



· 综述 ·

我国鲮科鱼类遗传育种研究进展

赵 诚, 李 谣, 宁先会, 王 涛, 尹绍武*

(南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏省特色水产育种与
绿色高效养殖技术工程研究中心, 江苏 南京 210023)

摘要: 鲮科鱼类是我国重要的经济鱼类, 该科中多种鱼类的养殖产量与市场价格较高, 如黄颡鱼、长吻鮠、乌苏里拟鲮和瓦氏黄颡鱼等, 对其进行遗传改良的研究将有助于推动我国水产养殖业的可持续发展。本文从选择育种、杂交育种、细胞工程育种、基因工程育种、分子标记辅助育种等方面简要概述了我国鲮科鱼类遗传育种的研究进展并作了展望, 为进一步科学合理地利用鲮科鱼类种质资源提供参考。

关键词: 鲮科; 遗传育种; 研究进展

中图分类号: S 962.1

文献标志码: A

自 20 世纪 80 年代以来, 我国水产养殖产量持续增长, 成为农业中发展最快的产业之一, 为保障国家粮食安全作出了重要贡献^[1]。水产养殖业的发展离不开良种培育, 良种培育是一个寻找和探索在基因型和表型方面发生有益变异的个体或者群体的过程^[2]。在各种良种培育方法中, 选择育种是目前动植物新品种培育中最常用的方法之一^[3]。杂交育种由于操作简单、成效快、效果明显, 也广泛应用于水产动物的遗传育种中, 但杂交育种得到的仅仅是子一代的优势^[4]。随着细胞工程及基因工程等高新技术的兴起, 生物工程育种技术在水产动物改良中起到越来越重要的作用, 逐步建立了细胞核移植、细胞融合、性别控制、染色体组操作、雌(雄)核发育、转基因和基因编辑等育种技术, 逐渐形成了常规育种与生物工程育种相结合的多种育种技术综合配套的技术路线, 取得了十分显著的效果, 促进了世界水产养殖业的发展^[5]。本文从选择育种、杂交育

种、细胞工程育种、基因工程(编辑)育种、分子标记辅助育种等方面简要概述了鲮科鱼类遗传育种的研究进展并作了展望, 为进一步保护和利用鲮科鱼类种质资源提供基础资料。

1 鲮科鱼类概述

鲮科(Bagridae), 隶属于硬骨鱼纲(Osteichthyes)辐鳍亚纲(Actinopterygii)鲇形目(Siluriformes)。鲮科鱼类在我国分布广泛, 仅次于鲇科(Siluridae)。鲮科分为 4 属约 30 种, 包含黄颡鱼属(*Pelteobagrus*)、鮠属(*Leiocassis*)、拟鲮属(*Pseudobagrus*)和鳊属(*Mystus*)^[6]。鲮科鱼类体延长、前部略平扁、尾部侧扁; 头平扁, 吻钝; 眼中大或小、上侧位; 口中大或小、前位或下位。每个属都有各自不同的形态特征, 例如黄颡鱼属体延长、稍粗壮、吻端向背鳍上斜、后部侧扁、口大、眼中等大、有鼻须; 背鳍较小、具骨质硬刺; 尾鳍深分叉、末端圆; 活体背部黑褐色, 至腹部渐

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-08-26

资助项目: 江苏省种业振兴“揭榜挂帅”项目(JBGS[2021]034); 国家自然科学基金(32402983)

第一作者: 赵诚(照片), 从事鱼类种质资源与遗传育种研究, E-mail: zhaochengfish@foxmail.com

通信作者: 尹绍武, 从事鱼类种质资源与遗传育种方面研究, E-mail: yinshaowu@163.com



浅黄色等^[7-8]。鲩属头中等大、稍纵扁、头顶大多被皮肤而光滑、仅上枕骨棘或裸露；口中等大、下位、横裂；背鳍、胸鳍具硬刺。尾鳍深分叉等。拟鲮属体细长、吻钝、上颌略突出、口亚下位、横裂、中等宽、上下颌及腭骨有线毛状齿带；须4对，较短；眼中等大；体光滑无鳞；体背侧青灰色，腹部灰白色等^[9]。

鲮科鱼类在我国分布广泛，黄颡鱼 (*P. fulvidraco*)、瓦氏黄颡鱼 (*P. vachellii*)、长吻鲮 (*L. longirostris*) 和乌苏里拟鲮 (*P. ussuriensis*) 等为该科代表性养殖品种。黄颡鱼广泛分布于长江、黄河、珠江、黑龙江、钱塘江、淮河及其支流，具有一定的天然产量；其肉质细嫩，少刺，味鲜美，颇受消费者青睐，有较高的经济价值，近年来其消费量急剧增加；此外，因黄颡鱼具有饲养成活率高、适应能力强、生长速率快和经济价值高等特点，已成为重要的淡水养殖鱼类对象^[10]。长吻鲮分布于中国东部的辽河、淮河、长江、闽江至珠江等水系，以长江水系为主。其肉质细嫩鲜美，富含氨基酸，且氨基酸的量和比值最适合人体需要，无细刺，富含脂肪和矿物质，颇受消费者喜爱，具有较高的经济价值，但耐低氧能力较黄颡鱼差，在我国池塘养殖较少^[11]。乌苏里拟鲮天然分布于我国黑龙江至珠江流域水系中，其粗脂肪含量高、肉质鲜嫩、味道鲜美；目前已在我国十余省份开展养殖^[12]。

2 鲮科鱼类遗传育种研究进展

2.1 选择育种

选择育种又称系统育种，是以对养殖品种的经济性状进行改良为目的而进行的遗传学控制^[13]。鱼类选择育种的常用方法有家系选择、亲本选择、混合选择和综合选择等^[14]。目前，关于鲮科鱼类选择育种的文献报道较多，主要集中在黄颡鱼属，如刘朋朋等^[15]对不同家系黄颡鱼的生长性能进行了比较，以巢湖、淠湖、洪泽湖和太湖的黄颡鱼为亲本，构建了63个家系，通过比较得出，巢湖群体适合用作母本，而淠湖群体适合用作父本。秦钦等^[16-19]通过构建若干黄颡鱼家系并对其比较分析，得出各家系组在抗病、饲料利用、生长速率等方面表现出显著差异，且存在较明显的中亲优势和超亲优势。梅洁等^[20]利用全基因组微卫星成功鉴别出黄颡鱼不同家系，为其选育和繁殖配

组提供了依据。陈秀丽等^[21]建立了黄颡鱼全雌鱼和超雄鱼种质库并健全了全雄黄颡鱼繁殖体系。2023年审定通过的水产新品种，长吻鲮“川江1号”(GS-01-003-2023)以长江流域野生长吻鲮为亲本，生长速率为目标性状，经过连续4个世代的选育，其生长性能相对于未经选育的长吻鲮具有显著优势。但选择育种在鲮科其他鱼类中应用较少，因此，在今后的鲮科鱼类选育过程中可以开展瓦氏黄颡鱼、乌苏里拟鲮等的选育，并采用复合育种技术，以期培育出生长性能好的鲮科鱼类新品种。

2.2 杂交育种

杂交育种是人们将遗传性状不同的生物体相互交配(或结合)，一般是不同品系、品种间，甚至种间、属间和亚科间个体的交配使之产生优良杂种的过程^[22]。在育种和生产实践上，杂交育种是一种常用的、快捷的品种改良方法，通过杂交，利用杂种优势，可以获得生长速率、抗病性、产量和品质等较双亲优秀的新品种^[23]。杂交育种并不产生新基因，而是将现有生物资源的基因和性状进行重新组合，将分散于不同群体的基因组合在一起，建立符合人们意愿的基因型和表型^[23]。关于我国鲮科鱼类杂交育种的报道较多，主要进行了种间杂交和属间杂交，其中种间杂交组合黄颡鱼(♀)×瓦氏黄颡鱼(♂)，获得了具有体色诱人、肉味鲜美、含肉率高、无肌间刺、生长快速、抗病和抗逆性强的杂交黄颡鱼“黄优1号”^[24]，此杂交子代已在生产上得到广泛应用，显示出良好的应用效果。

属间杂交 目前，关于鲮科鱼类属间杂交的研究相对较多，如黄颡鱼和乌苏里拟鲮、瓦氏黄颡鱼和乌苏里拟鲮、黄颡鱼和粗唇鲮(*L. crassilabris*)、瓦氏黄颡鱼和粗唇鲮、黄颡鱼和长吻鲮、瓦氏黄颡鱼和长吻鲮的杂交组合。关于上述杂交组合的研究还在初级尝试阶段，故研究主要集中在繁育技术、成活率及生长形态等方面(表1)。

瓦氏黄颡鱼(♀)×粗唇鲮(♂)、乌苏里拟鲮(♀)×瓦氏黄颡鱼(♂)、瓦氏黄颡鱼(♀)×长吻鲮(♂)、黄颡鱼(♀)×长吻鲮(♂)这4个杂交组合所获得的杂交子一代出现了一定的杂种优势(表1)，但并没有得到具有明显生产意义的杂交组合，也没有对其进行深入的系统研究。因此，如何与其他育种技术相结合，利用杂交优势培育出适合市场需求的稳定的杂交新品系(种)，是今后鲮科鱼

表 1 鲮科鱼类属间杂交育种进展

Tab. 1 The research progress of generic hybridization of Bagridae family

| 杂交组合 hybridized combination | 受精率/% fertilization rate | 出苗率/% hatching rate | 成活率/% survival rate | 杂交种特点 characteristic of hybrid | 参考文献 references |
|--|-----------------------------|------------------------|------------------------|---|--------------------|
| 黄颡鱼♀×乌苏里拟鲮♂ <i>P. fulvidraco</i> ♀× <i>P. ussuriensis</i> ♂ | — | — | 87 | 杂交子代体重增加显著高于乌苏里拟鲮, 与黄颡鱼无显著差异 | [25] |
| | 92.67 | 79.67 | — | 胚胎发育较母本自交提前, 较父本自交延迟, 鱼苗与黄颡鱼自交体长差异不显著 | [26] |
| | — | — | 88 | 杂交组合平均优势最大为 17.03%±2.21%, 超亲优势最大为 10.85%±2.11%, 差异显著, 随着时间的增加, 优势程度降低。杂交子代的肥满度优势不显著 | [27] |
| | — | — | — | 杂交后代群体偏离了全雄黄颡鱼群体, 且绝对增重率高于全雄黄颡鱼群体 | [28] |
| 乌苏里拟鲮♀×黄颡鱼♂ <i>P. ussuriensis</i> ♀× <i>P. fulvidraco</i> ♂ | — | — | 93 | 体重中平均优势最大为 24.11%±2.01%, 随着时间的增加, 优势程度降低 | [27] |
| | 89.33 | 67.33 | — | 胚胎发育较父本自交组约缩短14 h。杂交后代体长显著超过乌苏里拟鲮自交 | [26] |
| 瓦氏黄颡鱼♀×乌苏里拟鲮♂ <i>P. vachelli</i> ♀× <i>P. ussuriensis</i> ♂ | — | — | 59.5 | 杂交子代有超亲优势, 体重绝对增加率、特定生长率大于亲本自交小于反交 | [29] |
| | — | — | — | 杂交子代全长、体重均大于反交与自交组合, 杂交子代在3个生长阶段(51、412、710 d)均有超亲优势 | [30] |
| | — | — | — | 子代继承了双亲的优良性状, 母本中继承的遗传物质稍多于父本; 杂交子代群体内的遗传多样性高于两亲本群体, 杂交一代基因杂合性增强, 表现出一定的杂种优势 | [31] |
| | — | — | 62.5 | 杂交子代的体重绝对增加率、特定生长率大于亲本自交 | [29] |
| 乌苏里拟鲮♀×瓦氏黄颡鱼♂ <i>P. ussuriensis</i> ♀× <i>P. vachelli</i> ♂ | — | — | — | 胚胎发育时间介于两亲本之间, 杂交苗全长偏向母本乌苏里拟鲮 | [32] |
| | — | — | — | 杂交组的体重在3个生长时段均有超亲优势, 正交组>反交组 | [30] |
| | — | — | — | 杂交组合从受精率和出苗率来看表现出较高的杂种优势, 后代形状倾向于母本, 相对增长率为3.63%/d, 有一定的生产意义 | [33-35] |
| 瓦氏黄颡鱼♀×粗唇鲮♂ <i>P. vachelli</i> ♀× <i>L. crassilabris</i> ♂ | 81 | 72.9 | 76.5 | 杂交组合从受精率和出苗率来看表现出较高的杂种优势, 后代形状倾向于母本, 相对增长率为3.63%/d, 有一定的生产意义 | [33-35] |
| 黄颡鱼♀×粗唇鲮♂ <i>P. fulvidraco</i> ♀× <i>L. crassilabris</i> ♂ | 64.6 | 11.0 | 74 | 此种杂交组合出苗率低, 形态特征倾向于父本, 不适于生产 | |
| 瓦氏黄颡鱼♀×长吻鲮♂ <i>P. vachelli</i> ♀× <i>L. longirostris</i> ♂ | 70 | — | — | 杂交鱼苗在鱼种阶段, 活动分布和体色近似纯种瓦氏黄颡鱼, 商品鱼阶段的部分特征似长吻鲮, 肥满度较高, 口下位较明显 | [36] |
| | — | — | — | 杂交子代形状介于两亲本之间, 生长速率高于母本 | [37] |
| 黄颡鱼♀×长吻鲮 <i>P. fulvidraco</i> ♀× <i>L. longirostris</i> ♂ | — | — | — | 杂交子代与父本遗传距离近, 也有母本的遗传物质, 较双亲有丰富的遗传多样性和更高的基因杂合度, 具有明显的杂种优势 | [38] |
| | — | — | — | 杂交种线粒体基因组总长度为16 527 bp, 包含2个核糖体RNA基因, 13个蛋白质编码基因, 22个转移RNA基因, 一个主要的非编码控制区(D-loop区) | [39] |
| 长吻鲮♀×黄颡鱼 <i>L. longirostris</i> ♀× <i>P. fulvidraco</i> ♂ | — | — | — | 杂交种线粒体基因组长度为16 534 bp, 22个转移RNA基因, 13个蛋白质编码基因, 2个核糖体RNA基因和非编码控制区的典型结构, 且遗传距离较近 | [40] |

注: “—”为相关的研究结果未见报道; 下同。

Notes: “—” represent research results have not been reported, the same below.

类育种的重点突破方向。

种间杂交 鲮科鱼类中黄颡鱼属是经济价值较高的物种之一, 其肉嫩味美、高营养、无肌间刺, 深受广大消费者的喜爱, 种间杂交的研究主要集中在黄颡鱼属(表2)。

可以看出, 黄颡鱼(♀)×瓦氏黄颡鱼(♂)杂交组合是迄今为止关于黄颡鱼报道最多的杂交组

合, 其研究大多数集中在生长^[52]、养殖^[53-54]、营养成分^[55]及营养饲料^[56-57]等方面(表2)。杂交黄颡鱼具有生长速率快、成活率高、抗病能力强、饲料系数低、遗传多样性高等特点, 其可数性状、可量性状、形态特征、体色和黄颡鱼十分相似, 表现出一定的母系效应。此杂交组合在生产实践上具有重要意义。

表 2 鲮科鱼类种间杂交育种进展

Tab. 2 The research progress of interspecific hybridization of Bagridae family

| 杂交组合 hybridized combination | 受精率/% fertilization rate | 出苗率/% hatching rate | 成活率/% survival rate | 杂交种特点 characteristic of hybrid | 参考文献 references |
|---|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|--|--------------------|
| 黄颡鱼♀×瓦氏黄颡鱼♂ <i>P. fulvidraco</i> ♀× <i>P. vachelli</i> ♂ | — | — | — | 孵化率、受精率高, 杂交苗出现5%左右畸形苗 | [41] |
| | — | — | — | 生长速率快, 具有母性效应 | [28] |
| | — | — | — | 体色形似黄颡鱼, 生长速率高于亲本 | [42] |
| | — | — | — | 杂交子代生长性能显著优于黄颡鱼, 两性生长异形现象被显著减弱, 雌性完全不育, 雄性精巢中精子量少, 有效活力低下 | [43] |
| | — | — | — | 低氧胁迫诱导了杂交子代的氧传感蛋白相关基因的上调, 以及提高机体的抗氧化能力来应对复氧带来的氧化应激损伤 | [44] |
| | — | — | — | 杂交子代在生长、抗病抗菌力、营养成分等方面表现出杂种优势 | [45] |
| | — | — | — | 杂交子代最适生长温度为28.95 °C, 最适放养密度为1.927 kg/m ³ , 较双亲具有明显的生长优势、优质的营养价值、更高的遗传多样性以及更强的抗病能力 | [46-47] |
| | — | — | — | 杂交子代在刺长、尾柄长、眼径等特征具有显著差异, 其主要形态特征更偏向于母本 | [48] |
| | — | — | — | 杂交子代的耐低氧能力, 平均体重、存活率显著高于母本, 饲料系数低于母本 | [49] |
| 瓦氏黄颡鱼♀×黄颡鱼♂ <i>P. vachelli</i> ♀× <i>P. fulvidraco</i> ♂ | 86.5 | 70.6 | 60.7 | 杂交组合表现出较高的杂种优势, 生长速率快, 绝对增重率为0.153 g/d, 出现明显的母性效应 | [50] |
| | 79 | 53 | 6.9 | 杂交后代出现明显的母性效益, 受精率低, 生长速率慢, 仅为0.114 g/d, 不适于生产 | [51] |

通过选择育种(经连续三代选育的黄颡鱼母本与连续两代选育的瓦氏黄颡鱼父本)与杂交育种结合, 培育出新品种杂交黄颡鱼“黄优1号”(GS-02-001-2018), 其具有生长速率快^[52]、抗逆能力强^[44]、抗病能力强^[45]、遗传多样性高^[46-47]、成活率高^[58]和增产效果明显^[59]等特点, 深受广大养殖户和消费者的欢迎, 是非常适合在全国范围内推广养殖的黄颡鱼新品种。

2.3 细胞工程育种

细胞工程技术主要包括细胞培养、核酸诱导技术、细胞核移植技术、细胞融合等, 该技术可以冲破生物的种间生殖隔离, 改变传统的育种方式, 在遗传育种、培育新品种等方面具有广阔的应用前景, 主要方式有多倍体诱导、人工雌核发育、人工雄核发育等^[60]。目前主要用于鲮科鱼类的细胞工程育种的技术是多倍体育种和雌核发育。

多倍体育种 鱼类多倍体育种是通过增加其染色体组的方法来改造生物的遗传基础^[61]。染色体加倍是通过保留卵子第二极体即抑制卵子的

第二次成熟分裂或抑制受精卵的第一次卵裂来实现的, 如果在减数分裂过程中处理卵母细胞, 阻止减数分裂过程中第一极体或第二极体放出, 阻止卵细胞的染色体减半, 从而产生 2n 的卵细胞, 2n 的卵细胞与正常减数分裂产生的精子 (1n) 结合, 产生 3n 的受精卵, 即得到发育成三倍体的个体。如果在合子进行第一次有丝分裂时实施刺激, 阻止第一次有丝分裂, 结果可形成四倍体^[62]。多倍体育种是现代鱼类育种的重要方法之一^[63]。鱼类多倍体的诱导方法主要有 3 种: 物理学方法(热休克、冷休克、静水压等)、化学方法(秋水仙素等)、生物学方法(远缘杂交、核移植、细胞融合等)^[64]。由于三倍体鱼潜在的不育性, 而四倍体和二倍体杂交又可得到大量的三倍体, 运用染色体操作技术进行鲮科鱼类的多倍体诱导是一种有效的手段^[65]。

目前, 在鲮科鱼类中多倍体育种研究还在尝试阶段, 因此研究报道主要集中在黄颡鱼属鱼类(表 3)。

从表 3 可以看出, 冷休克法、热休克法、静

表3 鳢科鱼类多倍体育种技术现状

Tab. 3 The research progress of polyploidy breeding of Bagridae family

| 鱼类种类 species | 倍性组成 ploidy | 诱导方法 inducing method | 剂量或温度 dose or temperature | 处理时间 treatment time | 持续时间 duration time | 结果 result | 参考文献 references |
|--------------------------|----------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------------|
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 药物处理 | 450 μmol/L 6-DMAP | 受精后10 min | 15 min | 孵化率为0, 不适于生产 | [66] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 冷休克 | 5 °C | 受精后2 min | 20 min | 胚胎时期三倍体诱导率达70%, 幼鱼时期三倍体(含嵌合体)的检出率为25%, 鱼苗畸形率和死亡率高 | [67-70] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 热休克 | 40 °C | 受精后2 min | 2 min | 胚胎时期的三倍体诱导率高达60%, 幼鱼时期三倍体(含嵌合体)的检出率为40%~50% | |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 冷休克 | 4 °C | 受精后3 min | 10 min | 胚胎三倍化率和相对出苗率分别为58%和53% | [71] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 热休克 | 40.5 °C | 受精后2 min | 2 min | 胚胎三倍化率和相对出苗率分别为59%和36% | |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 静水压休克 | 550 kg/cm ² 压力 | 受精后3 min | 3 min | 胚胎三倍化率和相对出苗率分别为55%和54% | |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 四倍体 | 热休克 | (40.4 ± 0.2) °C | 受精后45 min和 54 min左右 | 1.5~1.8 min | 原肠期胚胎四倍化率为10.61%~62.16%, 出膜期胚胎四倍化率为11.11%~75%, 相对出苗率为9.77%~36.05% | |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 热休克 | 40 °C | 受精后8 min | 2 min | 三倍体诱导率为93.3%, 孵化率为78.6% | [72] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 冷休克 | 4 °C | 受精后3 min | 15 min | 三倍体诱导率为63.3%, 孵化率为82.3% | |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 三倍体 | 药物处理 | 6-DMAP、CB | — | — | 三倍体畸形率高、孵化率低、倍化率低, 不适于生产 | |

水压休克法和药物处理法均能诱导鱼类受精卵形成三倍体胚胎, 其中冷休克法与热休克法为诱导鱼类三倍体的常用方法, 这与李永仁等^[72]的研究结果相似。目前, 我国已在草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、鲤 (*Cyprinus carpio*)、鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鲫 (*Carassius auratus*)、鳙 (*H. nobilis*)、莫桑比克罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*)、大黄鱼 (*Larimichthys crocea*)、真鲷 (*Pagrus major*)、斑马鱼 (*Danio rerio*)、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*)、褐牙鲷 (*Paralichthys olivaceus*) 等二十多种鱼类中成功培育出三倍体或四倍体的试验鱼^[62], 有多种三倍体鱼类已投入生产阶段, 如湘云鲫、湘云鲤等。但我国鳢科鱼类多倍体诱导还存在着一些问题, 如化学诱导虽然效果好, 但成本高且具有毒性, 对鱼类及养殖水体产生影响; 物理诱导操作简单、成本低廉, 但诱导效果不好; 生物方法所需要的四倍体培育和细胞融合技术仍是一个难题。因此, 寻找一种高效、无毒、安全且低成本的多倍体育种方法是今后鳢科鱼类育种的重要研究方向。

人工雌核发育 人工雌核发育是根据天然雌核发育的原理进行的。天然雌核发育的精子入卵后不能在卵质中自然核化, 人工雌核发育则必

须在精子入卵之前人为地进行遗传物质的失活处理。其次, 天然雌核发育的卵子其自身具有不进行第二次成熟分裂, 不排出第二极体的特性, 人工雌核发育则必须阻止第二次成熟分裂和第二极体排出^[73]。利用雌核发育技术, 可以快速建立纯系和培育新品种, 因此, 雌核发育技术在鱼类养殖业中也占有重要的地位^[74]。潘正军等^[75]通过调整紫外线照射精子的时间与距离, 筛选出了适合乌苏里拟鳢人工诱导雌核发育的最适条件。目前人工雌核发育已在银鲫 (*C. gibelio*)^[76-78]、虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)^[79]、褐牙鲷^[80]、大黄鱼^[81]、鲤^[82]、鲢^[83]、草鱼^[84]、尼罗罗非鱼 (*O. niloticus*)^[85]、团头鲂^[86]、稀有鮡鲫 (*Gobiocypris rarus*)^[87]、真鲷^[88] 等鱼中得以应用。其中真鲷和牙鲷等已获得了雌核发育品系并已应用于生产^[89]。由于其见效快、容易操作, 相对安全且不会污染环境, 已成为现代遗传育种和遗传改良的重要组成部分和今后鳢科鱼类育种的重点方向。

2.4 分子标记辅助育种

分子标记辅助育种是基因组学与分子生物学应用到水产养殖品种选育上的技术, 是借助与养殖品种性状紧密相关的分子标记, 对具有性状优势的等位基因或基因型的个体进行直接选择育种

的育种方法^[90]。目前分子标记辅助育种也越来越多地应用于鱼类的育种上, 常用的分子标记技术主要包括相关序列扩增多态性 (sequence-related amplified polymorphism, SRAP)^[91]、随机扩增多态性 DNA (random amplified polymorphic DNA, RAPD)^[92]、扩增片段长度多态性 (amplified fragment length polymorphism, AFLP)^[93]、微卫星 DNA (simple sequence repeat, SSR)^[94-95]、全基因组测序方法^[96] 以及近年来发展的单核苷酸多态性标记 (single nucleotide polymorphism, SNP)^[97] 等。近年

来 DNA 标记的研究与应用发展十分迅速, 通过开展一些重要经济性状如生长抗病和抗逆等分子标记的开发, 寻找与重要经济性状相关的分子标记, 最终为培育新品种奠定基础^[98]。借助目标基因的分子遗传标记进行基因型分析, 从而提高了选择效率减少了盲目性, 加速了育种进程^[99]。标记辅助选择还受环境因素的影响, 没有性别年龄的限制, 可以进行早期选育, 缩短时代间隔, 大大提高选种效率和精度^[100]。

近年来, 鲮科鱼类分子标记的研究与应用发

表 4 鲮科鱼类分子标记育种现状

Tab. 4 The research progress of molecular marker breeding of Bagridae family

| 种类 species | 技术 method | 性状 characteristics | 研究内容 research content | 结果 result | 参考文献 references |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------|---|---|--------------------|
| 乌苏里拟鲮 <i>P. ussuriensis</i> | SRAP | 性别 | 对乌苏里拟鲮雌雄基因组DNA的多态性进行了检测, 并筛选与其性别相关的分子标记 | 从不同引物组合中筛选出12对条带清晰、重复性强、多态性好的引物组合 | [101] |
| 乌苏里拟鲮 <i>P. ussuriensis</i> | 2b-RAD | 性别 | 对5只雌性和5只雄性的乌苏里拟鲮进行了限制性内切位点相关的DNA测序, 以鉴定性别特异性序列 | 筛选到3个雄性特异性标记和7个雄性特异性序列 | [102-105] |
| 乌苏里拟鲮 <i>P. ussuriensis</i> | PCR、测序 | 性别 | 分别对95例雌、90例雄个体进行检测 | 分离到一个雄性相关标记PuGT54 | |
| 乌苏里拟鲮 <i>P. ussuriensis</i> | 2b-RAD | 生长 | 利用2b-RAD技术构建了一个高分辨率的乌苏里拟鲮遗传连锁图谱 | 鉴定出一组与生长、体重、头长和体宽相关的QTL | |
| 乌苏里拟鲮 <i>P. ussuriensis</i> | PCR | 性别 | 乌苏里拟鲮微卫星富集文库中性别特异性微卫星位点筛选 | 筛选出1个乌苏里拟鲮性别特异性微卫星位点 | |
| 瓦氏黄颡鱼 <i>P. vachelli</i> | SNP | 生长、性别、抗逆 | 瓦氏黄颡鱼高密度遗传连锁图谱的构建, 在此基础上对其相关性状基因进行QTL定位 | 共定位到12个生长性状相关QTLs、1个性别相关QTLs、1个耐低氧相关QTLs | [106] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | PCR-SSCP | 生长 | 对黄颡鱼MSTN基因进行单核苷酸多态性检测和分型, 并与其生长形状进行关联分析 | AA基因型是影响雌性黄颡鱼生长性状的有利基因型, DD基因型是影响雌性黄颡鱼生长性状的不利基因型 | [107] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | SSR、SRAP、生长TRAP | 生长 | 构建了黄颡鱼的遗传连锁图谱, 并用该连锁图谱对黄颡鱼的5个生长相关性状进行QTL定位 | 获得的3个QTL均可用于黄颡鱼的生长性状的标记辅助育种 | [108-109] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | AFLP | 性别 | 利用20个AFLP引物组合分析黄颡鱼雌雄个体的遗传差异 | 在4个AFLP引物组合中共发现了6个位点在雌雄个体间表现出明显的扩增差异, 其中4个位点显性条带个体为雌性的比例为66.7%~80.0%, 2个位点显性条带个体为雄性的比例为100% | [110] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | AFLP | 性别 | 建立了染色体基因型PCR鉴定方法, 在黄颡鱼性别鉴定和全雄黄颡鱼苗种的持续规模化生产中起到了重要的作用 | 筛选出能够产生X或Y染色体的特异性AFLP片段各2个, 并将其转化为SCAR标记测序 | [111] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | AFLP | 性别 | 采用256对AFLP引物对其雌核发育个体XX、XY、YY进行基因池扫描 | 筛选出X连锁标记4个, Y连锁标记2个, 并建立了其XX、XY、YY3种遗传性别鉴定技术 | [112] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 转录组测序 | 性别 | 通过对XX卵巢、XY精巢和YY精巢差异表达基因的比较转录组分析, 获得了覆盖范围更广的性别决定和分化相关基因 | 1、筛选出至少21个性别决定和分化相关基因。并且在黄颡鱼的XX雌性卵巢、XY雄性精巢和YY雄性精巢中有部分表达特征。2、从转录组数据中共鉴定出82 794个SSRs、26 450个SNPs和4 145个序列 | [94] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 基因克隆 | 性别 | 对Y染色体连锁标记Pf62-Y和X染色体连锁标记Pf62-X进行了染色体步移和测序, 并分析了核苷酸差异和遗传分化 | 开发了3对新的遗传标记(Y1、X1和XY1), 能够有效地识别人工繁育群体中的YY超雄鱼、XY雄鱼和XX雌鱼, 并能有效地区分不同野生群体中的XY雄鱼和XX雌鱼 | [113-114] |

· 续表 4 ·

| 种类 species | 技术 method | 性状 characteristics | 研究内容 research content | 结果 result | 参考文献 references |
|----------------------------|--------------|-----------------------|---|---|--------------------|
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | FISH | 性别 | 利用 FISH 技术将 Pf62-Y 片段探针定位于单一染色体上验证黄颡鱼性别决定类型 | 通过黄颡鱼 Pf62-Y 性别标记的染色体定位, 观察到黄颡鱼 Y 染色体的存在 | |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | SNP | 性别 | 使用 Illumina 平台对雄性黄颡鱼 (XY) 和超雄黄颡鱼 (YY) 精巢进行高通量测序 | 测序并组装得到 78 148 个 Unigenes, 1 146 个 Unigenes 在 YY 精巢中高表达, 1 235 个 Unigenes 在 XY 精巢中高表达。 | [115] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | SNP | 生长 | 利用筛选得到的 8 个 SNP 位点与黄颡鱼体重进行相关性分析 | 3 个位点与体重具有显著相关性的基因型, 分别是 IJ、NN 和 OP | [116] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | SNP | 抗病 | 对鲍爱德华氏菌 (<i>Edwardsiella ictaluri</i>) 感染黄颡鱼的 <i>CypA</i> 基因进行测序 | 发现 6 个 (SNPs), 揭示了 <i>CypA</i> 在宿主对细菌感染的防御中可能发挥的作用 | [117] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | SRAP | 性别 | 建立了可广泛应用于黄颡鱼遗传学研究的 SRAP-PCR 扩增反应体系 | 发现与雌雄性别特异性相关的 SRAP 标记 1 个 | [118-119] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | 测序 | 性别 | 通过高通量测序方法筛选黄颡鱼性别决定相关基因 | 筛选出与黄颡鱼性别决定和分化相关的基因和 microRNA | [120] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | PCR | 性别 | 黄颡鱼转录组数据的分析 | 筛选到 13 个性别相关基因 | [121] |
| 黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i> | SNP | 性别 | 利用基因分型测序 (GBS) 策略构建了黄颡鱼的高密度连锁图谱。利用 184 个 F1 后代, 将 5 705 个单核苷酸多态性 (SNP) 标记定位到 26 个不同连锁群上 | 鉴定出 11 个显著性相关 QTL。在这些 QTL 中鉴定出 6 个性别相关基因, 包括 <i>amh</i> 、 <i>gnrhr</i> 、 <i>vasa</i> 、 <i>lnnr1</i> 、 <i>foxl2</i> 和 <i>bmp15</i> | [122] |
| 长吻鲮 <i>L. longirostris</i> | 2b-RAD | 性别 | 通过 2b-RAD 测序和 PCR 扩增, 基于同源 X 特异性和 Y 特异性序列开发了分子标记 | 开发了 Y 特异性和 XY 共享引物, 并在不同家系中进行了验证, 进一步确定长吻鲮为 XY 性别决定型 | [123] |
| 长吻鲮 <i>L. longirostris</i> | GWAS | 性别 | 对雌雄长吻鲮进行重测序, 通过 GWAS 分析确定了长吻鲮的性别决定区域 | 分离并验证了位于长吻鲮 7 号染色体上的 3 个雄性特异性标记 | [124] |

展十分迅速, 利用该技术进行数量性状基因位点的鉴别和定位已成为热点 (表 4)。

从表 4 可以看出, 目前我国鲮科鱼类分子标记辅助育种研究主要集中在乌苏里拟鲮和黄颡鱼的性别、生长相关分子标记方面, 而关于其抗病 (车轮虫病、气泡病、爆头病等)、抗逆 (低氧、温度等) 等相关分子标记的开发较少。今后, 有必要开展鲮科其他经济鱼类重要经济性状相关的分子标记, 可以有效地厘清鲮科鱼类的遗传背景, 了解该科鱼类的遗传多样性和遗传结构, 为培育鲮科鱼类新品种提供基础资料。

通过运用细胞工程育种技术与分子标记辅助育种技术结合, 水利部中国科学院水工程生态研究所联合多家单位培育出了新品种黄颡鱼“全雄 1 号”(GS-04-001-2010), 有研究利用激素性逆转技术结合人工雌核发育技术和测交验证技术实现了全雄黄颡鱼的规模化生产^[125-126]。其中, 激素性逆转后的伪雌鱼 XY 通过人工雌核发育技术产生 YY 超雄黄颡鱼是培育过程中的重要环节。桂建芳等^[111]筛选到黄颡鱼 X 和 Y 染色体特异分子标记, 建立了黄颡鱼遗传性别鉴定方法, 并将本方法应用到全雄黄颡鱼培育过程中的遗传性别鉴定。

全雄黄颡鱼具有雄性率高 (雄性率 98% 以上)、生长速率快、养殖产量高等优点^[127], 适合在全国淡水水域养殖。通过对亲本进行进一步优化, 即以连续群体选育和 2 代性别诱导控制所获得的黄颡鱼生理雄鱼 (XX') 与雌鱼人工繁殖获得的全雌黄颡鱼为母本; 以连续群体选育和 2 代性别诱导控制所获得的黄颡鱼超雄鱼 (YY) 与生理雌鱼 (YY') 人工繁殖获得的超雄黄颡鱼为父本, 华中农业大学及多家单位联合培育出黄颡鱼水产新品种黄颡鱼“全雄 2 号”(GS-04-001-2023)。

2.5 基因工程育种

转基因是借助基因工程技术将确定的外源基因通过培养细胞或生殖细胞导入动物染色体上的一种高度综合的分子生物学技术, 具体方法主要有 DNA 显微注射法、电脉冲法、精子载体法、逆转录病毒感染法、体细胞核移植法、磷酸钙共沉淀法和脂质体融合法等, 其中以 DNA 显微注射法应用最为广泛^[128]。通过转基因技术改善鱼类经济性状, 得到可培育的鱼类新品种, 以提高其生长速率和饲料转化率、改善品质和增强抗性等, 也可通过转基因改变观赏鱼的表型提高其观赏价值

等^[129]。近年来生物技术的发展加速了转基因育种的研究,使育种业呈现了崭新的面貌^[130]。梁明山等^[131]运用显微注射法将胡子鲶 (*Clarias fuscus*) 总 DNA 导入长吻鲩受精卵中,发现在转化长吻鲩体重、抗病力、耐低氧能力方面有显著提高,转化长吻鲩获得了供体的优良遗传性状。陆建平等^[132]运用显微注射法最早获得了转基因黄颡鱼。葛家春等^[133]克隆了黄颡鱼生长激素基因,成功地建立了黄颡鱼基因组改造的技术平台。目前,国内学者运用转基因技术对鳢科鱼类开展育种研究尚处于初级阶段,对于食用转基因鳢科鱼类的安全性也有待研究,因此,转基因鳢科鱼类应用于生产实践还有很长的路要走。相对于转基因育种,基因编辑育种更加精准和灵活,能够对目标基因进行定点“编辑”,实现对特定 DNA 片段的敲除、敲入等操作。基因编辑技术在水产领域中起步较晚,主要集中在斑马鱼、青鳉 (*Oryzias latipes*) 等模式生物^[134]。在鳢科鱼类中,基因编辑在黄颡鱼中已有报道。中国水产科学院珠江水产研究所 Zhang 等^[135]采用基因编辑技术,通过敲除黄颡鱼 *mstna* 基因,发现黄颡鱼突变体展现出了体重增加及肌肉纤维过度增殖等特点。这是基因编辑技术首次在鳢科鱼类中的成功应用,标志着鳢科鱼类基因编辑时代的开启。随着基因编辑技术的日趋成熟,未来基因编辑技术必将成为鳢科鱼类遗传育种主要技术之一。

3 展望

近年来,由于广大养殖户和消费者对黄颡鱼、瓦氏黄颡鱼、长吻鲩和乌苏里拟鳢等鳢科鱼类的认可,使其在市场上占据了有利位置,全国各地掀起了其养殖热潮。养殖品种主要有黄颡鱼、瓦氏黄颡鱼、长吻鲩、乌苏里拟鳢以及 4 个新品种(杂交黄颡鱼“黄优 1 号”、黄颡鱼“全雄 1 号”和“全雄 2 号”、长吻鲩“川丰 1 号”)等。现结合国内鳢科鱼类遗传育种的研究现状,提出以下展望。

3.1 鳢科鱼类种质资源的精准鉴定与种质资源基因库的建立

在养殖户管理过程中,会因为养殖管理的疏漏导致优良的鳢科鱼类品种流入到自然界,这可能会对鳢科鱼类的种质资源造成潜在的影响,因此,鳢科鱼类种质资源的精准鉴定并建立种质资源基因库刻不容缓。此举措为保护鳢科鱼类的遗

<https://www.china-fishery.cn>

传多样性提供理论依据,有利于开展鳢科鱼类资源的可持续利用,最终实现鳢科鱼类种业的可持续发展。

3.2 建立鳢科鱼类良种繁育体系并加强优势品种的遗传机制研究

鳢科鱼类中的一些经济品种(如大鳍鲩等)对环境条件的要求较高,在繁养过程中存在受精率、孵化率和鱼苗成活率不高等一系列问题,所以需要建立鳢科鱼类良种繁育体系来满足市场的需求。目前,鳢科鱼类杂交育种的研究主要集中在生长等方面,而关于鳢科鱼类远缘杂交的遗传规律和杂种优势形成机理的研究较少,应全面了解其杂种优势的分子机理。

3.3 创制鳢科鱼类新种质和培育鳢科鱼类新品种

虽然我国目前已培育出 4 个鳢科鱼类新品种(杂交黄颡鱼“黄优 1 号”、黄颡鱼“全雄 1 号”、“全雄 2 号”和长吻鲩“川丰 1 号”),但新品种的开发一直是水产养殖产业发展的重要推力;在我国鳢科鱼类新品种未来的鱼类育种工作中,由于鳢科鱼类大多具有性别二态性(雄性大于雌性)的特点,可以选择单性育种、基因编辑育种、分子标记辅助育种等技术对其进行改良,或者结合远缘杂交和生殖干细胞移植技术创制鳢科鱼类新种质和培育鳢科鱼类新品种,这将对鳢科鱼类种业的高质量发展具有重要意义。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 游伟伟,骆轩,柯才焕. 鮰的遗传育种研究进展[J]. 厦
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- 门大学学报(自然科学版), 2021, 60(2): 417-424.
- You W W, Luo X, Ke C H. Progress in genetics and breeding of abalone[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(2): 417-424 (in Chinese).
- [4] 朱华平, 卢迈新, 黄樟翰, 等. 鱼类遗传改良研究综述[J]. 中国水产科学, 2010, 17(1): 168-181.
- Zhu H P, Lu M X, Huang Z H, *et al.* Genetic improvement in fish: a review[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(1): 168-181 (in Chinese).
- [5] 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 in genetic breeding of *Pelteobagrus* genus[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2015, 42(3): 123-128 (in Chinese).
- [6] 曾庆. 鲴形目鲮科鱼类系统发育关系研究及其分化时间估算[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- Zeng Q. Molecular phylogeny and divergence time estimation of the bagrid catfishes (Actinopterygii: Siluriformes)[D]. Chongqing: Southwest University, 2013 (in Chinese).
- [7] 赵文学, 杨星, 彭智, 等. 黄颡鱼属物种的 RAPD 分子鉴定及杂种遗传分析[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 101-106.
- Zhao W X, Yang X, Peng Z, *et al.* Molecular identification of the four species of the genus *pelteobagrus* and the genetic analysis of their hybrid[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 101-106 (in Chinese).
- [8] 王令玲, 仇潜如, 邹世平, 等. 黄颡鱼生物学特点及其繁殖和饲养[J]. 淡水渔业, 1989(6): 23-24,31.
- Wang L L, Qiu Q R, Zou S P, *et al.* Biological characteristics and breeding of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Freshwater Fisheries, 1989(6): 23-24,31 (in Chinese).
- [9] 丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- Ding R H. The fishes of sichuan[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994 (in Chinese).
- [10] 胡玉婷, 段国庆, 凌俊, 等. 长江、淮河水系安徽区段黄颡鱼的群体遗传结构研究[J]. 水产科学, 2020, 39(6): 804-812.
- Hu Y T, Duan G Q, Ling J, *et al.* Population genetic structure of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* from the Yangtze River and Huaihe River basins in Anhui Province[J]. Fisheries Science, 2020, 39(6): 804-812 (in Chinese).
- [11] 孟钰, 张翔, 夏军, 等. 水文变异下淮河长吻鮠生境变化与适宜流量组合推荐[J]. 水利学报, 2016, 47(5): 626-634.
- Meng Y, Zhang X, Xia J, *et al.* Definition of environmental flow components for *Leiocassis longirostris* in the Huai River considering habitat change and hydrological change[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(5): 626-634 (in Chinese).
- [12] 魏梦雅, 王思梦, 宁静, 等. 乌苏里拟鲮 igf 基因克隆及其与生长性状关联分析[J]. 水产科学, 2022, 41(5): 738-748.
- Wei M Y, Wang S M, Ning J, *et al.* Cloning and association analysis with growth traits of igf gene in Ussuri catfish *Pseudobagrus ussuriensis*[J]. Fisheries Science, 2022, 41(5): 738-748 (in Chinese).
- [13] Gjedrem T, Robinson N, Rye M. The importance of selective breeding in aquaculture to meet future demands for animal protein: a review[J]. *Aquaculture*, 2012, 350-353: 117-129.
- [14] 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.
- [15] 刘朋朋, 陈校辉, 钟立强, 等. 黄颡鱼不同家系生长性状的比较[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2013, 36(1): 90-93.
- Liu P P, Chen X H, Zhong L Q, *et al.* Comparison of growth performance of different families of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2013, 36(1): 90-93 (in Chinese).
- [16] 秦钦, 王明华, 陈校辉, 等. 不同黄颡鱼家系组注射嗜水气单胞菌后免疫相关指标的比较研究[J]. 淡水渔业, 2017, 47(5): 40-46.
- Qin Q, Wang M H, Chen X H, *et al.* A comparative study of immune parameters on different family groups of *Pelteobagrus fulvidraco* by injecting *Aeromonas hydrophila*[J]. Freshwater Fisheries, 2017, 47(5): 40-46 (in Chinese).
- [17] 秦钦, 陈校辉, 蒋广震, 等. 5 个黄颡鱼家系组幼鱼生长、体组成和消化酶活力的比较[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(2): 768-773.
- Qin Q, Chen X H, Jiang G Z, *et al.* Comparison of

- growth, body composition and digestive enzyme activities on five families of yellow catfish[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2018, 37(2): 768-773 (in Chinese).
- [18] 秦钦, 陈校辉, 陈炳耀, 等. 黄颡鱼不同湖泊群体及其子代的生长性能评估 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(24): 197-200.
- Qin Q, Chen X H, Chen B Y, *et al.* Evaluation of growth performance of different geographic populations and their hybrid offsprings of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(24): 197-200 (in Chinese).
- [19] 秦钦, 陈校辉, 潘建林, 等. 日粮蛋白含量及家系对黄颡鱼幼鱼生长性能和肝脏 IGF-I mRNA 表达水平的影响 [J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(2): 190-195.
- Qin Q, Chen X H, Pan J L, *et al.* Effects of families and feed protein contents on growth performance and hepatic expression of IGF-I mRNA of juvenile yellow catfish[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(2): 190-195 (in Chinese).
- [20] 梅洁, 张晋, 马文阁, 等. 一种黄颡鱼微卫星家系鉴定方法: 中国, 104357553B[P]. 2015-02-18.
- Mei J, Zhang J, Ma W G, *et al.* A method for identifying microsatellite-based family lines of yellow catfish: China, 104357553B[P]. 2015-02-18 (in Chinese).
- [21] 陈秀丽, 唐志发, 唐志学, 等. 选育纯系黄颡鱼全雌鱼及超雄鱼大规模生产全雄鱼的方法: 中国, 106489799B[P]. 2017-03-15.
- Chen X L, Tang Z F, Tang Z X, *et al.* A method for breeding pure line all-female yellow catfish and supermale fish for large-scale production of all-male fish: China, 106489799B[P]. 2017-03-15 (in Chinese).
- [22] Gharib S. Cross-breeding experiments on some important fishes of family Cichlidae (genus *Oreochromis*) and evaluation of their hybrids[J]. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 1998, 2(3): 43-61.
- [23] Rahman M A, Bhadra A, Begum N, *et al.* Production of hybrid vigor through cross breeding between *Clarias batrachus* Lin. and *Clarias gariepinus* Bur.[J]. *Aquaculture*, 1995, 138(1-4): 125-130.
- [24] 张佳佳. 杂交黄颡鱼“黄优 1 号”杂种优势的初步研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- Zhang J J. Preliminary study on the heterosis of hybrid yellow catfish “Huangyou-1”[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019 (in Chinese).
- [25] 邱丛芳, 王彬, 余祥胜. 黄颡鱼♀×乌苏里拟鲮苗种繁殖养殖试验 [J]. *科技信息*, 2009(4): 314.
- Qiu C F, Wang B, Yu X S. Experiment on seedling reproduction of *Pelteobagrus fulvidraco*×*Pseudobagrus ussuriensis*[J]. *Science & Technology Information*, 2009(4): 314 (in Chinese).
- [26] 董少杰, 孙洁, 毕相东, 等. 黄颡鱼、乌苏里拟鲮杂交子代胚胎发育和胚后 30D 的体长变化 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(5): 313-315.
- Dong S J, Sun J, Bi X D, *et al.* Embryonic development and body length change within 30D of the hybrid of *Pelteobagrus fulvidraco* × *Pseudobagrus ussuriensis*[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(5): 313-315 (in Chinese).
- [27] 史文竞, 陈弈帆, 朱传坤, 等. 乌苏里拟鲮与黄颡鱼杂交效果的研究 [J]. *水产研究*, 2016, 3(4): 63-70.
- Shi W J, Chen Y F, Zhu C K, *et al.* Study on the heterosis between *Pseudobagrus ussuriensis* and *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Open Journal of Fisheries Research*, 2016, 3(4): 63-70 (in Chinese).
- [28] 李镨, 韩林强, 艾丽, 等. 两种杂交黄颡鱼的生长与形态差异分析 [J]. *水产养殖*, 2016, 37(10): 29-35.
- Li R, Han L Q, Ai L, *et al.* Comparison of growth and morphology between two kinds of hybrid yellow catfish[J]. *Journal of Aquaculture*, 2016, 37(10): 29-35 (in Chinese).
- [29] 王明华, 蔡永祥, 陈校辉, 等. 乌苏里拟鲮、瓦氏黄颡鱼杂交与自交子代生长性能比较 [J]. *水产科学*, 2013, 32(1): 50-54.
- Wang M H, Cai Y X, Chen X H, *et al.* Growth comparison of offsprings in ussuri bullhead *Pseudobagrus ussuriensis* and darkbarble catfish *Pelteobagrus vachelli* and their reciprocal hybrids[J]. *Fisheries Science*, 2013, 32(1): 50-54 (in Chinese).
- [30] 蔡永祥, 陈友明, 陈校辉, 等. 江黄颡 (*Pelteobagrus vachelli*) 和乌苏里拟鲮 (*Pseudobagrus ussuriensis*) 杂交 F₁ 代形态差异 [J]. *湖泊科学*, 2011, 23(2): 264-270.
- Cai Y X, Chen Y M, Chen X H, *et al.* Morphometric differences of the hybrid F₁ of *Pelteobagrus vachelli* × *Pseudobagrus ussuriensis*[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(2): 264-270 (in Chinese).
- [31] 陈友明, 陈校辉, 潘莹, 等. 江黄颡 (♀) 和乌苏里拟鲮 (♂) 及其杂交子代遗传变异的 RAPD 分析 [J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(1): 12-18.

- Chen Y M, Chen X H, Pan Y, *et al.* RAPD analysis of genetic variation between *Pelteobagrus vachelli* (♀) and *Pseudobagrus ussuriensis* (♂) and their hybrids[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(1): 12-18 (in Chinese).
- [32] 秦钦, 梁丹妮, 王明华, 等. 杂交鲮(乌苏里拟鲮♀×瓦氏黄颡鱼♂) 胚胎发育的研究 [J]. 南京师大学报(自然科学版), 2012, 35(3): 81-86.
- Qin Q, Liang D N, Wang M H, *et al.* Studies on embryonic development of crossbreed F₁ by *Pseudobagrus ussuriensis* (♀) × *Pelteobagrus vachelli* (♂)[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2012, 35(3): 81-86 (in Chinese).
- [33] 王峰. 江黄颡鱼、黄颡鱼、粗唇鲩及其杂交 F₁ 代形态差异分析 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(2): 36-43.
- Wang F. Morphometric differences analysis of *Pelteobagrus vachelli*, *Pelteobagrus fulvidraco*, *Leioassis crassilabrus* and their hybrid F₁[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(2): 36-43 (in Chinese).
- [34] 王峰, 王武. 江黄颡鱼、黄颡鱼、粗唇鲩杂交繁育初报 [J]. 水产科技情报, 2004, 31(1): 10-11.
- Wang F, Wang W. Crossbreeding of *Pelteobagrus vachelli*, *Pelteobagrus fulvidraco* and *Leioassis crassilabrus*[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2004, 31(1): 10-11 (in Chinese).
- [35] 王峰. 江黄颡鱼、黄颡鱼、粗唇鲩杂交繁育及杂交 F₁ 生长比较的研究 [D]. 上海: 上海水产大学, 2004.
- Wang F. Study on hybrid and growth comparison of *Pseudobagrus fulvidraco*, *Pseudobagrus vachelli*, *Leiocassis crassilabris* and F₁ of their hybrids[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2004 (in Chinese).
- [36] 何尧平, 曾洁, 冯军, 等. 瓦氏黄颡鱼与长吻鲩杂交养殖试验 [J]. 水产养殖, 2008, 29(5): 33-34.
- He Y P, Zeng J, Feng J, *et al.* Culture experiment of cross breeding of *Pelteobagrus vachelli* and *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Journal of Aquaculture, 2008, 29(5): 33-34 (in Chinese).
- [37] 魏刚. 瓦氏黄颡鱼与长吻鲩杂交的初步研究 [J]. 淡水渔业, 1987(6): 14-17.
- Wei G. Preliminary study on hybridization of *Pelteobagrus vachelli* and *Leioassis crassilabrus*[J]. Freshwater Fisheries, 1987(6): 14-17 (in Chinese).
- [38] 王宏玉, 武兆文, 付东勇, 等. 黄颡鱼(♀)、长吻鲩(♂)及其杂交 F₁ 代遗传多样性分析 [J]. 水产科学, 2021, 40(2): 226-232.
- Wang H Y, Wu Z W, Fu D Y, *et al.* Genetic diversity of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* (♀), longsnout catfish *Leiocassis longirostris* (♂) and their hybrid F₁ generation[J]. Fisheries Science, 2021, 40(2): 226-232 (in Chinese).
- [39] Zhang G S, Liang X, Zhang J J, *et al.* The complete mitochondrial genome of the hybrid of *Leiocassis longirostris* (♂)×*Pelteobagrus fulvidraco* (♀)[J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2017, 2(2): 577-578.
- [40] Guo S S, Luo X Z, Liang H W. Mitochondrial DNA sequence of the hybrid of *Leiocassis longirostris* (♀) and *Pelteobagrus fulvidraco* (♂)[J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2016, 1(1): 166-167.
- [41] 王卫民, 严安生, 张志国, 等. 黄颡鱼♀与瓦氏黄颡鱼♂的杂交研究 [J]. 淡水渔业, 2002(3): 3-5.
- Wang W M, Yan A S, Zhang Z G, *et al.* Study on hybridization of *Pelteobagrus fulvidraco* and *Pelteobagrus vachelli*[J]. Freshwater Fisheries, 2002(3): 3-5 (in Chinese).
- [42] 王明宝, 陈强, 陈耀炳, 等. 黄颡鱼与瓦氏黄颡鱼杂交技术研究 [J]. 现代农业科技, 2012(24): 273, 278.
- Wang M B, Chen Q, Chen Y B, *et al.* Hybridization study of yellow cartfish and *Pelteobagrus vachelli*[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(24): 273, 278 (in Chinese).
- [43] 胡伟华, 丹成, 郭稳杰, 等. 黄颡鱼和杂交黄颡鱼“黄优 1 号”形态及性腺发育的比较 [J]. 水生生物学报, 2019, 43(6): 1231-1238.
- Hu W H, Dan C, Guo W J, *et al.* The morphology and gonad development of *Pelteobagrus fulvidraco* and its interspecific hybrid “Huangyou No. 1” with *Pelteobagrus vachelli*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(6): 1231-1238 (in Chinese).
- [44] 裴雪莹. 杂交黄颡鱼“黄优 1 号”应对低氧胁迫的生理响应及基因表达研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- Pei X Y. Physiological response and gene expression in response to hypoxia stress of hybrid yellow catfish “Huangyou No. 1”[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020 (in Chinese).
- [45] 张红燕. 杂交黄颡鱼“黄优 1 号”杂种优势的分子机制研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- Zhang H Y. Molecular mechanism of heterosis of hybrid yellow catfish “Huangyou No. 1”[D]. Nanjing:

- Nanjing Normal University, 2020 (in Chinese).
- [46] 张佳佳, 李杰, 张国松, 等. 杂交黄颡鱼(黄颡鱼♀×瓦氏黄颡鱼♂)及其双亲遗传多样性的微卫星分析[J]. 水产科学, 2018, 37(5): 612-621.
Zhang J J, Li J, Zhang G S, *et al.* Microsatellite-based analysis of genetic diversity of parent and hybrid of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* (♀)×*P. vachelli*(♂)[J]. Fisheries Science, 2018, 37(5): 612-621 (in Chinese).
- [47] 张佳佳, 张国松, 张宏叶, 等. 黄颡鱼(♀)×瓦氏黄颡鱼(♂)双亲及其杂交子代核型和营养成分分析[J]. 海洋渔业, 2017, 39(2): 149-161.
Zhang J J, Zhang G S, Zhang H Y, *et al.* Comparative analysis of the karyotype and nutritional ingredient for the hybrids of *Pelteobagrus fulvidraco*(♀)×*P. vachelli*(♂) and their parental fish[J]. Marine Fisheries, 2017, 39(2): 149-161 (in Chinese).
- [48] 周华兴, 段国庆, 胡玉婷, 等. 杂交黄颡鱼体色分化群体形态差异分析[J]. 水产科学, 2021, 40(5): 726-732.
Zhou H X, Duan G Q, Hu Y T, *et al.* Analysis of morphological differences between differential body colors groups of hybrid yellow catfish[J]. Fisheries Science, 2021, 40(5): 726-732 (in Chinese).
- [49] 孙俊霄, 韩广坤, 刘娅, 等. 杂交黄颡鱼与普通黄颡鱼幼鱼生长性能及耐低氧能力的比较[J]. 水生生物学报, 2019, 43(6): 1271-1279.
Sun J X, Han G K, Liu Y, *et al.* The growth characteristics and hypoxia tolerant ability of yellow catfish and hybrid catfish[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(6): 1271-1279 (in Chinese).
- [50] 徐峥, 张红英, 许爱国. 杂交黄颡鱼与全雄黄颡鱼夏花鱼种培育对比[J]. 科学养鱼, 2017(9): 12.
Xu Z, Zhang H Y, Xu A G. Comparison of juvenile hybrid yellow catfish and all-male yellow catfish[J]. Scientific Fish Farming, 2017(9): 12 (in Chinese).
- [51] Zhang G S, Li J, Zhang J J, *et al.* Integrated analysis of transcriptomic, miRNA and proteomic changes of a novel hybrid yellow catfish uncovers key roles for miRNAs in Heterosis[J]. Molecular & Cellular Proteomics, 2019, 18(7): 1437-1453.
- [52] 王宏玉, 裴雪莹, 王涛, 等. 杂交黄颡鱼黄优 1 号体质量和内脏指标的相关分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(2): 170-176.
Wang H Y, Pei X Y, Wang T, *et al.* Correlation analysis of body weight and visceral indices of hybrid yellow catfish “Huangyou No. 1”[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(2): 170-176 (in Chinese).
- [53] 刘炜, 周国勤, 陈树桥, 等. “黄优 1 号”杂交黄颡鱼规模化繁殖技术及提高繁殖效率的方法[J]. 科学养鱼, 2019(10): 6-8.
Liu W, Zhou G Q, Chen S Q, *et al.* Large-scale reproduction technology and methods to improve reproduction efficiency of hybrid yellow catfish “Huangyou No. 1”[J]. Scientific Fish Farming, 2019(10): 6-8 (in Chinese).
- [54] 宋立民, 张韦, 刘肖莲, 等. 杂交黄颡鱼新品种试养效果评估[J]. 农学学报, 2021, 11(12): 100-104.
Song L M, Zhang W, Liu X L, *et al.* Experimental rearing effects of a new breed of hybrid yellow catfish: an evaluation[J]. Journal of Agriculture, 2021, 11(12): 100-104 (in Chinese).
- [55] 邵韦涵, 樊启学, 张诚明, 等. 黄颡鱼、瓦氏黄颡鱼及“黄优 1 号”肌肉营养成分比较[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(2): 76-82.
Shao W H, Fan Q X, Zhang C M, *et al.* Comparative analysis of nutritive composition in muscle of “Huangyou No. 1”, yellow catfish and darkbarbel catfish[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(2): 76-82 (in Chinese).
- [56] 刘翠, 刘昊昆, 朱晓鸣, 等. 饲料中添加螺旋藻和叶黄素对杂交黄颡鱼生长、抗氧化能力和体色异常调控的比较研究[J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1024-1033.
Liu C, Liu H K, Zhu X M, *et al.* The effects of arthrospira platensis and lutein on the growth, antioxidant capacity and pigmentation in hybrid yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco* ♀ × *Pelteobagrus vachelli* ♂)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(5): 1024-1033 (in Chinese).
- [57] 李明波, 沈凡, 崔庆奎, 等. 壳寡糖对杂交黄颡鱼“黄优 1 号”(黄颡鱼♀×瓦氏黄颡鱼♂)生长性能与免疫机能的影响[J]. 水生生物学报, 2020, 44(4): 707-716.
Li M B, Shen F, Cui Q K, *et al.* Effects of dietary chitosan oligosaccharide on growth performance and immunity of hybrid yellow catfish “Huangyou No. 1” *Tachysurus fulvidraco*♀×*Tachysurus vachelli*♂[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(4): 707-716 (in Chinese).

- [58] 杂交黄颡鱼“黄优 1 号”[J]. 中国水产, 2020(7): 93-96.
Hybrid yellow catfish “Huangyou No. 1”[J]. China Fisheries, 2020(7): 93-96 (in Chinese).
- [59] 丁德明. 水产养殖新品种——“黄优 1 号”[J]. 湖南农业, 2020(11): 19.
Ding D M. New aquaculture species-“Huangyou No. 1” [J]. Hunan Agriculture, 2020(11): 19 (in Chinese).
- [60] Purdom C E. Genetic engineering by the manipulation of chromosomes[J]. *Aquaculture*, 1983, 33(1-4): 287-300.
- [61] Leggett R A, Iwama G K. Occurrence of polyploidy in the fishes[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2003, 13(3): 237-246.
- [62] Zhou L, Gui J F. Natural and artificial polyploids in aquaculture[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2017, 2(3): 103-111.
- [63] 邹杰, 马爱军, 王新安, 等. 鱼类育种技术研究进展 [J]. 渔业信息与战略, 2013, 28(3): 199-207.
Zou J, Ma A J, Wang X A, *et al.* Progress on techniques of fish breeding[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2013, 28(3): 199-207 (in Chinese).
- [64] Piferrer F, Beaumont A, Falguière J C, *et al.* Polyploid fish and shellfish: production, biology and applications to aquaculture for performance improvement and genetic containment[J]. *Aquaculture*, 2009, 293(3-4): 125-156.
- [65] 孙远东, 谭立军, 唐新科, 等. 鱼类人工多倍体育种的研究进展 [J]. 现代生物医学进展, 2008, 8(9): 1778-1779, 1788.
Sun Y D, Tan L J, Tang X K, *et al.* Research progress on fish artificially induced polyploidy[J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2008, 8(9): 1778-1779, 1788 (in Chinese).
- [66] 杨彩卿, 韩烁. 黄颡鱼三倍体的诱导 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(19): 8118-8119.
Yang C Q, Han S. Triploid induction in *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(19): 8118-8119 (in Chinese).
- [67] 宋立民, 袁立来, 刘肖莲, 等. 2 种鉴定黄颡鱼三倍体个体方法的比较 [J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(2): 207-209.
Song L M, Yuan L L, Liu X L, *et al.* Comparison of two identification methods on triploid individuals of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009, 28(2): 207-209 (in Chinese).
- [68] 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).
- [69] 宋立民, 杨毅, 王卫民, 等. 热休克诱导黄颡鱼三倍体的研究 [J]. 水产科学, 2010, 29(6): 352-355.
Song L M, Yang Y, Wang W M, *et al.* Induction of triploidy in yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* by heat shock[J]. *Fisheries Science*, 2010, 29(6): 352-355 (in Chinese).
- [70] 宋立民. 温度休克诱导黄颡鱼三倍体及其倍性鉴定研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
Song L M. Studies on the triploid induction using temperature shock and ploidy identification in yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009 (in Chinese).
- [71] 吴勤超. 人工诱导黄颡鱼多倍体技术研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
Wu Q C. Studies on the artificial induction of polyploidy in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010 (in Chinese).
- [72] 李永仁, 董少杰, 陈丽梅, 等. 黄颡鱼三倍体人工诱导方法的比较研究 [J]. 天津师范大学学报 (自然科学版), 2012, 32(2): 84-87.
Li Y R, Dong S J, Chen L M, *et al.* Comparative study on triploid inducement methods in *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(2): 84-87 (in Chinese).
- [73] Komen H, Thorgaard G H. Androgenesis, gynogenesis and the production of clones in fishes: a review[J]. *Aquaculture*, 2007, 269(1-4): 150-173.
- [74] Manan H, Noor Hidayati A B, Lyana N A, *et al.* A review of gynogenesis manipulation in aquatic animals[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2022, 7(1): 1-6.
- [75] 潘正军, 周凤建, 强晓刚, 等. 乌苏里拟鲿人工诱导雌核发育方法: 103404461A[P]. 2013-11-27.
Pan Z J, Zhou F J, Qiang X G, *et al.* A method for arti-

- ficially inducing gynogenesis in *Pseudobagrus ussuriensis*: 103404461A[P]. 2013-11-27 (in Chinese).
- [76] 唐文联. 异育银鲫的人工繁殖技术 [J]. 中国水产, 1989(4): 29.
Tang W L. Artificial breeding technique on allogynogenetic crucian[J]. China Fisheries, 1989(4): 29 (in Chinese).
- [77] Xu B H, Wang Y B, Li J R, *et al.* Effect of prebiotic xylooligosaccharides on growth performances and digestive enzyme activities of allogynogenetic crucian carp (*Carassius auratus Gibelio*)[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2009, 35(3): 351-357.
- [78] Liu B, Xu L, Ge X P, *et al.* Effects of mannan oligosaccharide on the physiological responses, HSP70 gene expression and disease resistance of allogynogenetic crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) under *Aeromonas hydrophila* infection[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, 34(6): 1395-1403.
- [79] Foisil L, Chourrout D. Chromosome doubling by pressure treatments for tetraploidy and mitotic gynogenesis in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum): reexamination and improvements[J]. *Aquaculture Research*, 1992, 23(5): 567-575.
- [80] Zhu X P, You F, Zhang P J, *et al.* Effects of cold shock on microtubule organization and cell cycle in gynogenetically activated eggs of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. *Marine Biotechnology*, 2006, 8(3): 312-318.
- [81] Li Y Y, Cai M Y, Wang Z Y, *et al.* Microsatellite-centromere mapping in large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) using gynogenetic diploid families[J]. *Marine Biotechnology*, 2008, 10(1): 83-90.
- [82] Komen J, Bongers A B J, Richter C J J, *et al.* Gynogenesis in common carp (*Cyprinus carpio* L.): II. The production of homozygous gynogenetic clones and F₁ hybrids[J]. *Aquaculture*, 1991, 92: 127-142.
- [83] Li Z, Liang H W, Luo X Z, *et al.* A consecutive self-proliferate silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) variety created through artificial meiotic gynogenesis[J]. *Aquaculture*, 2015, 437: 21-29.
- [84] Zhang H, Liu S J, Zhang C, *et al.* Induced gynogenesis in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) using irradiated sperm of allotetraploid hybrids[J]. *Marine Biotechnology*, 2011, 13(5): 1017-1026.
- [85] Tariq Ezaz M, Myers J M, Powell S F, *et al.* Sex ratios in the progeny of androgenetic and gynogenetic YY male Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L.[J]. *Aquaculture*, 2004, 232(1-4): 205-214.
- [86] Gong D B, Xu L H, Wu C, *et al.* Two types of gynogenetic blunt snout bream derived from different sperm[J]. *Aquaculture*, 2019, 511: 734250.
- [87] 贾方钧, 王剑伟, 吴清江. 异源精子诱导稀有鮠鲫的人工雌核发育 [J]. 水生生物学报, 2002, 26(3): 246-252.
Jia F J, Wang J W, Wu Q J. Gynogenetic rare minnow (*Gobiocypris rarus*) induced by heterogeneous sperms[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(3): 246-252 (in Chinese).
- [88] Kato K, Hayashi R, Yuasa D, *et al.* Production of cloned red sea bream, *Pagrus major*, by chromosome manipulation[J]. *Aquaculture*, 2002, 207(1-2): 19-27.
- [89] 徐康, 段巍, 肖军, 等. 鱼类遗传育种中生物学方法的应用及研究进展 [J]. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(12): 1272-1288.
Xu K, Duan W, Xiao J, *et al.* Development and application of biological technologies in fish genetic breeding[J]. *Science China Life Sciences*, 2014, 44(12): 1272-1288 (in Chinese).
- [90] Williams J G K, Kubelik A R, Livak K J, *et al.* DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers[J]. *Nucleic Acids Research*, 1990, 18(22): 6531-6535.
- [91] Ding W D, Cao Z M, Cao L P. Molecular analysis of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) by SRAP and SCAR molecular markers[J]. *Aquaculture International*, 2010, 18(4): 575-587.
- [92] Bártfai R, Egedi S, Yue G H, *et al.* Genetic analysis of two common carp broodstocks by RAPD and microsatellite markers[J]. *Aquaculture*, 2003, 219(1-4): 157-167.
- [93] Liu Y G, Chen S L, Li B F, *et al.* Analysis of genetic variation in selected stocks of hatchery flounder, *Paralichthys olivaceus*, using AFLP markers[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2005, 33(10): 993-1005.
- [94] 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[J]. *Marine Biotechnology*, 2015, 17(2): 190-

- 198.
- [95] Sundaray J K, Rasal K D, Chakrapani V, *et al.* Simple sequence repeats (SSRs) markers in fish genomic research and their acceleration via next-generation sequencing and computational approaches[J]. *Aquaculture International*, 2016, 24(4): 1089-1102.
- [96] Lien S, Gidskehaug L, Moen T, *et al.* A dense SNP-based linkage map for Atlantic salmon (*Salmo salar*) reveals extended chromosome homeologies and striking differences in sex-specific recombination patterns[J]. *BMC Genomics*, 2011, 12(1): 615.
- [97] Ciezarek A, Ford A G P, Etherington G J, *et al.* Whole genome resequencing data enables a targeted SNP panel for conservation and aquaculture of *Oreochromis cichlid* fishes[J]. *Aquaculture*, 2022, 548: 737637.
- [98] Tong J G, Sun X W. Genetic and genomic analyses for economically important traits and their applications in molecular breeding of cultured fish[J]. *Science China Life Sciences*, 2015, 58(2): 178-186.
- [99] Sun C F, Niu Y C, Ye X, *et al.* Construction of a high-density linkage map and mapping of sex determination and growth-related loci in the mandarin fish (*Siniperca chuatsi*)[J]. *BMC Genomics*, 2017, 18(1): 446.
- [100] Poopuang S, Hallerman E M. Toward detection of quantitative trait loci and marker - assisted selection in fish[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 1997, 5(3): 253-277.
- [101] 徐汗福. 乌苏里拟鲿 (*Pseudobagrus ussuriensis*) 不同群体间的遗传多样性比较研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- Xu H F. Studies on the genetic variation in different populations of *Pseudobagrus ussuriensis*[D]. Suzhou: Soochow University, 2011 (in Chinese).
- [102] Zhu C K, Liu H Y, Cheng L, *et al.* Identification of sex-specific sequences through 2b-RAD sequencing in *Pseudobagrus ussuriensis*[J]. *Aquaculture*, 2021, 539: 736639.
- [103] Zhu C K, Pan Z J, Wang H, *et al.* A novel male-associated marker for sex identification in Ussuri catfish *Pseudobagrus ussuriensis*[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(3): 850-852.
- [104] Zhu C K, Liu H Y, Pan Z J, *et al.* Construction of a high-density genetic linkage map and QTL mapping for growth traits in *Pseudobagrus ussuriensis*[J]. *Aquaculture*, 2019, 511: 734213.
- [105] 朱传坤, 潘正军, 王辉, 等. 一种鉴定乌苏里拟鲿雌、雄个体的微卫星标记与特异性引物及应用: 106811540B[P]. 2020-06-23.
- Zhu C K, Pan Z J, W H, *et al.* Microsatellite markers and specific primers for identifying female and male individuals of *Pseudobagrus ussuriensis*, and their application: 106811540B[P]. 2020-06-23 (in Chinese).
- [106] Zhang G S, Li J, Zhang J J, *et al.* A high-density SNP-based genetic map and several economic traits-related loci in *Pelteobagrus vachelli*[J]. *BMC Genomics*, 2020, 21(1): 700.
- [107] 朱媛媛, 梁宏伟, 李忠, 等. 黄颡鱼 MSTN 基因多态性及其与生长性状的相关性分析 [J]. *遗传*, 2012, 34(1): 72-78.
- Zhu Y Y, Liang H W, Li Z, *et al.* Polymorphism of MSTN gene and its association with growth traits in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Hereditas*, 2012, 34(1): 72-78 (in Chinese).
- [108] 葛学亮, 尹洪滨, 毕冰, 等. 黄颡鱼遗传图谱构建及生长相关性状的 QTL 定位 [J]. *水产学报*, 2010, 34(2): 185-193.
- Ge X L, Yin H B, Bi B, *et al.* A preliminary research of genetic linkage map construction and QTL analysis for growth-related traits in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(2): 185-193 (in Chinese).
- [109] 葛学亮. 黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 遗传图谱构建及生长相关性状的 QTL 定位 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- Ge X L, Genetic linkage map construction and QTL analysis for growth-related traits in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010 (in Chinese).
- [110] 鲁翠云, 孙效文, 梁利群. AFLP 分析黄颡鱼雌雄个体的遗传差异 [J]. *水产学杂志*, 2007, 20(2): 24-28,34.
- Lu C Y, Sun X W, Liang L Q. Genetic diversity of both sexes of *Pelteobagrus fulvidraco* in AFLP Yaluensis juveniles[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2007, 20(2): 24-28,34 (in Chinese).
- [111] 桂建芳, 王达, 毛慧玲, 等. 黄颡鱼性染色体特异分子标记及遗传性别鉴定方法: 200810236650.0[P]. 2009-04-29.
- Gui J F, Wang D, Mao H L, *et al.* Sex chromosome-

- specific molecular markers and genetic sex identification method for yellow catfish: 200810236650.0[P]. 2009-04-29 (in Chinese).
- [112] 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.
- [113] Dan C, Mei J, Wang D, *et al.* Genetic differentiation and efficient sex-specific marker development of a pair of Y- and X-linked markers in yellow catfish[J]. *International Journal of Biological Sciences*, 2013, 9(10): 1043-1049.
- [114] 丹成, 王达, 桂建芳. 黄颡鱼性别连锁标记 *Pf62-Y* 的染色体定位 [J]. 水生生物学报, 2014, 38(1): 184-186.
Dan C, Wang D, Gui J F. Chromosomal localization of sex-linked marker *Pf62-Y* in yellow catfish[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(1): 184-186 (in Chinese).
- [115] 吴俊颀. XY 和 YY 黄颡鱼精巢转录组分析以及 *rbmx* 基因在鱼类性腺发育中的功能研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
Wu J J. Transcriptome analysis of XY, YY yellow catfish testes and functional study of *rbmx* in fish gonad development[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese).
- [116] 陈校辉, 刘朋朋, 王明华, 等. 黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) MSTN 基因 SNP 位点与体重的相关性分析 [J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(6): 1566-1569.
Chen X H, Liu P P, Wang M H, *et al.* SNP sites of *mstn* gene and its association with body weight in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(6): 1566-1569 (in Chinese).
- [117] Xiong Y, Zheng X Z, Ke W S, *et al.* Function and association analysis of *Cyclophilin A* gene with resistance to *Edwardsiella ictaluri* in yellow catfish[J]. *Developmental & Comparative Immunology*, 2020, 113: 103783.
- [118] 辛文婷, 孙中武, 尹洪滨, 等. 黄颡鱼雌雄差异的 SRAP 标记 [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 112-113.
Xin W T, Sun Z W, Yin H B, *et al.* Identification of sex-associated SRAP marker in *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(5): 112-113 (in Chinese).
- [119] 辛文婷. 黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) SRAP 遗传图谱的构建 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
Xin W T. Construction of genetic linkage map of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) based on SRAP markers[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009 (in Chinese).
- [120] Wang P P, Wang L, Yang J, *et al.* Sex-biased miRNAs of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) and their potential role in reproductive development[J]. *Aquaculture*, 2018, 485: 73-80.
- [121] 谢彬月, 熊舒婷, 梅洁. 黄颡鱼性别决定和分化相关基因的鉴定及其在性腺中的表达分析 [J]. 湖北农业科学, 2017, 56(12): 2362-2367.
Xie B Y, Xiong S T, Mei J. Identification and expression of genes related to sex determination and differentiation in *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(12): 2362-2367 (in Chinese).
- [122] Gao D, Zheng M, Lin G M, *et al.* Construction of high-density genetic map and mapping of sex-related loci in the yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Marine Biotechnology*, 2020, 22(1): 31-40.
- [123] Dai S M, Zhou Y L, Guo X F, *et al.* Sex-specific markers developed by genome-wide 2b-RAD sequencing confirm an XX/XY sex determination system in Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris*)[J]. *Aquaculture*, 2022, 549: 737730.
- [124] Luo H, Li Y, Zheng S Q, *et al.* Identification of male sex-specific markers using genome re-sequencing in the Chinese longsnout catfish *Leiocassis longirostris*[J]. *Aquaculture*, 2022, 558: 738392.
- [125] 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.
- [126] 刘汉勤, 崔书勤, 侯昌春, 等. 从 XY 雌鱼雌核发育产生 YY 超雄黄颡鱼 [J]. 水生生物学报, 2007, 31(5): 718-725.
Liu H Q, Cui S Q, Hou C C, *et al.* YY supermale generated gynogenetically from XY female in *Pelteobagrus fulvidraco* (Richardson)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(5): 718-725 (in Chinese).
- [127] Zhang Y L, Zhang C M, Fan Q X, *et al.* Comparative study of growth, feed utilization, and immunity of

- hybrid catfish and all - male yellow catfish[J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2020, 82(1): 71-74.
- [128] Forabosco F, Löhmus M, Rydhmer L, *et al.* Genetically modified farm animals and fish in agriculture: a review[J]. *Livestock Science*, 2013, 153(1-3): 1-9.
- [129] 叶星, 王海英, 简清, 等. 转基因水生动物的应用研究[J]. 广东海洋大学学报, 2007, 27(1): 95-100.
- Ye X, Wang H Y, Jian Q, *et al.* Study on the application of transgenic aquatic animal[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2007, 27(1): 95-100 (in Chinese).
- [130] Tonelli F M P, Lacerda S M S N, Tonelli F C P, *et al.* Progress and biotechnological prospects in fish transgenesis[J]. *Biotechnology Advances*, 2017, 35(6): 832-844.
- [131] 梁明山, 赵邦炯, 游育信, 等. 胡子鲶总 DNA 转化长吻鮠鱼的初步研究[J]. 西南农业学报, 1994, 7(1): 97-101.
- Liang M S, Zhao B J, You Y X, *et al.* Study of transforming total DNA of *Coarias* sp. to *Leiocassis longirostris* Gunther[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 1994, 7(1): 97-101 (in Chinese).
- [132] 陆建平, 杜伟林, 濮卫峰. 转基因黄颡鱼选育技术研究[J]. 科学养鱼, 2011(11): 10.
- Lu J P, Du W L, Pu W F. Study on selective breeding technology of transgenic *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Scientific Fish Farming*, 2011(11): 10 (in Chinese).
- [133] 葛家春, 宋伟, 董张及, 等. “全鱼”转生长激素基因黄颡鱼首建者的建立[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2013, 49(1): 123-131.
- Ge J C, Song W, Dong Z J, *et al.* Generation of "all fish" growth hormone gene transgenic yellow catfish founders[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2013, 49(1): 123-131 (in Chinese).
- [134] 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).
- [135] Zhang X C, Wang F, Dong Z J, *et al.* A new strain of yellow catfish carrying genome edited myostatin alleles exhibits double muscling phenotype with hyperplasia[J]. *Aquaculture*, 2020, 523: 735187.

Review on genetic breeding progress of Bagridae family in China

ZHAO Cheng, LI Yao, NING Xianhui, WANG Tao, YIN Shaowu*

(Jiangsu Province Engineering Research Center for Aquatic Animals Breeding and Green Efficient Aquacultural Technology, College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The Bagridae family constitutes an essential economic fishery resource in China, with species such as *Pelteobagrus fulvidraco*, *Leiocassis longirostris*, *Pseudobagrus ussuriensis* and *P. vachelli* possessing high production and economic value. Research into genetic breeding and germplasm enhancement is pivotal for fostering the sustainable development of China's aquaculture industry. This review systematically examines and projects the genetic breeding advancements of the Bagridae in China, encompassing selective breeding, hybrid breeding, cell engineering breeding, genetic engineering breeding and molecular marker-assisted breeding. The review aims to establish a theoretical foundation for the further scientific and rational exploitation of Bagridae family resources in China.

Key words: Bagridae family; genetic breeding; research progress

Corresponding author: YIN Shaowu. E-mail: yinshaowu@163.com

Funding projects: The “JBGS” Project of Seed Industry Revitalization in Jiangsu Province (JBGS[2021]034); National Natural Science Foundation of China (32402983)