农产品加工的植物、动物、微生物及其产品。具体包括:转基因植物种子、种畜禽、水产种苗,利用农业转基因生物生产的或者含有农业转基因生物成分的种子、种畜禽、水产种苗、农药、兽药、肥料和添加剂等。这些转基因产品在依照有关法律、行政法规的规定进行审定、登记或者评价、审批前,应当依照本办法的规定取得农业转基因生物安全证书。而从事农业转基因生物试验和进口的单位以及从事农业转基因生物生产和加工的单位和个人,需要提供的材料包括但不限于:实验研究报告书,农业转基因生物的安全等级和确定安全等级的依据,相应的实验室安全设施、安全管理和防范措施,中间试验报告书,实验研究总结报告,安全评价申报书,有检测条件和能力的技术检测机构出具的检测报告等。转基因鱼的安全评价方面,依据转基因食品安全评价的实质性等同原则,根据国家Ⅰ类新药的毒理学试验规范,武汉大学基础医学院、中国疾控中心营养与食品安全研究所分别独立进行了严格的冠鲤食品安全评价,证实冠鲤与对照鲤实质等同,即转全鱼生长激素基因鲤与对照鲤具有一样的食用安全性。而生态安全评价方面,科学家已从分子、个体、种群和群落等不同水平系统深入地研究和评估了冠鲤的生态安全,发现冠鲤的繁殖力与生存力低于对照鲤,因此,在自然鲤鱼分布的水域,冠鲤对生态系统的压力低于对照鲤。不仅如此,中国科学院水生生物研究所与湖南师范大学合作,通过染色体倍间杂交,培育出100%不育的三倍体转全鱼生长激素基因“吉鲤”。从科学的角度而言,食用安全、生态安全、性状优良、具有完全自主知识产权的三倍体吉鲤已经具备产业化应用条件。

3.1.3 我国水产种质资源基因编辑育种发展迅速,亟需制定专门的安全评价管理办法

基因组编辑育种技术是精准育种的重要技术之一。目前这一技术主要在养殖鱼类中取得突破性进展,例如目前我国已建立了包括黄颡鱼、虹鳟、罗非鱼、团头鲂、斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)、黄鳝、鲤、半滑舌鳎、鲫、小体鲟(*Acipenser ruthenus*)、泥

鳅等多种重要养殖鱼类基因编辑技术(Dan *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2022b; Xu *et al.*, 2022; Zhong *et al.*, 2016),创制出一批高产、优质、抗病、性控等养殖鱼类优良种质。例如,中国科学院水生生物研究所殷战团队针对雌鲤生长快于雄鲤的两性生长异形的特性,以 *cyp17a1* 为靶点进行了 CRISPR/Cas9 介导的基因编辑操作,利用 *cyp17a1* 敲除后形成的伪雄鲤,成功构建了全雌鲤群体,首次成功地利用基因工程技术对单基因位点进行编辑,创制了全雌群体,实现了对雌鲤生长快的两性生长异形特性的应用,养殖产量提升30%以上(Zhai *et al.*, 2022)。而这些优良种质能否顺利产业化及上市,取决于主管部门制定的安全评价管理办法。

3.2 人工培育和基因改良水产种质资源利用安全存在的短板

3.2.1 国内现有基因改良种质的利用安全评估技术,无法满足转基因和基因编辑等新产品安全评估需要

伴随着科技发展,人工育种新种质不断增加。目前国外已有转基因三文鱼,基因编辑真鲷、河豚等产品陆续上市。国内已利用基因编辑等技术获得上百个基因改良种质,包括转 *gh* 基因鲤鱼、*dmrt1* 基因编辑半滑舌鳎、无肌间刺鲫和团头鲂、*mstn* 基因编辑罗非鱼等,但仍未见产业化报道。亟需出台针对基因改良水产种质资源的评估政策。

3.2.2 亟需加强基因改良种质的科普宣传和企业联合,联合多方力量推动产业化进程

我国生物育种产业化正持续加快推进。2024年中央一号文件提出,推动生物育种产业化扩面提速。截至目前,已有两批共67个转基因玉米品种通过国家审定。在推进水产基因改良种质产业化进程方面,如何加强科普宣传以提高公众对生物技术的认知和接受程度,仍然是一大挑战。此外,需要发挥优势企业的自主性和参与度,联合多方社会力量推动产业化。

3.3 提升人工培育和基因改良水产种质资源利用安全性的建议

3.3.1 完善国家物种安全战略及相关法律和制度体系

要坚持全局性思维,加快推进科技创新和产业化应用,推进水产物种安全领域科技自立自强,打造国家物种安全战略科技力量;要坚持长期性思维,尽早对各物种安全风险做出预警和防控,力争从源头上化解;要完善物种安全相关立法,确保现代生物技术的发展及其物种安全问题的解决有章可循、有法可依。

3.3.2 加大品种知识产权保护力度

知识产权保护是激励育种创新的重要举措。知识产权保护在我国种业领域经历了从无到有的发展过程,以植物新品种权为代表的种业创新取得了明显成效,登记和授权新品种数连续多年位居国际植物新品种保护联盟前列。水产种业发展应积极借鉴植物新品种登记、授权、展示评价、许可实施、退出等成体系的知识产权保护机制,结合水产品种和产业自身特点,逐步构建和完善水产养殖品种知识产权保护制度,打造一批水产种业优势品牌,积极推进良种迭代更新和推广应用,依法严厉打击侵权行为,保护种业权益,激励种业创新,为水产种业振兴营造良性竞争的制度环境。

3.3.3 加强转基因及基因编辑等科普宣传工作

科技创新和科学普及是实现创新发展的两翼,在生物技术育种的产业化进程中,充分的科学普及对引导公众认知、提升消费者认可度尤为重要。以转基因及基因编辑育种为代表的生物技术,已不仅是科学问题,也是受到广泛关注的公共议题,需要科学共同体、政府、学术机构、媒体、公众等多主体互动,以相关研究试验、安全评价、品种审定、生产监管到产品标识各个环节的科学事实和管理规程为依据,树立公众对生物技术产品科学性、先进性、安全性的信心,促进现代生物技术在我国可持续发展。

参 考 文 献

- BEN HAFSA A, NABI N, ZELLAMA M S, *et al.* A new specific reference gene based on growth hormone gene (*GHI*) used for detection and relative quantification of Aquadvantage[®] GM salmon (*Salmo salar* L.) in food products. *Food Chemistry*, 2016, 190: 1040–1045
- CHEN C H, LI B J, GU X H, *et al.* Marker-assisted selection of YY supermales from a genetically improved farmed tilapia-derived strain. *Zoological Research*, 2019, 40(2): 108–112
- CHEN J W, JIA Y Y, SUN Y, *et al.* Global marine microbial diversity and its potential in bioprospecting. *Nature*, 2024, 633(8029): 371–379
- CHEN S L, LI J, DENG S P, *et al.* Isolation of female-specific AFLP markers and molecular identification of genetic sex in half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*). *Marine Biotechnology*, 2007, 9(2): 273–280
- 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. *Nature Genetics*, 2014, 46(3): 253–260
- CHEN X, MEI J, WU J J, *et al.* A comprehensive transcriptome provides candidate genes for sex determination/differentiation and SSR/SNP markers in yellow catfish. *Marine Biotechnology*, 2015, 17(2): 190–198
- 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*). *Scientific Reports*, 2017, 7: 42213
- DAN C, LIN Q H, GONG G R, *et al.* A novel PDZ domain-containing gene is essential for male sex differentiation and maintenance in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Science Bulletin*, 2018, 63(21): 1420–1430
- DONG Q, NIE C H, WU Y M, *et al.* Generation of blunt snout bream without intermuscular bones by *runx2b* gene mutation. *Aquaculture*, 2023, 567: 739263
- FAN G Y, SONG Y, YANG L D, *et al.* Initial data release and announcement of the 10,000 fish genomes project (Fish10K). *GigaScience*, 2020, 9(8): g100080
- GE C T, YE J, WEBER C, *et al.* The histone demethylase KDM6B regulates temperature-dependent sex determination in a turtle species. *Science*, 2018, 360(6389): 645–648
- GUILLÉN I I, BERLANGA J, VALENZUELA C, *et al.* Safety evaluation of transgenic tilapia with accelerated growth. *Marine Biotechnology*, 1999, 1(1): 2–14
- HU W, ZHU Z Y. Integration mechanisms of transgenes and population fitness of GH transgenic fish. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(4): 401–408
- KUANG Y Y, ZHENG X H, CAO D C, *et al.* Generate a new crucian carp (*Carassius auratus*) strain without intermuscular bones by knocking out *bmp6*. *Aquaculture*, 2023, 569: 739407
- LI J T, WANG Q, YANG M H, *et al.* Parallel subgenome structure and divergent expression evolution of allo-tetraploid common carp and goldfish. *Nature Genetics*, 2021, 53(10): 1493–1503
- LI M H, WANG D S. Gene editing nuclease and its application in tilapia. *Science Bulletin*, 2017, 62(3): 165–173
- LI M H, YANG H H, LI M R, *et al.* Antagonistic roles of *Dmrt1* and *Foxl2* in sex differentiation via estrogen production in tilapia as demonstrated by TALENs. *Endocrinology*, 2013, 154(12): 4814–4825
- LIU F Y, LI Y L, YU H W, *et al.* MolluscDB: An integrated functional and evolutionary genomics database for the hyper-diverse animal Phylum Mollusca. *Nucleic Acids Research*, 2021, 49(D1): D988–D997
- 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*). *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2014, 22(6): 787–792 [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. *农业生物技术学报*, 2014, 22(6): 787–792]
- LU B Y, LIANG G Y, XU M M, *et al.* Production of all male

- amelanotic red tilapia by combining MAS-GMT and *tyrb* mutation. *Aquaculture*, 2022a, 546: 737327
- LU B Y, WANG C X, LIANG G Y, *et al.* Generation of ornamental Nile tilapia with distinct gray and black body color pattern by *csflra* mutation. *Aquaculture Reports*, 2022b, 23: 101077
- LÜ Z M, GONG L, REN Y D, *et al.* Large-scale sequencing of flatfish genomes provides insights into the polyphyletic origin of their specialized body plan. *Nature Genetics*, 2021, 53(5): 742–751
- MA H Y, CHEN S L. Development of polymorphic microsatellite markers in barfin flounder (*Verasper moseri*) and spotted halibut (*Verasper variegatus*) by the cross-species amplification. *Molecular Biology Reports*, 2011, 38(7): 4545–4551
- PENG X Y, SHANG G H, WANG W Q, *et al.* Fatty acid oxidation in zebrafish adipose tissue is promoted by 1 α , 25(OH) $_2$ D $_3$. *Cell Reports*, 2017, 19(7): 1444–1455
- SHAO C W, BAO B L, XIE Z Y, *et al.* The genome and transcriptome of Japanese flounder provide insights into flatfish asymmetry. *Nature Genetics*, 2017, 49(1): 119–124
- SHAO C W, LI Q Y, CHEN S L, *et al.* Epigenetic modification and inheritance in sexual reversal of fish. *Genome Research*, 2014, 24(4): 604–615
- SHAO C W, SUN S, LIU K Q, *et al.* The enormous repetitive Antarctic krill genome reveals environmental adaptations and population insights. *Cell*, 2023, 186(6): 1279–1294.e19
- SHI C, LU Y, ZHAI G, *et al.* Hyperandrogenism in POMCa-deficient zebrafish enhances somatic growth without increasing adiposity. *Journal of Molecular Cell Biology*, 2020, 12(4): 291–304
- TAKEUCHI Y, YOSHIZAKI G, TAKEUCHI T. Generation of live fry from intraperitoneally transplanted primordial germ cells in rainbow trout. *Biology of Reproduction*, 2003, 69(4): 1142–1149
- WANG C X, XU J, KOCHER T D, *et al.* CRISPR knockouts of *pmela* and *pmelb* engineered a golden tilapia by regulating relative pigment cell abundance. *Journal of Heredity*, 2022a, 113(4): 398–413
- WANG M T, LI Z, DING M, *et al.* Two duplicated *gsdf* homeologs cooperatively regulate male differentiation by inhibiting *cyp19a1a* transcription in a hexaploid fish. *PLoS Genetics*, 2022b, 18(6): e1010288
- WANG Y Y, YANG Y X, LIU Y, *et al.* CoSFISH: A comprehensive reference database of COI and 18S rRNA barcodes for fish. *Database*, 2024, 2024: baae038
- WANG Y, LI X Y, XU W J, *et al.* Comparative genome anatomy reveals evolutionary insights into a unique amphitriploid fish. *Nature Ecology & Evolution*, 2022c, 6(9): 1354–1366
- WEBER C, ZHOU Y J, LEE J G, *et al.* Temperature-dependent sex determination is mediated by pSTAT3 repression of Kdm6b. *Science*, 2020, 368(6488): 303–306
- WHITE S L, VOLKOFF H, DEVLIN R H. Regulation of feeding behavior and food intake by appetite-regulating peptides in wild-type and growth hormone-transgenic coho salmon. *Hormones and Behavior*, 2016, 84: 18–28
- WU Y, WU T F, YANG L Y, *et al.* Generation of fast growth Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) by myostatin gene mutation. *Aquaculture*, 2023, 562: 738762
- XU P, XU J, LIU G J, *et al.* The allotetraploid origin and asymmetrical genome evolution of the common carp *Cyprinus carpio*. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4625
- XU P, ZHANG X F, WANG X M, *et al.* Genome sequence and genetic diversity of the common carp, *Cyprinus carpio*. *Nature Genetics*, 2014, 46(11): 1212–1219
- XU Q H, FENG C Y, HORI T S, *et al.* Family-specific differences in growth rate and hepatic gene expression in juvenile triploid growth hormone (GH) transgenic Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 2013, 8(4): 317–333
- XU X D, CHEN H L, MANDAL B K, *et al.* Duplicated Tyr disruption using CRISPR/Cas9 reveals melanophore formation in Oujiang color common carp (*Cyprinus carpio* var. color). *Reproduction and Breeding*, 2022, 2(2): 37–45
- YE H, LI C J, YUE H M, *et al.* Establishment of intraperitoneal germ cell transplantation for critically endangered Chinese sturgeon *Acipenser sinensis*. *Theriogenology*, 2017, 94: 37–47
- YE H, TAKEUCHI Y, DU H, *et al.* Spermatogonia from cryopreserved testes of critically endangered Chinese sturgeon efficiently colonized and preferentially proliferated in the recipient gonads of Yangtze sturgeon. *Marine Biotechnology*, 2022, 24(1): 136–150
- YU H W, LI Y L, HAN W T, *et al.* Pan-evolutionary and regulatory genome architecture delineated by an integrated macro- and microsynteny approach. *Nature Protocols*, 2024, 19(6): 1623–1678
- YUE X, ZHANG S J, WANG H X, *et al.* The mud-dwelling clam *Meretrix petechialis* secretes endogenously synthesized erythromycin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(49): e2214150119
- ZHAI G, SHU T T, CHEN K X, *et al.* Successful production of an all-female common carp (*Cyprinus carpio* L.) population using *cyp17a1*-deficient neomale carp. *Engineering*, 2022, 8: 181–189
- ZHANG G F, FANG X D, GUO X M, *et al.* The oyster genome reveals stress adaptation and complexity of shell formation. *Nature*, 2012, 490(7418): 49–54
- ZHONG Z M, NIU P F, WANG M Y, *et al.* Targeted disruption of *sp7* and myostatin with CRISPR-Cas9 results in severe bone defects and more muscular cells in common carp. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22953
- ZHOU L Y, LI M H, WANG D S. Role of sex steroids in fish sex determination and differentiation as revealed by gene

- editing. General and Comparative Endocrinology, 2021a, 313: 113893
- ZHOU L, WANG X Y, LIU Q H, *et al.* Successful spermatogonial stem cells transplantation within Pleuronectiformes: First breakthrough at inter-family level in marine fish. International Journal of Biological Sciences, 2021b, 17(15): 4426–4441
- ZHU Z, HE L, CHEN S. Novel gene transfer into the fertilized eggs of gold fish (*Carassius auratus* L. 1758). Journal of Applied Ichthyology, 1985, 1: 31–34

(编辑 冯小花)

Strategic Study on the Safety of Aquatic Germplasm Resource Utilization in China

WANG Na^{1,2}, SHAO Changwei^{1,2}, LIU Zhihong^{1,2}, ZHANG Xiaowen^{1,2}, LIAO Meijie^{1,2}, GAO Baoquan^{1,2},
WU Biao^{1,2}, SUN Xiujun^{1,2}, CHEN Zhangfan^{1,2}, LIU Yuyan^{1,2}, CHEN Songlin^{1,2①}

(1. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China)

Abstract Aquatic germplasm resources refer to genetic materials of aquatic animals and plants that possess actual or potential value, including species, subspecies, varieties, strains, *etc.* These resources hold significant economic, ecological, and scientific importance in the fields of fisheries and agriculture, serving as the foundation for aquaculture, genetic improvement, and biodiversity conservation. Aquatic germplasm resources encompass aquatic organisms such as fish, shrimp, shellfish, algae, and echinoderms, along with their genetic material. They are not only a core element supporting the sustainable development and international competitiveness of the aquaculture industry but also a strategic resource for safeguarding national food security, ecological security, and biodiversity. Building strengthened protection of aquatic germplasm resources, how to enhance the scientific utilization and innovative development of superior aquatic germplasm is both an urgent national need for biological and genetic diversity security and a pressing demand for high-quality, healthy aquatic products driven by growing public expectations. This review conducts a safety assessment from three perspectives: fundamental research on the utilization of aquatic germplasm resources, relevant technologies and platforms, and artificially cultivated and genetically improved germplasm. Based on a review of research progress in these areas, it analyzes existing problems within these three aspects and proposes recommendations for improving the utilization of aquatic germplasm resources. Future recommendations for enhancing the safety of aquatic germplasm resource utilization in China mainly include: strengthening the construction of a shared genomic resource platform for aquatic species based on China's independent intellectual property; increasing efforts to decipher the genetic mechanisms underlying economically important traits; advancing the development of low-cost, high-throughput, and intelligent technologies for precise phenotyping and genotyping, along with platforms for precise functional gene manipulation; and enhancing science popularization regarding transgenic and gene editing technologies while strengthening the protection of intellectual property rights for new varieties.

Key words Aquatic germplasm resources; Safety of utilization; Shared genomic resource platform; Decipher the genetic mechanisms underlying economically important traits; Protection of intellectual property rights

① Corresponding author: CHEN Songlin, Email: chensl@ysfri.ac.cn