



高泽霞, 华中农业大学教授, 博士生导师。入选国家“高层次人才特殊支持计划”青年拔尖人才, 担任国家大宗淡水鱼产业技术体系鲂种质资源鉴定与新种质创制岗位科学家、农业农村部淡水生物繁育重点实验室主任、教育部长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心副主任等。长期从事鱼类高产优质性状选育的基础和应用科学研究, 在鱼类肌肉刺发育机制、组学资源开发及分子育种等方面取得重要进展。以第一/通信作者在National Science Review、Nature Communications、Aquaculture等行业权威期刊发表SCI论文60余篇, 获国家授权专利10项。团头鲂新品种入选2019中国农业农村重大科技新成果—十大新产品, 团头鲂育种成果获湖北省科技进步一等奖和农业农村部神农中华农业科技奖一等奖(排序2)。

· 综述 ·

## 遗传改良对世界水产养殖业发展的推动作用

王施龙<sup>1</sup>, 胡红浪<sup>2</sup>, 熊雪梅<sup>1</sup>, 高泽霞<sup>1,3\*</sup>

- (1. 华中农业大学水产学院/农业农村部淡水生物繁育重点实验室/长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心/农业动物遗传育种与繁殖教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;  
2. 全国水产技术推广总站, 北京 100125;  
3. 湖北洪山实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 随着全球水产品养殖产量快速增长, 水产养殖业在近二十年间正快速替代捕捞业, 成为满足人类对优质蛋白需求极具潜力的生产活动。世界水产品消费量近几十年来快速增长, 水产品是人类食物系统中具有越来越重要的地位。遗传改良作为发展水产养殖业的关键环节而备受关注, 长期以来, 以选择育种和杂交育种为主要的育种方法, 以生长速度、成活率等经济性状为主要改良的目标性状, 对世界水产养殖业的发展发挥了基础性、先导性和战略性作用。随着人们对优质蛋白需求的不断增加以及“大食物观”概念的广泛普及, 将水产品打造为更加高效的食物生产系统是大势所趋。但纵观全球, 水产养殖业存在遗传改良种类不多、覆盖面不广、改良性状滞后于产业发展需求等问题, 需要加强水产育种技术创新和品种培育, 培育更多的遗传改良种, 推进水产养殖业高质量发展。本文基于已有研究结果, 结合渔业各类统计数据, 对世界水产养殖业发展概况、重要养殖种遗传改良情况、水产育种技术应用、目标性状改良以及部分主要人工改良种产量数据进行整理概述, 总结发展状况, 分析存在问题, 以期对水产种业研究以及产业高质量发展提供参考。

**关键词:** 水产养殖; 遗传改良; 育种技术; 优良品种; 产量

中图分类号: S 965

文献标志码: A

收稿日期: 2022-08-26 修回日期: 2022-10-04

资助项目: 国家自然科学基金(31872559); 国家现代农业产业技术体系(CARS-45-01); 教育部科技创新工作专项项目(2021ZL08)

第一作者: 王施龙, 从事鱼类遗传育种研究, E-mail: shilong-wang@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 高泽霞, 从事鱼类遗传育种研究, E-mail: gaozx@mail.hzau.edu.cn

水产养殖被认为是世界上最有效率的动物蛋白生产方式, 提供了全世界近一半的鱼类和贝类食物以及全球人口约 1/3 的优质动物蛋白, 在解决人类粮食危机和提高人类健康水平方面发挥着重要作用<sup>[1-4]</sup>。自 1950 年以来, 世界主要水产品(如无特殊说明, “水产品”、“主要水产品”的表述包含鱼类、虾蟹、软体动物和其他水生动物, 不包括水生哺乳动物、爬行动物、海藻和其他水生植物)产量保持增长态势, 其中养殖产量增速较快, 捕捞产量自 1990 年来趋于平稳且有下降趋势<sup>[5]</sup>, 淡水养殖产量占全球食用水产养殖产量的 77%(不包括水生植物)<sup>[6]</sup>。预计到 2025 年, 水产养殖业将继续保持显著的增长趋势, 成为增长最快的食物生产系统<sup>[7]</sup>。2020 年, 全球渔业和水产养殖总产量达 2.14 亿 t, 其中水产动物产量比 20 世纪 90 年代平均水平高出 60%, 产值达 4 240 亿美元<sup>[8]</sup>。我国是世界水产养殖大国<sup>[9]</sup>, 2021 年水产养殖产量达到 5 394.41 万 t(其中淡水 3 183.27 万 t), 渔业经济总产值达到 2.96 万亿元, 养殖产量连续 33 年位居世界首位, 约占世界产量的 60%, 是中国农业对世界的重大贡献之一<sup>[10]</sup>。

水产养殖业的发展取决于多方面因素, 包括育种、苗种培育、养殖模式、营养饲料、病害防控、养殖设备设施等相关技术的发展及相关政策的支持引导, 而水产育种作为其中较为重要的一部分, 为水产养殖业提供了更多的人工改良种并创造了更多的养殖产出, 是发展高效水产养殖业的关键<sup>[11]</sup>。美国、挪威、日本等在水产经济性状方面明确了本国的水产种业发展目标并取得了一定技术突破, 已经形成产业优势。通过针对性地对经济性状进行长期遗传改良并加大国家层面的投入, 这些国家在遗传改良和推广方面积累了大量的基础数据, 不仅促进了良种产业的可持续发展, 还引领了国际水产养殖业的发展方向<sup>[12]</sup>, 如挪威大西洋鲑 (*Salmo salar*)、美国凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)、菲律宾尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 等, 这些国家(区域组织)育种计划对水产养殖业的快速高效发展发挥了决定性作用<sup>[13-14]</sup>。就我国而言, 水产种业作为推动我国水产养殖业快速发展的关键物质基础, 在推进渔业现代化、加快渔业经济转型中具有重要意义, 为前沿科学和新兴产业指明了方向<sup>[12]</sup>。在我国水产养殖业发展的关键转折时期都伴随着水产育种、育苗技术的重大突破, 20 世纪 90 年代以来, 我

国培育水产新品种 266 个, 人工育苗技术、水产养殖技术与模式的集成创新, 有力推动了水产养殖业的技术进步。据不完全统计, 我国已经实现人工规模化培育 200 多种水产苗种, 2004 年到 2014 年间淡水、海水鱼苗培育量分别增长 79.14% 和 168.52%<sup>[15]</sup>, 带来了显著的经济和社会效益。

本文在收集 FAO FishstatJ 时间序列渔业统计软件数据库、1949 年至 2022 年中国渔业统计年鉴等国内外相关渔业数据基础上, 通过对水产新品种培育情况进行统计与分析, 并结合尼罗罗非鱼、大西洋鲑、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)、大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 等国内外代表性人工改良种的产业数据分析, 探讨人工改良种在水产种业及水产产业发展中的作用。水产育种是水产种业及养殖业的重要支撑, 本文对人工改良种培育情况的回顾总结也将为国家水产种业振兴行动的实施提供参考。

## 1 世界水产品产量及消费量的增长

世界水产品总产量自 1950 年来一直保持上升趋势, 其中捕捞产量在 20 世纪 90 年代开始波动, 未出现连续增长, 此后的总产量增长基本来自养殖产量的增加(图 1); 养殖产量从 1950 年的 60.38 万 t 到 2020 年的 8 750.26 万 t, 增长近 145 倍。自 1961 年以来, 世界水产品消费量以及人均消费量一直呈上升趋势, 人均消费量由 1961 年的 9.02 kg/人上升 2019 年的 20.5 kg/人, 年均增长率在 1.5% 左右(图 2)<sup>[16-17]</sup>; 而同期肉类消费年增长率仅为 1.1% 左右<sup>[18]</sup>。

水产品是我国国民动物蛋白供给的重要来源, 约占到 30%<sup>[19]</sup>, 而水产养殖产品占到 20%, 水产养殖业在我国粮食安全和食物营养供给中发挥着巨大作用。我国水产品养殖产量居世界首位, 水产品养殖产量占世界的比值从 1950 年的 12.58% 增加到 2020 年的 56.71%(图 3)<sup>[20]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来, 我国水产养殖产量增长速度加快, 水产品养殖产量平均占世界比值为 44.62%, 1996 年达到最高, 为 66.54%。2021 年, 我国水产品(包含藻类等水生植物)人均占有量为 47.36 kg/人<sup>[10]</sup>。

## 2 人工改良种培育情况

遗传改良是更有效发展水产种业及养殖业的关键要素, 至 2010 年, 世界范围内已有 104 个水

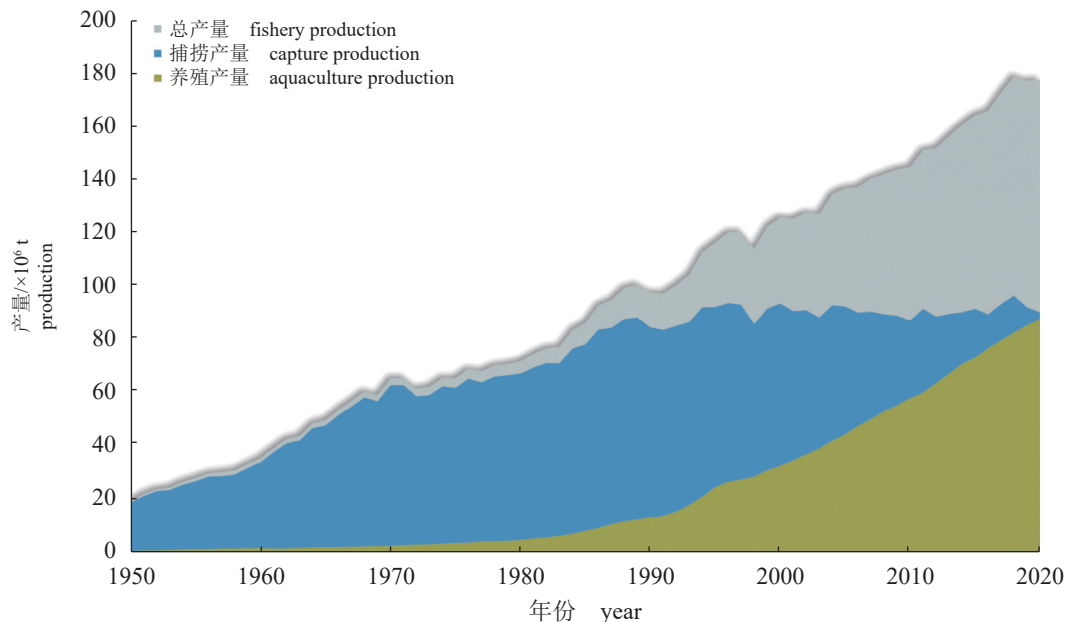


图 1 世界主要水产品总产量、养殖产量和捕捞产量对比 (数据来源: FAO)<sup>[16-17]</sup>

Fig. 1 Global production of fishery, aquaculture and capture, related to major aquatic products (data collected from FAO)<sup>[16-17]</sup>

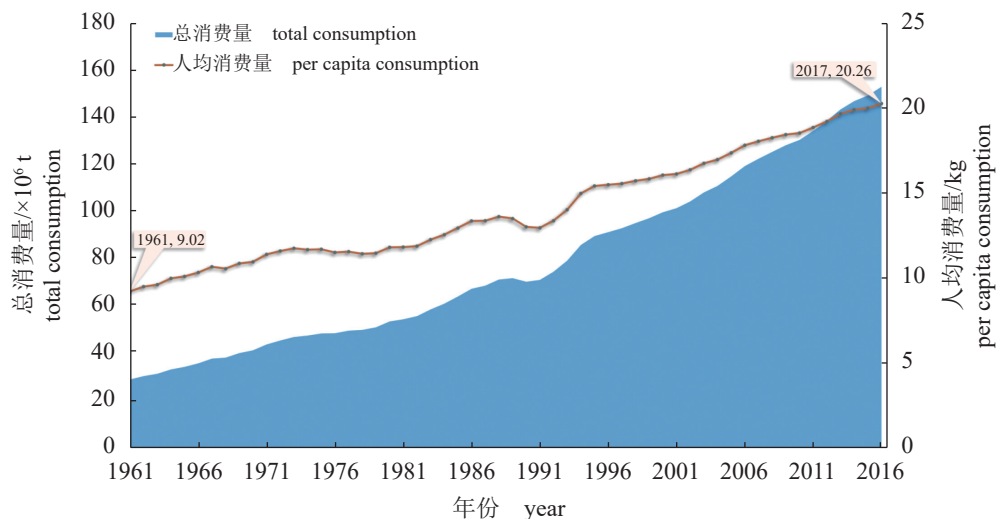


图 2 世界主要水产品总消费量以及人均消费量 (数据来源: FAO)<sup>[19-20]</sup>

Fig. 2 The total and per capita consumption of major aquatic products in the world (data collected from FAO)<sup>[19-20]</sup>

产养殖种类的育种计划, 其中大多数针对鱼类<sup>[11]</sup>。我国是世界上最早开始水产选择育种研究的国家之一, 在 20 世纪 70 年代便建立了专门从事鱼类遗传育种的研究室<sup>[5]</sup>。同时, 我国自 1996 年起, 由农业农村部发布经全国水产原种和良种审定委员会审定通过的适宜推广的水产新品种。截止 2022 年, 我国已经审定通过了 266 种水产新品种, 这些新品种均是我国科研人员通过例如选育、杂交等常规育种手段以及现代育种技术方法培育获

得的。已公布的新品种涵盖了淡水鱼、海水鱼、虾、蟹、贝类、棘皮等主要养殖种类, 其中淡水鱼新品种最多, 共 116 种; 贝类其次, 为 53 种(图 4)。这些品种在一定程度上提高了相应物种的养殖产量或质量<sup>[21]</sup>。

国外主要水产养殖国家的育种模式与我国相比有所不同。我国水产育种工作主要由科研院所来承担, 而国外水产育种项目一般由国家支持、企业为主体来开展。与我国养殖种类多、规模大

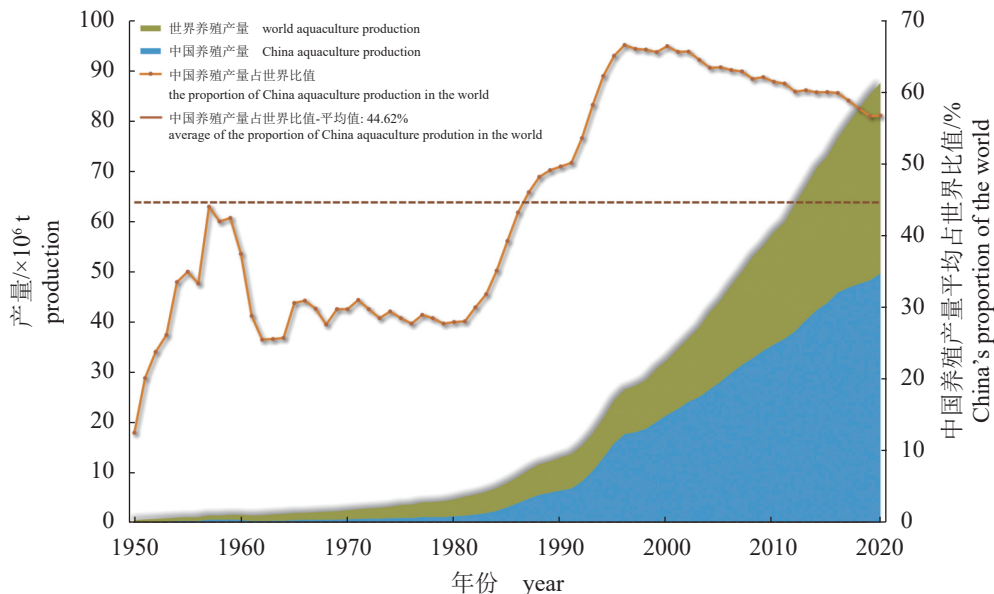


图3 世界和中国水产品养殖产量比较 (数据来源: FAO)<sup>[16-17]</sup>

Fig. 3 Comparison between China and world aquaculture production (data collected from FAO)<sup>[16-17]</sup>

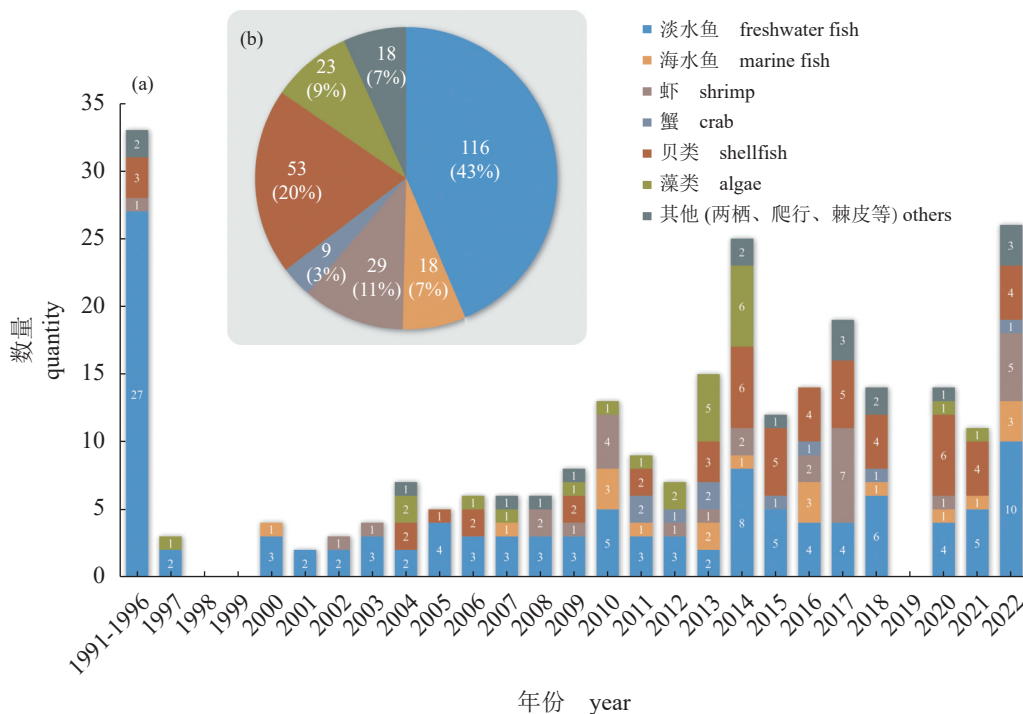


图4 中国已审定水产新品种种类分布情况

(a) 各年份审定通过品种的种类和数量; (b) 各类水产新品种种类占比。数据来自 1996 年到 2022 年中国农业农村部发布的关于水产新品种审定通过的公告

Fig. 4 The distribution of new aquatic strains approved in China

(a) Categories and quantities of strains approved each year; (b) Species categories proportion for all new aquatic strains. The data comes from the announcements issued by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China on the approval of new aquatic varieties from 1996 to 2022

及育种目标分散的特点相比, 国外主要养殖国家的水产育种呈现出集中度高、良种覆盖率高的特点<sup>[5]</sup>。同时, 国外良种培育投入较大, 比较典型

的育种计划例如世界鱼类中心 (原 ICLARM) 与挪威、菲律宾联合进行的罗非鱼育种计划 (GIFT 计划)、美国农业部发起的凡纳滨对虾育种、东欧和

以色列的鲤 (*Cyprinus carpio*) 的遗传改良<sup>[11]</sup> 等都具有十分显著的效果。第一个以家系为基础的水产生物育种计划就是由挪威水产养殖研究所 (AKVAFORSK) 于 1973 年开始, 用于培育虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*), 后来用于培育大西洋鲑。但改良种推广养殖的进度一直比较缓慢, 1992 年世界水产养殖产量中仅有 1% 来自于改良种<sup>[22]</sup>, 2002 年仅增加到 5%<sup>[14]</sup>, 到 2010 年依旧不到 10%<sup>[23]</sup>。研究表明, 如果育种计划培育的改良种质资源能够成功推广, 世界水产养殖产量将在 13 年内翻倍, 生长速度等关键性状的每代遗传增益平均约为 13%, 这意味着动物的生长潜力可以在仅六代选择的时间跨度内翻倍, 正如大西洋鲑和尼罗罗非鱼等主要养殖物种遗传改良取得的进展<sup>[24]</sup>。

### 3 水产育种技术方法

对搜集到的关于国外育种项目进行整理分析, 结果表明主要养殖国家在育种过程中选用的方法以选择育种为主, 占到了所有记录的 79.06%, 且主要采用多性状复合评价方法为基础的多性状复合选择育种技术<sup>[5]</sup>, 而杂交育种和其他育种技术分别占到 10.60% 和 8.76%。据研究, 多倍体育种等其他技术往往会结合选择育种进行综合育种, 这种情况被算在其他育种方式内。欧美选择育种技术已经在遗传育种研究中起到了重大作用<sup>[25]</sup>。我国开始审定水产新品种的 20 年间, 早期为了获取更多优良种质资源用于本地种改良, 引入了较多国外种; 而近年来审定通过的新品种中已无引进种 (图 5)。选择育种和杂交育种是育种采用的主要技术方法, 截止到 2022 年, 我国审定通过的 266 个新品种中, 其中自主培育品种有 236 个, 包括 152 种选育品种、73 种杂交品种。从总的方法选择上来看, 选择育种仍然是目前水产育种中使用频次最高的育种方法。

目前, 传统育种手段与多种新技术结合的综合育种已成为水产育种领域的总趋势, 分子标记辅助育种、细胞工程育种、性别控制、转基因等生物技术和以 BLUP 和 REML 分析为基础的数量性状遗传评估技术的应用, 实现了生长速度、饲料转化率等重要经济性性状的多性状综合选育, 促进了水产养殖业可持续发展<sup>[26-30]</sup>。

### 4 育种目标性状

在对世界主要国家育种数据的统计中发现,

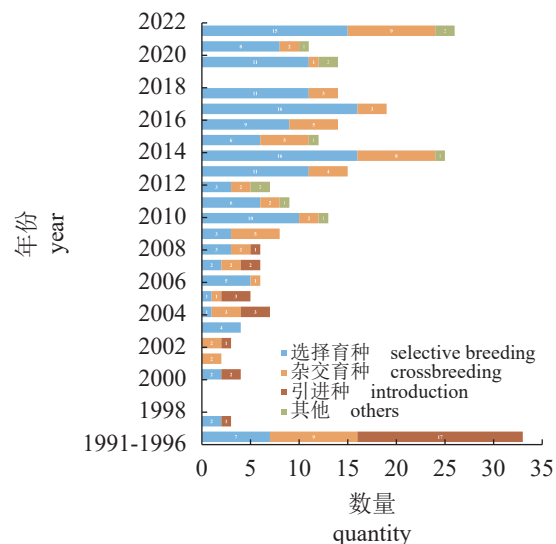


图 5 中国已审定水产新品种的育种方法

数据来自 1996 年到 2022 年中国农业农业农村部发布的关于水产新品种审定通过的公告

Fig. 5 Breeding technologies for new aquatic strains approved by China

The data comes from the announcements issued by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China on the approval of new aquatic varieties from 1996 to 2022

对于育种目标性状的选择上, 以生长速度为目标性状的占 47.85%; 其次为抗病性状, 占到 27.48% (图 6)。育种目标性状的占比情况与我国水产育种相关数据相似, 生长速度占比最大。从 1996 年以来我国审定通过的水产新品种的目标性状来看, 生长性状是“永恒的主题”或者说是关注度最高的性状, 其中有 205 个新品种是以生长性状为目标性状, 其次是形态特征、抗病、抗逆等性状。

育种的目标是为了促进养殖产业发展, 育种性状也必然有可持续的生产经济价值。尽管在育种目标性状上, 有更加多样化的趋势, 如性别控制、营养组成和含量、体色体态与品质等性状越来越多地被关注到, 但当前以及未来一段时间, 世界水产遗传改良在育种目标上主要还是会继续聚焦在生长、抗病、抗逆等重要经济性状方面<sup>[5]</sup>。

### 5 主要遗传改良种对水产养殖业发展的重要推动作用

水产养殖业作为重要的人类食物和营养供给产业之一, 产量是衡量养殖发展情况的一个非常重要的指标。在鱼类和对虾养殖产业中, 传统的选择育种每代遗传增益达到 8% 到 12% 不等, 这对养殖产量的提升是显著的<sup>[31]</sup>。产量的多少不仅

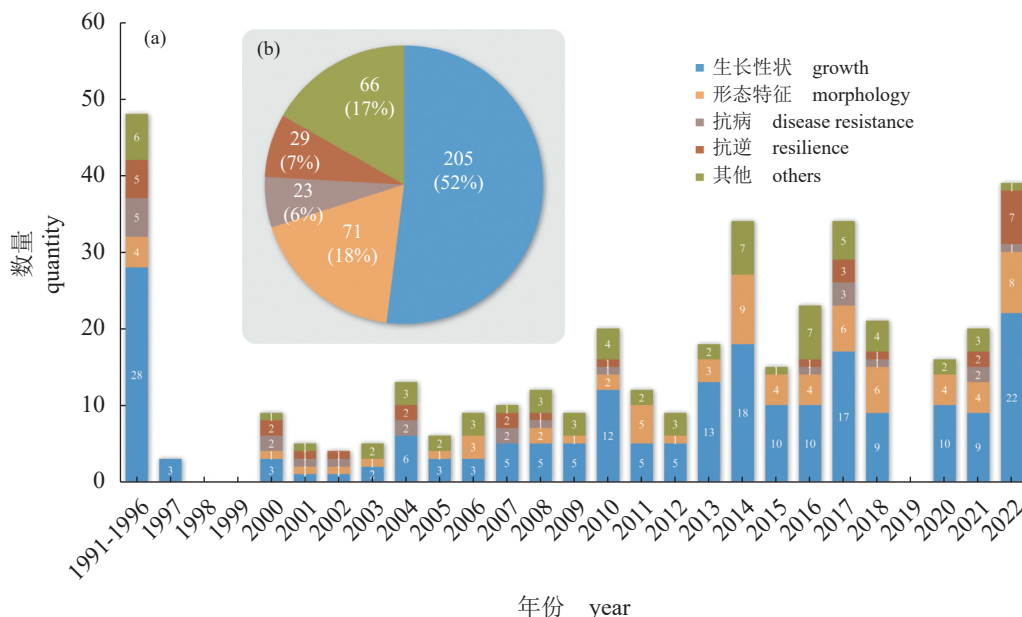


图 6 中国已审定水产新品种遗传改良性状占比及数量

(a) 各年份审定通过品种的遗传改良性状情况; (b) 水产新品种的遗传改良性状分布比例。数据来自 1996 年到 2022 年中国农业农业农村部发布的关于水产新品种审定通过的公告及所附新品种简介

Fig. 6 Proportion and quantity of genetic-improved traits of new aquatic strains approved in China

(a) Categories and quantities of genetic-improved traits for strains approved in each year; (b) Proportion of genetic-improved traits of new aquatic strains. Notes: The data comes from the announcements issued by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China on the approval of new aquatic varieties from 1996 to 2022

影响到水产产品的消费量, 同时也会直接影响养殖行业从业者的收入情况。

以中国 1995—2019 年淡水养殖产量为例, 此时间段内, 我国开始审定并大力推广水产新品种, 20 余年间, 中国淡水养殖面积由 1995 年的 466.9 万  $\text{hm}^2$  增加到 2021 年的 498.4 万  $\text{hm}^2$ , 增幅仅为 6.75%。同期, 中国淡水养殖产量却保持快速增长态势, 2021 年淡水养殖产量 3 183.27 万 t 相比 1995 年淡水养殖产量 940.8 万 t 增幅达 338%<sup>[12,32]</sup>, 可见遗传改良对水产养殖业发展起到了重要的推动作用。

### 5.1 尼罗罗非鱼

尼罗罗非鱼是世界养殖产量增长最快的淡水鱼类<sup>[14]</sup>。罗非鱼选育起步于 1988 年的吉富品系育种项目, 选育 5 年后生长速度基本翻倍。自 20 世纪 90 年代以来, 全球尼罗罗非鱼养殖总产量快速增长, 1980 年养殖产量为 4.14 万 t; 1980 至 1988 年, 养殖产量年均增长了 15.63%; 1988 年至 2018 年养殖产量年均增长了 29.40%; 于 2019 年达到 451.46 万 t, 相比 1980 年增加了近百倍 (图 7)。

我国于 20 世纪 90 年代引入尼罗罗非鱼和吉

富品系尼罗罗非鱼, 1996 年作为引进种审定通过, 经推广试验验证, 吉富品系罗非鱼生长速度对比试验地所主养的罗非鱼品系均有提升后得到推广<sup>[33-34]</sup>。随后我国在引进种基础上再进行遗传改良, 培养出“新吉富”罗非鱼、吉富罗非鱼“中威 1 号”、红罗非鱼“中恒 1 号”等新品种。引进吉富新品系的同时, 继续在国内进行遗传改良, 对我国尼罗罗非鱼养殖业发展具有明显的推动作用, 产量上升趋势迅速扩大, 1950—1992 年间年均产量增长为 0.78 万 t, 1992—2020 年年均产量增长为 14.94 万 t。

### 5.2 大西洋鲑

大西洋鲑育种项目是世界水产育种典型的成功案例, 其由挪威水产养殖研究所 (AKVAFORSK) 在 1975 年开始, 选育初期的数代是以生长速度为唯一育种目标<sup>[35]</sup>。挪威大西洋鲑产量在育种项目取得进展后迅速增长, 初期对生长速度的选育取得了成效, 选育种也初步得到了推广 (图 8)。以育种项目开始时间节点为标志, 1965 年 (依据挪威大西洋鲑开始有养殖数据记录的时间) 至 1975 年, 年均养殖产量增长仅为 78.27 t; 而 1975—1985 年, 年均养殖产量增长为 2 624.73 t,

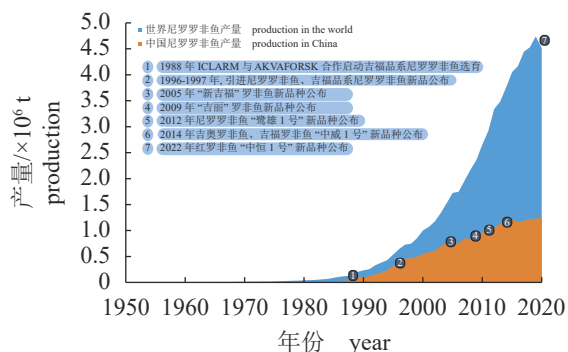


图7 世界及中国尼罗罗非鱼养殖产量变化  
(数据来源: FAO)<sup>[19]</sup>

Fig. 7 Production of cultured Nile tilapia in the world and China (data collected from FAO)<sup>[19]</sup>

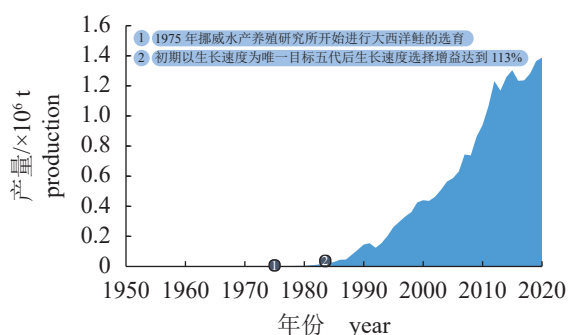


图8 挪威大西洋鲑养殖产量变化(数据来源: FAO)<sup>[19]</sup>

Fig. 8 Production of cultured Atlantic salmon in Norway (data collected from FAO)<sup>[19]</sup>

平均增长量翻了近34倍。

挪威大西洋鲑初期选育以生长速度为主要目标性状, 经过5代选育, 生长速度的遗传增益相较于未选育的野生群体增加了113%<sup>[11]</sup>。同时, 随着相关育种工作的稳步推进, 育种项目在饲料转化率、肌肉营养品质等方面也有提升; 对细菌和病毒疾病抗性的选育也成为大西洋鲑育种计划的重要组成部分<sup>[14]</sup>。从产量走势可以看出, 遗传改良的成功进行, 使大西洋鲑养殖产量实现了快速增加并达到一个较高的水平。

### 5.3 凡纳滨对虾

凡纳滨对虾现是我国主要养殖对象之一。1992年我国对虾产量为22万t, 但受对虾白斑综合征病毒的影响, 1997年我国对虾产量仅为6万多t<sup>[36]</sup>。2002年我国引入SPF (specific pathogen free, 无特定病原) 凡纳滨对虾, 目前已培育出11个新品种, 分别是2010年通过国家审定的凡纳滨对虾“科海1号”、“中科1号”和“中兴1号”、

2012年的“桂海1号”、2016年的“广泰1号”、“海兴农1号”、2017年的“兴海1号”和“正金阳1号”以及2022年的“海兴农3号”“渤海1号”“海茂1号”。新品种的不断推出对我国对虾养殖规模扩大以及产量增加起到很大推动作用。自1996年后, 我国对虾产量持续上升, 从1996年的8.89万t上升到2019年的181.56万t, 产量增长超过20倍(图9)。凡纳滨对虾的早期引入解决了中国原对虾养殖病害问题, 对当时养殖业的重振起到重要作用; 而引入后继续进行遗传改良, 为我国凡纳滨对虾的种虾国产化以及养殖产量增加起到了推动作用。

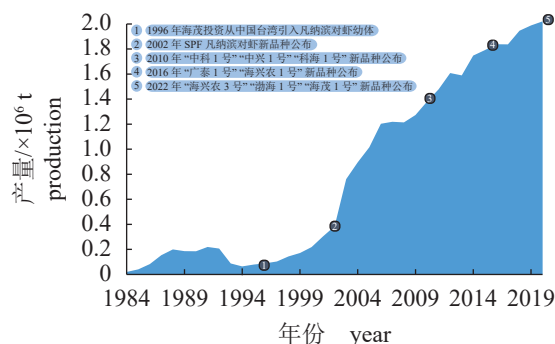


图9 中国各类对虾养殖产量变化  
(数据来源: 《中国渔业年鉴》)

Fig. 9 Production of cultured *Penaeus* spp. in China (data collected from 《China Fishery Statistics Yearbook》)

### 5.4 鲫

鲫 (*Carassius auratus*) 为我国重要淡水养殖鱼类, 截止2022年, 在我国审定通过的116种淡水鱼品种中, 18种为鲫, 包括异育银鲫 (*C. gibelio*)、湘云鲫等系列培育品种。其中异育银鲫有系列品种, 包括异育银鲫、高体型异育银鲫、异育银鲫“中科3号”、异育银鲫“中科5号”。我国鲫养殖产量自1990年来, 总体保持上升趋势, 自1990年的21.16万t增长到2019年的275.57万t, 2016年养殖产量一度超过300万t(图10)。在鲫新品种集中出现的时间段, 如1996—2001年有彭泽鲫、异育银鲫等, 2007—2009年有杂交黄金鲫、湘云鲫2号等。在相应时间段, 鲫养殖产量均保持增长趋势。2013年后还有津新乌鲫、长丰鲫等新品种的推出, 但是由于我国居民整体生活水平以及消费水平的提高, 人们对有刺鱼的需求量下降, 在一定程度上影响了鲫的养殖规模。

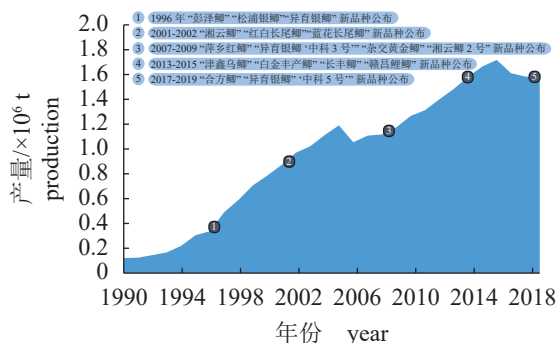


图 10 中国鲫养殖产量变化 (数据来源: 《中国渔业年鉴》)

Fig. 10 Production of cultured crucian carp in China (data collected from 《China Fishery Statistics Yearbook》)

### 5.5 鳊鲂

鳊鲂鱼类属于我国主要淡水养殖种类, 其养殖产业在满足我国城乡居民蛋白需求和带动渔业发展上发挥着重要作用<sup>[37]</sup>。我国鳊鲂鱼类产量整体保持增长趋势, 自 1989 年的 14.44 万 t 增加到 2021 年的 76.43 万 t (图 11)。在鳊鲂鱼类的育种项目中, 除了团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) “浦江 1 号”、“华海 1 号”和“浦江 2 号”外, 其余审定通过的鳊鲂新品种均为杂交品种, 例如 2012 年审定通过的芦台鲂、杂交鲂“先锋 1 号”, 2014 年的杂交翘嘴鲂, 2017 年的太湖鲂, 2018 年的鲂“先锋 2 号”以及 2020 年的杂交鲂“皖江 1 号”。多个新品种的发布, 总体来说, 有效缓解

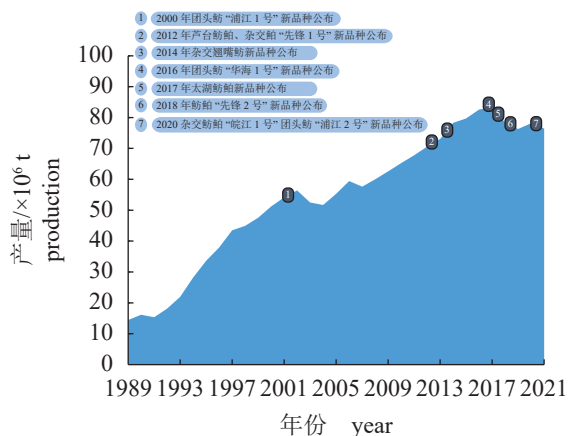


图 11 中国鳊鲂养殖产量变化 (数据来源: 《中国渔业年鉴》)

Fig. 11 Production of cultured blunt snout bream in China (data collected from 《China Fishery Statistics Yearbook》)

了养殖鳊鲂的种质退化问题, 鳊鲂鱼类整体产量与 20 世纪 90 年代相比有较大幅度上升。但是近些年鳊鲂产量有所下滑, 种质退化问题依旧存在, 加上市场影响, 后续的鳊鲂育种不仅需要关注在产量相关的性状上, 也需要更多地关注到品质方面的提升, 消除鱼肌间刺作为研究热点之一<sup>[4]</sup>, Nie 等<sup>[38]</sup> 已采用基因编辑方法在团头鲂肌间刺性状改良方面取得了一定进展。

### 5.6 黄颡鱼

黄颡鱼在我国养殖较为广泛, 近年来产量增长速度较快。黄颡鱼的雌雄生长差异较大, 影响养殖效率<sup>[39-40]</sup>。瓦氏黄颡鱼体型较大, 但是耐缺氧能力差<sup>[41]</sup>, 所以在黄颡鱼育种中, 通过杂交提高黄颡鱼的抗逆性能、通过性别控制帮助提高黄颡鱼的生长速度是主要的育种研究方向。在相同养殖条件下, 雄性黄颡鱼比雌性黄颡鱼生长速度快 30% 左右<sup>[42]</sup>。我国黄颡鱼育种发展较晚, 在新品种方面分别于 2010 年审定通过了全雄黄颡鱼品种“全雄 1 号”和 2018 年审定通过了杂交黄颡鱼“黄优 1 号”。近年来黄颡鱼产量增长速度快, 2003 年我国黄颡鱼产量为 5.48 万 t, 到 2021 年产量增长到 58.78 万 t, 增幅近 11 倍 (图 12)。

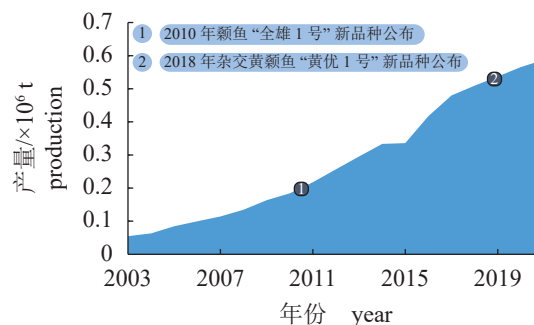


图 12 中国黄颡鱼养殖产量变化 (数据来源: 《中国渔业年鉴》)

Fig. 12 Production of cultured yellow catfish in China, from 1991 to 2020 (data collected from 《China Fishery Statistics Yearbook》)

### 5.7 大口黑鲈

大口黑鲈具有适应性强、生长快、易起捕、养殖周期短等优点。我国于 20 世纪 80 年代引进大口黑鲈北方亚种, 现已成为我国重要的淡水养殖经济鱼类<sup>[43]</sup>。大口黑鲈于 1996 年作为引进良种通过国家审定, 初期养殖规模不大。但随着近年来我国对优质鱼类产品的需求量增大, 加州鲈的



消费量也随之增加。我国加州鲈的育种研究同样在近些年有了新的进展, 2010 年我国审定通过了“优鲈 1 号”, 2018 年又审定通过了“优鲈 3 号”。新品种培育和推广应用对加州鲈在我国养殖规模的扩大以及产量的提升都起到了较为明显的推动作用。我国 2003 年加州鲈产量为 12.64 万 t, 到 2021 年我国加州鲈产量增长至 70.21 万 t, 新品种出现前后产量年均增长率分别为 6.65% 和 14.21% (图 13)。

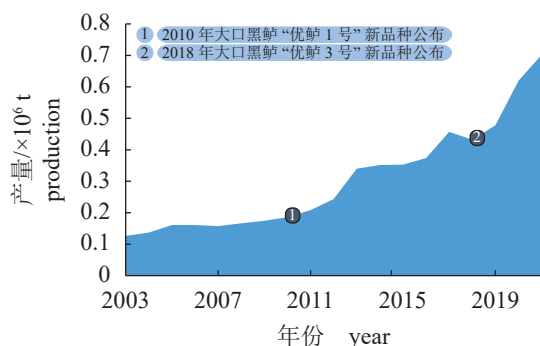


图 13 中国加州鲈养殖产量变化 (数据来源:《中国渔业年鉴》)

Fig. 13 Production of cultured largemouth bass in China (data collected from 《China Fishery Statistics Yearbook》)

## 6 总结与展望

将来, 水产养殖或成为满足水产品增长需求的主要来源之一, 成为国家粮食安全和食物有效供给的重要保障。与陆地牲畜相比, 大多数水产养殖物种仍然处于驯化和育种的早期阶段。适宜的育种计划所带来的种质遗传改良和传播使生产性状的累积增加成为可能<sup>[44]</sup>, 而遗传改良的高遗传收益和巨大潜力将继续推动水产养殖业的快速发展<sup>[21]</sup>。本文对世界水产养殖产业发展概况、遗传育种技术及人工改良种的推广应用及效果等进行了概述。过去的 20 多年, 我国水产养殖业取得了快速发展, 为全球水产养殖发展做出了贡献。水产育种技术创新、品种培育及新品种审定等工作的推进, 推动了育种创新研究的进步, 同时也促进了水产养殖业的快速发展。但我们也要认识到, 国内缺乏诸如挪威大西洋鲑、美国三倍体牡蛎及高产抗逆凡纳滨对虾等在世界水产种业占有绝对优势的突破性品种, 优良品种的开发仍需要更加深入的研究。随着水产养殖工程化、工厂化、智慧化等设施养殖模式的发展, 培育适应新养殖模式的新品种就显得极为迫切。此外, 随着人们生活水平的提高, 对培育不饱和脂肪酸含量高、

少刺/无刺的鱼类新品种也提出了需求<sup>[21, 38]</sup>。

21 世纪, 高通量测序技术等各项生物科学技术的快速发展, 更多养殖鱼类的全基因组被成功解析, 新兴的基因组资源揭示重要生物学机制, 促进遗传育种生物技术的创新发展。大量生物技术的快速进步基于对关键性状的遗传学和生物学知识的更进一步认知, 这对于尚未得到充分研究的水产养殖物种来说非常重要, 是前所未有的机会<sup>[44]</sup>。近年来随着国家对种质资源保护的高度重视, 水产养殖业发展正朝着更加绿色高效的方向前进。但我国水产育种中还存在水产种质资源系统评价鉴定欠缺、新基因挖掘与育种利用严重不足、具有重要育种价值的关键基因和实用分子标记缺乏、基础研究与育种应用结合不足; 商业化全基因组分子标记开发和实用化分子育种技术应用较少, 育种大数据分析、信息化以及相关系统开发与应用不够; 规模化高通量复杂性状表现自动检测装备、育种芯片设计与制备系统缺乏; 未形成工程化育种技术体系, 效率低、系统集成明显不足等严重问题, 且水产养殖领域的研究资金落后于畜牧业<sup>[4]</sup>, 难以满足未来种业和产业发展的需求。

鉴于此, 本文提出以下建议: (1) 在种质资源保护与利用方面, 开展种质资源规模化精准鉴定、优异资源评价标准和数字化种质资源库等方面的共性关键技术联合攻关; (2) 在重要性状生物学基础解析方面, 利用低成本高通量基因分型技术获取多组学信息, 基于智能化性能测定技术获得表型信息, 采用整合组学基因挖掘技术, 结合基因编辑等在体验证技术解析重要性状的关键基因及调控网络; (3) 在育种与繁殖理论技术创新方面, 开展水产动物全基因组设计育种、高效基因编辑育种、水产动物性别控制育种、干细胞育种、合成生物学等技术的研发; (4) 在品种(系)持续选育方面, 开展水产动物基因组高效选种及精准选配技术的创新及产业化推广应用; (5) 在健康养殖与水产品加工方面, 开展水产动物疾病防控与绿色渔药研发、水产动物精准营养、水产养殖设施化和智慧化、水产品品质安全与营养健康鉴定等技术的攻关, 最大化提高水产动物育种效率, 为人民群众提供绿色安全、优质健康的水产品。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献 (References):

[1] Golden C D, Koehn J Z, Shepon A, *et al.* Aquatic foods

- to nourish nations[J]. *Nature*, 2021, 598(7880): 315-320.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO highlights the great potential of genetic improvements in aquaculture for better food security[EB/OL]. [2019-08-23]. <https://www.fao.org/news/story/en/item/1205417/icode/>.
- [3] de Verdal H, Komen H, Quillet E, *et al.* Improving feed efficiency in fish using selective breeding: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2018, 10(4): 833-851.
- [4] Stokstad E. Tomorrow's catch: genomic technologies promise dramatic gains for aquaculture by accelerating the breeding of better strains[J]. *Science*, 2020, 370(6519): 902-905.
- [5] 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).
- [6] Zhang W B, Belton B, Edwards P, *et al.* Aquaculture will continue to depend more on land than sea[J]. *Nature*, 2022, 603(7900): E2-E4.
- [7] Diana J S. Aquaculture production and biodiversity conservation[J]. *BioScience*, 2009, 59(1): 27-38.
- [8] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022. Towards blue transformation[R]. Rome: FAO, 2022.
- [9] Naylor R L, Hardy R W, Buschmann A H, *et al.* A 20-year retrospective review of global aquaculture[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 551-563.
- [10] 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.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Aquatic Technology Promotion Station, China Society of Fisheries. China Fishery Statistical Yearbook 2022[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2022 (in Chinese).
- [11] Lhorente J P, Araneda M, Neira R, *et al.* Advances in genetic improvement for salmon and trout aquaculture: The Chilean situation and prospects[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2019, 11(2): 340-353.
- [12] 王振忠, 任鹏, 赵红光, 等. 中国水产种业发展现状与对策研究[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(1): 1-7.
- Wang Z Z, Ren P, Zhao H G, *et al.* Development status and countermeasures of the aquatic breeding industry in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1): 1-7 (in Chinese).
- [13] 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).
- [14] Gjedrem T, Baranski M. The success of selective breeding in aquaculture[M]//Gjedrem T, Baranski M. Selective Breeding in Aquaculture: an Introduction. Dordrecht: Springer, 2009: 13-23, doi: 10.1007/978-90-481-2773-3\_3.
- [15] 韩坤煌. 我国水产种业产业的发展现状分析与对策建议[J]. *福建水产*, 2015, 37(6): 495-501.
- Han K H. Analysis of development status and suggestions of aquatic seed industry in China[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2015, 37(6): 495-501 (in Chinese).
- [16] FAO. Global aquaculture production 1950-2020 (FishstatJ). FAO Fisheries and Aquaculture Department [online or CD-ROM][EB/OL]. Rome: FAO, 2022. (2022-03-25). <https://www.fao.org/fishery/en/statistics/software/fishstatj>.
- [17] FAO. Global capture production 1950-2020 (FishstatJ). FAO fisheries and aquaculture department [online or CD-ROM][EB/OL]. Rome, 2022. <https://www.fao.org/fishery/en/statistics/software/fishstatj>. <https://www.fao.org/fishery/en/statistics/software/fishstatj>
- [18] 李学鹏. 水产品加工与检测分析研究动态[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(22): 8149-8150.
- Li X P. Research trends on the processing and safety assessment of aquatic products[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(22): 8149-8150 (in Chinese).
- [19] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in Action[M]. Rome: FAO, 2020.
- [20] FAO. Food balance sheets of fish and fishery products 1961-2017 (FishstatJ). FAO fisheries and aquaculture department [online or CD-ROM][EB/OL]. Rome, 2020. <https://www.fao.org/fishery/en/statistics/software/fishstatj>.
- [21] 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.
- [22] Gjedrem T. Selective breeding to improve aquaculture production[J]. *World Aquaculture*, 1997, 28(1): 33-45.

- [23] Gjedrem T. Genetic improvement for the development of efficient global aquaculture: a personal opinion review[J]. *Aquaculture*, 2012, 344-349: 12-22.
- [24] Gjedrem T, Rye M. Selection response in fish and shellfish: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2018, 10(1): 168-179.
- [25] Janssen K, Chavanne H, Berentsen P, *et al.* Impact of selective breeding on European aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2017, 472(S1): 8-16.
- [26] 江曙光, 李春艳, 刘国山, 等. 水产动物主要遗传育种方法及发展趋势[J]. *海洋与渔业*, 2012(11): 91-95.  
Jiang S G, Li C Y, Liu G S, *et al.* Main genetic and breeding methods and development trends of aquatic animals[J]. *Ocean and Fishery*, 2012(11): 91-95 (in Chinese).
- [27] 桂建芳. 鱼类生物学和生物技术是水产养殖可持续发展的源泉[J]. *中国科学:生命科学*, 2015, 58(2): 121-123.  
Gui J F. Fish biology and biotechnology is the source for sustainable aquaculture[J]. *Science China Life Sciences*, 2015, 58(2): 121-123 (in Chinese).
- [28] 桂建芳, 周莉, 张晓娟. 鱼类遗传育种发展现状与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(9): 932-939.  
Gui J F, Zhou L, Zhang X J. Research advances and prospects for fish genetic breeding[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(9): 932-939 (in Chinese).
- [29] 桂建芳, 朱作言. 水产动物重要经济性状的分子基础及其遗传改良[J]. *科学通报*, 2012, 57(15): 1751-1760.  
Gui J F, Zhu Z Y. Molecular basis and genetic improvement of economically important traits in aquaculture animals[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(15): 1751-1760 (in Chinese).
- [30] 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).
- [31] Nguyen N H. Genetic improvement for important farmed aquaculture species with a reference to carp, tilapia and prawns in Asia: achievements, lessons and challenges[J]. *Fish and Fisheries*, 2016, 17(2): 483-506.
- [32] 中国农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴1995[M]. 北京: 中国农业农村部渔业渔政管理局, 1995.  
Administration of Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. *China Fisheries Statistical Yearbook 1995*[M]. Beijing: Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 1995(in Chinese).
- [33] 李思发, 李家乐, 李晨虹, 等. 尼罗罗非鱼吉富品系养殖推广中试研究[J]. *水产科技情报*, 1997, 24(6): 16-21.  
Li S F, Li J L, Li C H, *et al.* On-farm evaluation of gift strain of Nile tilapia[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 1997, 24(6): 16-21 (in Chinese).
- [34] 李思发, 李家乐. 养殖新品种简介——吉富品系尼罗罗非鱼[J]. *中国水产*, 1998(4): 36-27.  
Li S F, Li J L. Introduction of new breeding species—Gifford strain Nile tilapia[J]. *China Fisheries*, 1998(4): 36-27 (in Chinese).
- [35] Gjerde B, Korsvoll S A. Realized selection differentials for growth rate and early sexual maturity in Atlantic salmon[J]. *Aquacult Eur*, 1999, 27: 73-74.
- [36] 黄进, 沐兴钰, 韦煜嘉. 南美白对虾育种“逆袭”记 [N]. *南方日报*, 2021-09-29(A19).  
Huang J, Mu X Y, Wei Y J. The "counter-attack" of the breeding of *Penaeus vannamei*[N]. *Nanfang Daily*, 2021-09-29(A19) (in Chinese).
- [37] 陈汝丽. 团头鲂养殖产业现状与发展趋势[J]. *科学养鱼*, 2015(2): 4-5.  
Chen R L. Status quo and development trend of Tuantou bream breeding industry[J]. *Scientific Fish Farming*, 2015(2): 4-5 (in Chinese).
- [38] Nie C H, Wan S M, Chen Y L, *et al.* Single-cell transcriptomes and *runx2b*<sup>-/-</sup> mutants reveal the genetic signatures of intermuscular bone formation in zebrafish[J]. *National Science Review*, 2022, 9(11): nwac152.
- [39] 宋立民, 王卫民, 周小云, 等. 冷、热休克法诱导黄颡鱼三倍体的比较研究[J]. *水产学报*, 2010, 34(5): 768-776.  
Song L M, Wang W M, Zhou X Y, *et al.* Comparative studies in the induction of triploidy for *Pelteobagrus fulvidraco* by cold and heat shocks[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(5): 768-776 (in Chinese).
- [40] 潘庭双, 凌俊, 江河, 等. 不同催产激素对黄颡鱼♀×瓦氏黄颡鱼♂繁殖的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(7): 153-157.  
Pan T S, Ling J, Jiang H, *et al.* Oxytocin affects the reproduction of *Pseudobagrus fulvidraco* ♀×*P. vachelli* ♂[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(7): 153-157 (in Chinese).

- [41] 张国松, 陶攀峰, 陈嘉玮, 等. 黄颡鱼属鱼类遗传育种研究进展[J]. *水产科技情报*, 2015, 42(3): 123-128.  
Zhang G S, Tao P F, Chen J W, *et al.* Research progress on genetics and breeding of yellow catfish[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2015, 42(3): 123-128 (in Chinese).
- [42] 谢满华, 李珺, 李自宝. 黄颡鱼“全雄1号”苗种培育试验技术[J]. *中国水产*, 2015(8): 92-93.  
Xie M H, Li J, Li Z B. Breeding test technology of yellow catfish "Quanxiong No. 1"[J]. *China Fisheries*, 2015(8): 92-93 (in Chinese).
- [43] 蔡磊, 白俊杰, 全迎春, 等. 大口黑鲈遗传育种研究进展[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(17): 96-99.  
Cai L, Bai J J, Quan Y C, *et al.* Advances in genetics and breeding of largemouth bass[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(17): 96-99 (in Chinese).
- [44] Houston R D, Bean T P, Macqueen D J, *et al.* Harnessing genomics to fast-track genetic improvement in aquaculture[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2020, 21(7): 389-409.

## Promotion of genetic improvement to world aquaculture development

WANG Shilong<sup>1</sup>, HU Honglang<sup>2</sup>, XIONG Xuemei<sup>1</sup>, GAO Zexia<sup>1,3\*</sup>

- (1. *College of Fisheries, Key Laboratory of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Agricultural Animal Genetics, Breeding and Reproduction of Ministry of Education/Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt of Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*  
2. *National Fisheries Technology Extension Center, Beijing 100125, China;*  
3. *Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China)*

**Abstract:** Along with the rapid and sustained increases of global aquaculture production, aquaculture has been rapidly replacing the capture fisheries in the last two decades, and already become a production activity with great potential to meet human demand for high-quality proteins. The rapid consumption growth of aquatic products in the world in recent decades shows the increasingly important role of aquatic products in the human food system. Genetic improvement has attracted much attention as a key part in the development of aquaculture. Up to now, selective breeding and cross-breeding are the main breeding methods, and economic traits such as growth rate and survival rate are the main target traits for improvement, which have played a fundamental, leading and strategic role in the development of the world aquaculture industry. Following the increasing demand for high-quality protein and the widespread popularization of the concept of the "Greater Food" approach, it is a general trend to make aquatic production into a more efficient food production system. Globally, however, the aquaculture seeds industry has some limitations, such as not many strains and species of genetic improvement, and improved traits lagging behind the needs of industrial development. It is necessary to improve technological, variety and mechanism innovation, to promote the development of high-quality aquaculture seed industry. Based on previous research results and various fishery statistics, this study summarizes the development of the global aquaculture industry, the genetic improvement of important aquaculture species, the application of breeding technology in aquaculture, the improvement of target traits, and the production data of six major species experiencing artificially genetic improvement to analyze the development status and existing problems, which could provide a reference for the study of the aquacultural seed industry as well as its high-quality development.

**Key words:** aquaculture; genetic improvement; breeding technology; improved variety; production

**Corresponding author:** GAO Zexia. E-mail: gaozx@mail.hzau.edu.cn

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (31872559); the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-45-01); Special Project of Science and Technology Innovation of the Ministry of Education (2021ZL08)