

DOI: 10.11964/jfc.20230514023

· 综述 ·

裂腹鱼类种质资源保护与利用研究进展



马宝珊¹, 吴怡迪¹, 霍斌², 金佳利¹, 王宏³, 贺湖客¹,
李云峰^{1*}, 梁宏伟^{1*}

1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站, 湖北武汉 430223; 2. 华中农业大学水产学院, 湖北武汉 430070; 3. 甘南藏族自治州畜牧技术服务中心, 甘肃甘南 737000

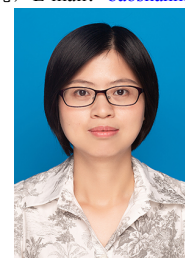
摘要: 裂腹鱼类是分布于青藏高原及其周边地区的重要鲤科鱼类。由于过度捕捞、生物入侵和水利工程等已经严重威胁裂腹鱼类的生存, 目前大部分裂腹鱼类处于极危、濒危、易危和近危的生存状态。为了保护裂腹鱼类的种质资源, 经过数十年的科技攻关, 部分裂腹鱼类已实现规模化繁育和商品化养殖利用。本文通过查阅相关资料, 结合实地考察, 总结和梳理了裂腹鱼类的生物学特征、资源保护现状、种质评价与遗传育种、繁殖和养殖技术及加工利用等方面的研究进展, 重点对其种质遗传资源挖掘及人工养殖与技术开发进行深入探讨, 并分析其存在的问题和发展前景, 以期为我国裂腹鱼类的资源保护及山区渔业高质量发展提供参考。

关键词: 裂腹鱼类; 资源保护; 遗传解析; 养殖; 疾病; 开发利用

裂腹鱼类 (schizothoracine fishes) 是亚洲中部高原地区特有的鲤科 (Cyprinidae) 鱼类, 在中国分布有 99 种和亚种^[1], 其中一些种类是分布区重要的特色鱼类, 具有较高的科研价值和经济价值。然而, 近年来水电开发、过度捕捞、河道采砂和生物入侵等给裂腹鱼类的生存带来严重威胁^[2-4], 大部分裂腹鱼类处于极危、濒危、易危和近危的生存状态^[5]。为了保护 and 恢复裂腹鱼类自然种群, 建立水产种质资源保护区和开展人工增殖放流是目前采取的两大主要措施^[6], 开展为期 5~10 年的全面禁捕是另一强有力措施。然而, 目前裂腹鱼类的人工养殖规模尚小, 市场上销售的商品鱼主要依赖天然捕捞, 因此, 在“长江大保护”和全面禁捕的背景下, 开展裂腹鱼类人工养殖不仅能够保护其自然资源, 还可以满足不断扩大的市场需求, 提高当地渔民收入。

裂腹鱼类是典型的冷水性鱼类, 对水质要求较高, 通常只能生活于高海拔无污染的冷水中, 具有蛋白含量高、肉质细嫩、肉味鲜美、易加工等特点, 富含氨基酸、不饱和脂肪酸、矿物质和维生素^[7-11]。当今老百姓高度关注食品安全和营养品质, 使得裂腹鱼类市场需求量日益扩大, 现有产量远远不能满足消费者的需求, 其售价明显高于传统大宗淡水水产品, 达 60~500 元/kg。目前, 裂腹鱼类已成为当地市

第一作者: 马宝珊, 从事鱼类资源保护研究, E-mail: baoshanna@yfi.ac.cn



通信作者: 李云峰, 从事渔业资源保护研究, E-mail: lyf086@yfi.ac.cn; 梁宏伟, 二级研究员, 博士生导师。国家大宗淡水鱼产业技术体系鲢种质资源与品种改良岗位专家, 第一次全国水产养殖种质资源调查华中区组长, 从事水产动物种质资源与遗传育种研究, E-mail: lianghw@yfi.ac.cn



资助项目: 农业农村部财政专项“黄河渔业资源与环境调查”; 国家淡水水产种质资源库 (FGRC18537); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2023TD09, 2023TD33)

收稿日期: 2023-05-23

修回日期: 2024-04-20

文章编号:

1000-0615(2025)05-059301-19

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



场一个新的经济增长点, 具有广阔的消费前景。因此, 利用当地优质冷水和鱼类资源, 开展特色鱼类养殖, 不仅能够保护裂腹鱼类的野生资源, 而且可以满足消费市场需求, 提高当地渔民收入, 契合我国水产养殖业可持续发展的战略需求。鉴于此, 笔者全面收集相关资料, 并结合实地考察, 总结和梳理了裂腹鱼类的生物学特征、资源保护及开发利用的研究进展, 以期对裂腹鱼类的保护方案制定、专用饲料开发、良种选育及产品深加工等提供参考依据。

1 基本生物学与栖息地特征

裂腹鱼亚科 (schizothoracine) 鱼类 (以下简称裂腹鱼类), 隶属于鲤形目 (Cypriniformes) 鲤科。全世界共有 12 属裂腹鱼类^[1, 12-13], 分别为裂腹鱼属 (*Schizothorax*)、裂鲤属 (*Schizocypris*, 仅在国外分布)、扁吻鱼属 (*Aspiorhynchus*)、重唇鱼属 (*Diptychus*)、叶须鱼属 (*Ptychobarbus*)、裸重唇鱼属 (*Gymnodiptychus*)、裸鲤属 (*Gymnocypris*)、尖裸鲤属 (*Oxygymnocypris*)、裸裂尻鱼属 (*Schizopygopsis*)、高原鱼属 (*Herzensteinia*)、黄河鱼属 (*Chuanchia*) 和扁咽齿鱼属 (*Platypharodon*)。中国是裂腹鱼类的集中分布区, 总计有 11 属约 99 种和亚种, 分布于西藏、新疆、青海、甘肃、陕西、四川、云南、贵州、重庆、湖北和湖南等省份的各大高原和山区水体中^[1]。

1.1 生物学特征

受高寒生活环境的影响, 裂腹鱼类栖息水域饵料资源匮乏, 食物以底栖无脊椎动物和藻类为主, 极少数种类主食鱼类^[4]。一般寿命较长, 目前发现的最大年龄达 50 龄 [异齿裂腹鱼 (*S. o'connori*)]^[14]。属于生长缓慢、体型较大的种类, 自然状态下体重达 500 g 时其年龄至少为 5~10 龄^[14-16], 最大体重高达 8 kg 左右。性成熟周期长, 通常 3~6 龄才性成熟; 繁殖力较低, 一般雌鱼的相对繁殖力为 6~60 枚/g; 繁殖时间开始较早, 通常每年的 2—6 月为其集中产卵时间^[17-18]。雅鲁藏布江中游的裂腹鱼类 1 年繁殖 1 次, 部分性成熟个体存在隔年产卵的繁殖习性^[4]。产卵场一般位于流水卵石底质的河滩处, 受精卵为沉性兼黏性卵, 在水流较缓的石缝隙和沙粒中孵化^[4, 12]。

1.2 栖息地环境特征

裂腹鱼类适应于高原和山区水体的生活环境, 一般栖息于江河的中上游, 很少下降到海拔较低的下游^[1]。分布区海拔高、水温低、流速快、溶解氧和透明度都较高, 底质类型以大石、卵石和砾石为主, 兼有少量泥沙和淤泥, 且多有深潭-浅滩序列, 饵料生物多以底栖动物和着生生物为主, 滨岸带植被覆盖度较高, 通常达 80% 以上。分布区一般分为旱季和雨季, 且雨季具有多夜雨和大雨的特点^[19]。青海和西藏等地的高原湖泊中也有裂腹鱼类分布, 以裸鲤属和裸裂尻鱼属为主要类群。高原湖泊中有部分为盐碱湖泊, 比如著名的青海湖, 湖区主要鱼类为青海湖裸鲤 (*G. przewalskii przewalskii*)^[1, 12, 20]。

2 种质资源保护现状

2.1 种质资源现状

裂腹鱼类具有寿命长、生长缓慢、性成熟晚和繁殖力低等特点, 对环境退化和过度开发非常敏感, 如果种群资源遭受破坏, 将很难得到恢复^[21-22]。然而由于社会经济的发展, 过度捕捞、生物入侵、水利工程、水域污染等已经严重威胁到裂腹鱼类的生存^[2-4, 23]。目前, 大部分裂腹鱼类处于极危、濒危、易危和近危的生存状态。《中国脊椎动物红色名录》评估了 77 种 (物种级别) 裂腹鱼类的濒危状态, 处于无危等级的物种数只有 7 种, 而需要重点保护和关注的裂腹鱼类有 70 种, 处于数据缺乏、近危、易危、濒危和极危等级, 占裂腹鱼类总种类数的 90.9%^[5]。其中列为极危等级的有 4 种, 分别是大理裂腹鱼 (*S. taliensis*)、长须裂腹鱼 (*S. longibarbus*)、扁吻鱼 (*A. laticeps*) 和鳞胸裂腹鱼 (*S. lepidothorax*)。另外, 有 12 种裂腹鱼类被列入 2021 年发布的国家重点保护野生动物名录 (二级保护动物): 拉萨裂腹鱼 (*S. waltoni*)、巨须裂腹鱼 (*S. macropogon*)、尖裸鲤 (*O. stewartii*)、斑重唇鱼 (*D. maculatus*)、塔里木裂腹鱼 (*S. bidulphi*)、扁吻鱼、骨唇黄河鱼 (*C. labiosa*)、极边扁咽齿鱼 (*P. extremus*)、厚唇裸重唇鱼 (*G. pachycheilus*)、重口裂腹鱼 (*S. davidi*)、细鳞裂腹鱼 (*S. chongi*) 和大理裂腹鱼。因此, 裂腹鱼类的自然种群现状不容乐观, 对其开展资源保

护刻不容缓。

2.2 种质资源保护措施

种质资源保护区 建立种质资源保护区是濒危鱼类首选的就地保护措施, 既能保护鱼类种群资源, 同时也能保护鱼类栖息地的完整性。2007—2018年, 中国批准了11批共535处国家级水产种质资源保护区, 其中以裂腹鱼类为主要保护对象的国家级水产种质资源保护区47个, 总面积约为553.1万hm², 直接以裂腹鱼类命名的保护区12个, 以特有鱼类命名的保护区30个。47个裂腹鱼类保护区主要分布于青藏高原, 其中27个保护区位于青海和甘肃, 其数量约占57.4%, 面积约占96.3%, 其他则分散于新疆维吾尔自治区、西藏自治区、四川、贵州、陕西、云南和湖北^[24-34](表1)。保护区保护的裂腹鱼类高达34种, 其中以黄河裸裂尻鱼(*S. pylzovi*)、重口裂腹鱼和厚唇裸重唇鱼为主要保护对象的保护区居多, 分别有11个、10个和9个(图1)。然而, 目前部分保护区存在功能分区结构及个别保护对象设置不合理的现象, 也缺乏对物种及其生境保护效果的整体评估^[35]。

表1 不同省份裂腹鱼类国家级水产种质资源保护区的数量

Tab. 1 The number of national aquatic germplasm reserves of schizothoracine fish in different provinces

省级行政区 provincial districts	保护区个数/个 number of reserves	各省占比/% proportion of each province
甘肃 Gansu	14	29.79
青海 Qinghai	13	27.66
西藏自治区 Xizang Autonomous Region	4	8.51
新疆维吾尔自治区 Xinjiang Uygur Autonomous Region	4	8.51
四川 Sichuan	4	8.51
贵州 Guizhou	3	6.38
陕西 Shaanxi	2	4.26
云南 Yunnan	2	4.26
湖北 Hubei	1	2.13

人工增殖放流 为了保护 and 恢复裂腹鱼类自然种群, 人工增殖放流是另一种有效措施, 在青藏高原地区被广泛运用实施。在青海、西

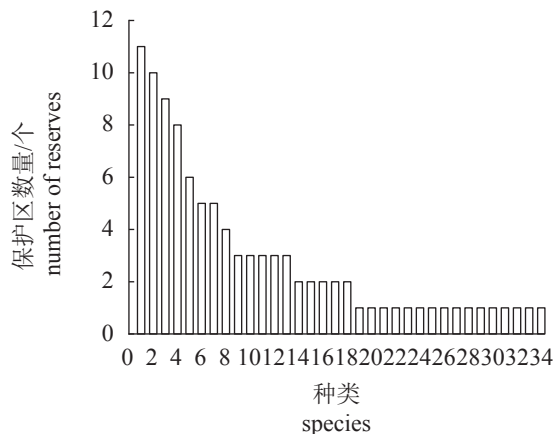


图1 以部分种类作为主要保护对象的国家级水产种质资源保护区数量

1. 黄河裸裂尻鱼, 2. 重口裂腹鱼, 3. 厚唇裸重唇鱼, 4. 极边扁咽齿鱼, 5. 花斑裸鲤, 6. 骨唇黄河鱼, 7. 齐口裂腹鱼, 8. 中华裂腹鱼, 9. 拉萨裂腹鱼, 10. 嘉陵裸裂尻鱼, 11. 长丝裂腹鱼, 12. 裸腹叶须鱼, 13. 新疆裸重唇鱼, 14. 双须叶须鱼, 15. 前腹裸裂尻鱼, 16. 四川裂腹鱼, 17. 斑重唇鱼, 18. 伊犁裂腹鱼, 19. 墨脱裂腹鱼, 20. 弧唇裂腹鱼, 21. 青海湖裸鲤, 22. 甘子河裸鲤, 23. 祁连裸鲤, 24. 斜口裸鲤, 25. 尖裸鲤, 26. 大理裂腹鱼, 27. 贡山裂腹鱼, 28. 塔里木裂腹鱼, 29. 怒江裂腹鱼, 30. 异齿裂腹鱼, 31. 拉萨裸裂尻鱼, 32. 巨须裂腹鱼, 33. 软刺裸裂尻鱼, 34. 昆明裂腹鱼。

Fig. 1 Number of national aquatic germplasm reserves to list the species as key protected species

1. *S. pylzovi*, 2. *S. davidi*, 3. *G. pachycheilus*, 4. *P. extremus*, 5. *G. eckloni*, 6. *C. labiosa*, 7. *S. prenanti*, 8. *S. sinensis*, 9. *S. waltoni*, 10. *S. kialingensis*, 11. *S. dolichonema*, 12. *P. kaznakovi*, 13. *G. dybowskii*, 14. *P. dipogon*, 15. *S. anteroventris*, 16. *S. kozlovi*, 17. *D. maculatus*, 18. *S. pseudoaksaiensis*, 19. *S. molesworthi*, 20. *S. curvilabiatus*, 21. *G. przewalskii przewalskii*, 22. *G. przewalskii ganzihonensis*, 23. *G. eckloni chilienensis*, 24. *G. eckloni scolistomus*, 25. *O. stewartii*, 26. *S. taliensis*, 27. *S. gongshanensis*, 28. *S. biddulphi*, 29. *S. nukiangensis*, 30. *S. oconnori*, 31. *S. younghusbandi younghusbandi*, 32. *S. macropogon*, 33. *S. malacanthus malacanthus*, 34. *S. grahami*.

藏、新疆、四川、云南等的自然水域已有约40种裂腹鱼类先后开展了增殖放流活动, 其中放流规模较大的有青海湖裸鲤、花斑裸鲤(*G. eckloni*)、黄河裸裂尻鱼、极边扁咽齿鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裂腹鱼、异齿裂腹鱼、双须叶须鱼(*P. dipogon*)、拉萨裸裂尻鱼(*S. younghusbandi younghusbandi*)、尖裸鲤、新疆裸重唇鱼(*G. dybowskii*)、光唇裂腹鱼(*S. lissolabiatus*)、齐口裂腹鱼(*S. prenanti*)、重口裂腹鱼和短须裂腹鱼(*S. wangchiachii*)等。西藏自治区2009—2016年放流拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼、双须叶须鱼、拉萨裸裂尻鱼和尖裸鲤等裂腹鱼类累计近800万尾^[36]。2016—2020年四川省凉

山州各水域累计放流齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼、短须裂腹鱼、细鳞裂腹鱼和四川裂腹鱼 (*S. kozlovi*) 等近 1 000 万尾。尽管裂腹鱼类的放流量巨大, 但放流后苗种的存活情况仍不清楚, 放流后监测和效果评估极为缺乏。

禁捕政策 由于受大量人类活动的影响, 中国裂腹鱼类自然种群资源日益萎缩仍是一个十分严峻的事实。与上述两种主要保护措施相比, 禁捕政策由于地方执行力度较强, 保护效果最为显著。从 2020 年 1 月起, 长江流域 332 个自然保护区和水产种质资源保护区全年禁渔; 从 2021 年 1 月起, 长江流域重点水域施行 10 年禁渔。2020 年 12 月, 中国第一部流域法律《中华人民共和国长江保护法》颁布, 为长江流域水生生物多样性保护与可持续发展提供了可靠支撑。随后, 自 2022 年 4 月至 2025 年 12 月, 黄河河源区及上游重点水域实行全年禁捕。2023 年 4 月, 《中华人民共和国黄河保护法》颁布, 为黄河流域水生生物多样性保护提供了重要法治依据。自 2022 年 6 月起, 雅鲁藏布江流域(日喀则段)等水域实行十年禁渔。澜沧江等其他河流也实行了区域性全年禁捕。禁渔政策的实施, 将有望对各水域裂腹鱼类资源自然种群起到长期的保护和恢复效果, 从而实现高原河流水生生态系统的动态平衡。

2.3 种质资源保护现状

目前, 裂腹鱼类的保护略有成效, 其中保护效果最好的为青海湖裸鲤^[37]。由于产卵场破坏和过度捕捞等因素, 20 世纪青海湖裸鲤资源量经历了急剧衰退的过程, 60 年代初资源量高达 20 多万 t, 80 年代初下降为 1.74 万 t, 90 年代初为 1.26 万 t, 90 年代末仅为 0.34 万 t。为了有效保护青海湖裸鲤种质资源, 从 1986 年开始, 青海省政府先后 4 次对青海湖实施封湖, 其中第 4 次实行十年全面禁捕(2001—2010 年)。与此同时, 建立人工放流站开展增殖放流。随后, 成立青海湖裸鲤救护中心实施抢救性保护, 最终达到了自然恢复和保护效果。2002 年后资源量逐步回升, 2004 年超过 0.5 万 t, 2009 年达到 2.73 万 t^[37]。青海湖裸鲤的救护措施为裂腹鱼类的保护和恢复提供了成功的典范, 但同时也应考虑不同水域和不同保护对象的实际情况, 因地制宜, 将不同保护措施通过一定手段

有机结合, 更有效地恢复与保护裂腹鱼类自然资源。因此, 需加强对裂腹鱼类及其栖息地的保护研究, 在详实的监测数据和科学论断的基础上制订和完善高效的保护方案, 在未来的裂腹鱼类保护中充分发挥指导作用。

一方面裂腹鱼类野生种群资源日益衰退, 另一方面裂腹鱼类养殖产业才刚起步, 暂时无法形成有特色的多样化种质资源群体。鉴于此, 依据裂腹鱼类生物地理学和种群遗传学的规律, 结合该养殖产业的特点和需求, 系统开展裂腹鱼类繁殖、养殖、育种和深加工等种质资源可持续利用工作, 是一项重要而紧迫的战略性任务。

3 种质评价与遗传育种

目前, 绝大部分裂腹鱼类繁育亲本主要来源于自然种群, 随着种质资源的衰退, 自然种群已无法满足繁育亲本的需求。因此, 开展裂腹鱼类种质遗传资源的挖掘和良种选育工作迫在眉睫。然而由于裂腹鱼类性成熟周期长, 传统选育耗时耗力, 相关的遗传育种工作开展较少。且裂腹鱼类基因组多倍体化, 高通量测序成本高、难度大, 多倍体鱼类分子育种技术尚不成熟。近年来, 随着高通量测序等分子技术的发展, 开始对其开展基因组测序、挖掘种质遗传资源、评价种群遗传结构和遗传多样性等相关研究, 并对一些重要经济性状的遗传基础进行解析, 为裂腹鱼类的良种选育提供了重要依据。

3.1 种质遗传资源挖掘

基因组、分子标记等遗传资源的挖掘对于了解物种的进化和种群遗传特点, 解析环境适应的遗传机制和重要性状的遗传调控机制具有重要价值^[38]。

全基因组 高质量参考基因组图谱的绘制能够为探究裂腹鱼类的基因组进化、群体遗传学、生态学和高原环境适应等研究提供参考依据。Xiao 等^[39]利用 PacBio 单分子实时测序和 Illumina HiSeq XTen 平台测序数据绘制了世界首个染色体水平的高原四倍体鱼类(异齿裂腹鱼)的参考基因组, 该基因组大小为 2.07 Gb, contig N50 为 241.9 kb, 挂载到 24 条染色体, 并鉴定了 43 731 个蛋白编码基因。在约 123 万年前发生的全基因组复制事件导致异齿裂腹鱼

两套染色体间存在大量的重复序列插入, 使得附近基因的表达模式发生改变, 产生了再二倍化的特征, 基因组中与 DNA 修复、叶酸转运代谢等相关基因受到强烈正选择, 可能与其高原环境适应密切相关。Tian 等^[40] 通过三代 PacBio、二代 Illumina 和 Hi-C 测序相结合的方法, 获得大小为 2.03 Gb、scaffold N50 为 44.93 Mb、包含 46 条染色体的青海湖裸鲤基因组, 并注释了 56 397 个基因, 加倍基因主要与 DNA 修复、转运等高原极端环境适应相关。目前花斑裸鲤^[41]、尖裸鲤^[42]、扁吻鱼^[43] 等裂腹鱼类基因组也已经获得破译, 这些基因组信息为裂腹鱼类的进化、极端环境适应性、基因组多倍化以及基因功能等研究提供了宝贵的遗传资源。

分子标记 筛选和开发分子标记对后期裂腹鱼类遗传性状解析以及分子选育具有重要意义。有关齐口裂腹鱼的研究较多, Luo 等^[44] 首次通过 Illumina 二代测序鉴定了 857 535 个假定的单核苷酸多态性 (SNP) 标记, 其中 33 个落在免疫相关基因上, 有 20 个表现出显著的多态性。Luo 等^[45] 从脾脏转录组中分离检测到 7 545 个假定的简单重复序列 (微卫星序列, SSR) 和 857 535 个 SNP 标记, 并鉴定了 500 多个免疫相关基因。Zhou 等^[46] 在养殖群体中分离和鉴定出 33 个 SNP 标记, 观测杂合度和期望杂合度分别为 0.031 2~0.843 8 和 0.031 2~0.507 9, 其中有 5 个位点与 Hardy-Weinberg 平衡 (HWE) 存在显著偏差。杨月静等^[38] 报道有 2 个 SNPs (ug25050-1678 和 ug22712-0-2452) 与生长性状显著相关, 可作为选育的候选分子标记。应用同样的方法, Ma 等^[47] 鉴定了 63 个位于拉萨裂腹鱼免疫相关基因上的 SNP 位点, 并发现其中 36 个具有显著多态性, 观测杂合度和期望杂合度分别为 0.078 9~0.957 7 和 0.076 3~0.503 3。此外, 在裂腹鱼类物种鉴定^[48]、齐口裂腹鱼细菌性败血症^[49] 等方面也开展了分子标记开发应用的相关研究, 获得的标记不仅为裂腹鱼类的物种保护提供了可靠的技术方法, 也为裂腹鱼类遗传连锁图谱构建和经济性状的提升提供了基础资料。

3.2 种质遗传评价

种质遗传多样性和遗传结构是评价种群生存适应和发展进化的前提, 能够为物种遗传资

源的保护和开发利用提供基础信息。近年来, 利用线粒体序列、SSR 和 SNP 等多种分子标记, 学者们对不同地区的裂腹鱼类种群开展了遗传评价, 揭示其群体遗传结构、遗传多样性状态或进化关系, 为了解裂腹鱼类的种质遗传现状提供有价值的信息。杨天燕等^[50] 利用 SSR 标记对塔什库尔干、多浪渠首等 5 个塔里木裂腹鱼地理种群的遗传多样性进行了比较分析, 发现群体间遗传分化明显, 并以塔什库尔干群体的遗传多样性最高。李光华等^[51] 利用开发的 SNP 标记对金沙江短须裂腹鱼进行遗传多样性分析, 结果显示, 遗传多样性指数和多态性信息含量分别为 0.338 6 和 0.256 2, 具有中等水平的遗传多样性, 并认为这与人为干扰有关。此外, 相似的研究在齐口裂腹鱼^[52]、四川裂腹鱼^[53]、青海湖裸鲤^[54] 和异齿裂腹鱼^[55] 等其他裂腹鱼类中也广泛开展, 相关遗传信息为裂腹鱼类的资源保护和管理提供了参考依据。

3.3 性状遗传解析

近年来, 越来越多的研究开始利用比较转录组分析等方法, 对裂腹鱼类的高原适应机制以及驯养、生长和抗病等性状进行遗传解析, 并挖掘到了一些关键的调控基因和通路, 为深入了解裂腹鱼类的适应性机制提供了新见解, 也为裂腹鱼类种质遗传资源开发和利用提供了基础资料。

高原适应 与裂腹鱼类高原适应机制相关的基因很多, 主要参与其形态发育、能量代谢、蛋白质代谢和免疫调节等, 相关基因可能与低温、强辐射和盐碱适应等有关^[1]。Yu 等^[56] 指出高海拔和亚高海拔的裂腹鱼类在青藏高原隆起过程中面临不同的选择压力, 与蛋白质泛素化调节、感官器官形态发生、血液循环和血管发育等相关的基因在两类鱼体内的表达模式产生了差异。

驯养与生长 Zhou 等^[57] 对人工驯养过程中异齿裂腹鱼的转录组和代谢组分析发现, 与野生群体相比, 驯养群体卵巢中与卵母细胞生长和死亡途径相关的基因显著差异表达, 肝脏中不饱和脂肪酸的生物合成、淀粉和蔗糖代谢以及脂肪酸的合成这 3 种常见的途径也显著富集, 因而提示在异齿裂腹鱼的人工繁殖过程中应特别注意脂肪酸的组成和摄入量。Li 等^[58]

通过对不同年龄齐口裂腹鱼骨骼肌组织的比较转录组分析表明, 从孵出后 30 d~1 龄, 骨骼肌中与 PPAR 信号通路、心肌收缩、脂肪酸代谢等通路相关的基因发生了显著差异表达, 而 1~3 龄, 骨骼肌中与三羧酸循环、脂肪酸代谢、线粒体中的脂肪酸延伸、氨基酸代谢相关途径的基因显著差异表达, 相关研究结果有利于裂腹鱼类骨骼肌发育和生长的潜在候选基因或标记的筛选。

抗病 齐口裂腹鱼脾脏组织中许多与补体和凝血级联、趋化因子信号通路、toll 样受体信号通路、NOD 样受体信号途径和白细胞跨内皮迁移有关的重要功能基因在嗜水气单胞菌 (*Aeromonas hydrophila*) 感染过程中受到调节^[59]; 血管内皮黏附分子 (*CDH5* 基因)、高迁移率蛋白 B1 (*HMGB1*) 和热休克蛋白 60 基因 (*Hsp60*) 可能参与了齐口裂腹鱼细菌感染后的免疫应答^[60-62]。齐口裂腹鱼的抗细菌免疫应答可能始于 TLR22 和 TLR25 对 LPS 刺激信号的识别, 由 MYD88 或 P13K-AKT 信号通路介导, 促进细胞核因子 (NF- κ B) 的表达和炎症因子的产生, 并激发强烈的炎症反应抵御细菌入侵。而抗病毒的免疫应答机制可能通过 MDA5 和 JAK 信号通路, 促进 ISGs 表达以应对病毒的入侵^[63-64]。上述研究解析了一批具有潜在育种价值的抗病基因, 有利于推进裂腹鱼类的良种选育。

4 人工养殖与技术开发

裂腹鱼类是典型的冷水性鱼类, 只能在高冷洁净的流水环境中生长。近十几年来, 随着人们对有机绿色食品的需求不断增加, 裂腹鱼类逐渐进入消费者的视野, 被视为高端、绿色、健康的水产品, 成为我国一类新型发展、具有潜力的养殖对象。和大宗水产品相比, 裂腹鱼类的产量在全国所占的比例很小, 产品价值却显著高于传统大宗水产品, 且市场需求旺盛, 具有良好的发展前景。

4.1 种苗繁育

人工繁育 我国境内分布的裂腹鱼类具有潜在开发利用价值的达 60 余种和亚种。通过人工繁育苗种是规模化养殖的物质基础, 因此突破裂腹鱼类人工繁育技术, 实现规模化繁育

是开展商业化养殖的前提。20 世纪 70 年代, 龚生兴等^[65]对青海湖裸鲤胚胎发育过程进行了观察, 是我国最早报道突破人工繁殖技术的裂腹鱼类。随后, 陈永祥等^[66]对四川裂腹鱼幼鱼发育进行了观察, 并简介其苗种培育技术, 是我国裂腹鱼类苗种培育技术的首次报道。此后裂腹鱼类人工繁育技术逐步成熟, 在四川、云南、青海、西藏自治区、新疆维吾尔自治区、甘肃、贵州、重庆和湖北, 相继有 37 种裂腹鱼类的人工繁育技术被报道。谢从新等^[4]对裂腹鱼类亲鱼培育、人工催产孵化及仔鱼开口、苗种培育等关键技术进行了总结。随着地方市场对裂腹鱼类需求的增加, 其人工繁育技术研究进入了快速发展阶段, 部分裂腹鱼类实现了全人工繁育技术, 主要有青海湖裸鲤、扁吻鱼、齐口裂腹鱼、短须裂腹鱼、重口裂腹鱼、灰裂腹鱼 (*S. griseus*) 和昆明裂腹鱼 (*S. grahmi*) 等^[67-69]。

目前大部分裂腹鱼类的人工繁育技术已经较为成熟。雅鲁藏布江中游裂腹鱼类人工繁殖的适宜水温为 10~16 °C, 常用催产激素促黄体素释放激素类似物 (LRH-A2)、绒毛膜促性腺激素 (HCG)、鲤脑垂体 (PG) 和马来酸地欧酮 (DOM) 单独或混合使用, 均可取得较好催产效果, 且催产效果与亲鱼性腺发育状况和水温高低密切相关。采用低剂量 LRH-A2 和 DOM 混合, 二针催产, 适当延长针距, 可获得较好催产效果, 并可提高催产率和亲鱼成活率^[4]。

人工养殖 裂腹鱼类主要分布于我国西部高原地区或山区, 与中东部经济发达地区相比, 其分布区的自然环境恶劣, 人口密度小, 社会经济发展落后, 养殖基础设施简陋, 养殖水平较低, 其养殖业起步较晚。20 世纪 70 年代, 将青海湖裸鲤引入内蒙古自治区察哈尔右翼后旗石门水库中进行放养, 是我国首次报道的裂腹鱼类养殖^[70]。近十几年来, 随着人们对名特水产品需求的增加, 裂腹鱼类逐渐进入消费者的视野, 成为新兴的养殖对象。目前已有约 40 种裂腹鱼类成功实现人工养殖, 初步掌握人工养殖所需的环境条件以及常见病害的防控技术。主要的养殖种有齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼、青海湖裸鲤、光唇裂腹鱼和四川裂腹鱼, 齐口裂腹鱼俗称“雅鱼”, 其养殖区域主要集中于四川、云南、重庆、贵州和湖北等地; 重口

裂腹鱼主要养殖于四川和云南, 通常和齐口裂腹鱼等进行混养; 青海湖裸鲤俗称“湟鱼”, 其养殖区域主要集中于青海; 四川裂腹鱼, 主要养殖区域分布于四川、云南、贵州和湖北; 光唇裂腹鱼主要养殖于云南。而其他裂腹鱼类在我国的四川、云南、重庆、青海、甘肃、贵州、西藏自治区、新疆维吾尔自治区等高原冷水区域均有小规模成鱼养殖。目前, 裂腹鱼类商品化养殖及开发利用最为成功的应属齐口裂腹鱼, 在四川一些主养区的产量堪比四大家鱼, 其售价远高于四大家鱼, 达 100~250 元/kg。从养殖规模、养殖技术、遗传标记开发到产品加工等方面的研究报道, 齐口裂腹鱼都居裂腹鱼类之首。齐口裂腹鱼的规模化养殖为裂腹鱼类资源开发和利用提供了较好的示范作用, 在禁捕的大背景下, 可以为当地渔民开拓新的就业渠道, 并持续为消费市场提供充足的生鲜产品。

4.2 养殖模式

由于裂腹鱼类是我国新兴的养殖对象, 针对其养殖特点而开发的养殖设施仍然较少。目前主要养殖方式有池塘养殖、循环水养殖、网箱养殖和大水面养殖。池塘流水养殖主要利用天然冷水资源, 在经过改造或人工开挖的小池塘中进行流水养殖。由于管理较方便, 环境可控, 可开展高密度精养, 从而达到高产、优质和低耗的效果, 是目前裂腹鱼类最常用的养殖模式。工厂化循环水养殖是打破裂腹鱼类养殖地域限制的重要模式, 具有养殖周期短、放养密度高、劳动强度低、消耗水量少等特点, 但养殖成本较高。网箱养殖利用合成纤维或金属网片制作成一定形状的箱体, 置于天然水域(湖泊和水库)中, 以天然饵料或者人工饲料养殖裂腹鱼类。该模式放养密度高, 成本低, 产量高, 但不利于疾病防治。大水面养殖是利用水库、湖泊、河沟等养殖裂腹鱼类的一种方式, 鱼类的生长主要依靠水体中的天然饵料资源, 该模式养殖密度低, 营养品质接近野生鱼类。

4.3 养殖条件

裂腹鱼类生活于青藏高原高寒冷水环境中, 其生境特点是海拔高、辐射强、水温低、水流急^[1]。为了提高裂腹鱼类在增养殖过程中的受精率、孵化率、苗种成活率以及成鱼养殖成

活率, 模拟其在自然环境中的生存条件尤为重要^[71-73]。在人工繁育过程中, 所使用水源要求水质清新, 最好用山泉水、溶洞水或地下水; 水温较低, 一般处于 10~22 °C 之间; 水中溶解氧含量丰富, 一般要达到 5.0 mg/L 以上; 水质呈中性或弱碱性, pH 值一般 7.0~8.8^[74]; 受精卵的孵化和苗种培育一般要在微流水环境中进行。近年来, 学者们对裂腹鱼类人工孵化适宜的环境条件进行了深入研究^[75-77]。拉萨裸裂尻鱼受精卵孵化适宜的温度和 pH 分别为 16~19 °C 和 7.0~8.5^[75]; 受精卵对振动和水流的敏感期主要处于原肠胚早期至肌节出现期, 流速应低于 0.314 m/s^[76]。细鳞裂腹鱼受精卵孵化适宜的光照强度为 300~360 lx, 仔鱼出膜后, 适宜光照强度逐渐降低, 12 日龄后在 40~60 lx 下, 摄食强度最大, 生长最好^[77]。

苗种培育阶段, 水温、溶解氧、流速和光照强度等环境因子对裂腹鱼类苗种生长、呼吸代谢和消化吸收的影响较大^[78-83]。齐口裂腹鱼幼鱼生长的适宜温度为 5~27 °C, 实验最佳生长水温为 25 °C, 其临界窒息点为 0.57 mg/L^[78-79]; 在一定水温(11~23 °C)和流速(0~0.5 m/s)范围内, 其单位体重呼吸代谢率随温度升高而增大, 随流速增大而增大^[80]。17~27 °C 昼夜温度波动通过上调脑和肝脏相关基因表达从而促进齐口裂腹鱼幼鱼的生长, 提高其抗氧化能力、温度耐受能力以及对糖类的消化利用能力, 其生长激素和热休克蛋白水平较高^[81-82]。光照强度 500 lx 或光周期 16 L : 8 D、水温 20 °C 时, 塔里木裂腹鱼幼鱼摄食率和特定生长率最高^[83]。

对裂腹鱼类投喂频率和投喂量的研究结果表明, 不同投喂频率对短须裂腹鱼生长、饲料利用、体成分以及免疫和应激反应的影响有所不同, 并确定其最佳投喂频率为每日 2 次^[84]; 按体重 4.9%~5.2% 的饲料量投喂伊朗裂腹鱼 (*S. zarudnyi*), 其饲料转化率、特定生长率和蛋白质利用效率最高^[85]。齐口裂腹鱼和异齿裂腹鱼属弱趋光性鱼类, 在静水和流水条件下, 均对绿光表现为正趋光性, 对红光表现为负趋光性, 因此可采用低强度的绿光对齐口裂腹鱼和异齿裂腹鱼进行诱捕^[86-87]。

4.4 营养饲料

苗种培育过程中通常以豆浆、蛋黄、轮虫、

丰年虫和水蚯蚓等为开口饵料, 经过驯化后, 最终让其摄食小颗粒的人工配合饲料^[4]。邵俭等^[88]比较了卤虫无节幼体、鳗仔鱼料和专用仔鱼料(粗蛋白 $\geq 52\%$)对西藏裂腹鱼类仔鱼成活率和增长率的影响, 筛选出了较优仔鱼料。吴兴兵等^[89]通过对比冰冻轮虫、丰年虫、水蚯蚓和配合饲料等4种饵料对四川裂腹鱼仔鱼存活和生长的影响, 发现丰年虫为最适开口饵料。曾本和等^[90]指出微粒子开口饲料投喂拉萨裂腹鱼仔鱼, 其增长率和成活率最高, 投喂频率以每日1次效果较好。

确定营养素的需求量及其配比要求对裂腹鱼类专用饲料的研制至关重要。研究表明, 齐口裂腹鱼幼鱼各营养素的适宜比例为蛋白质40.1%、脂肪6.0%和无机盐4.0%^[91], 对钙、磷的需求量分别为1.5%~3.3%和1.5%~5.0%^[92]。重口裂腹鱼幼鱼最适生长的饲料营养素含量为蛋白质45%、脂肪9%和碳水化合物27%^[93]。青海湖裸鲤幼鱼蛋白质需求量为35%~40%^[94-95]。饲料脂肪水平为7%时, 其特定增长率、饲料转化率和总抗氧化能力最佳^[96]。拉萨裸裂尻鱼幼鱼饲料蛋白含量添加30%~35%时, 其生长速率、饲料转化率、消化能力、免疫和抗氧化指标较高^[97-99]。

此外, 对改善裂腹鱼类幼鱼生长和增强免疫的饲料添加剂也开展了相关研究^[100-106]。饲料中添加外源胆汁酸, 能显著增强齐口裂腹鱼幼鱼脂肪代谢酶活性, 改善肠道结构^[100]。添加纳米硒, 可促进其生长发育、改善肌肉营养品质并增强血清抗氧化性能^[101]。核黄素、魔芋低聚糖、氧化魔芋葡甘聚糖和酸解氧化魔芋葡甘聚糖可增强齐口裂腹鱼的免疫力^[102-105]。饲料中添加甲壳素有利于理氏裂腹鱼(*S. richardsonii*)的生长, 其净增重、特定增长率和饲料转化率显著提高^[106]。

4.5 病害防治

随着裂腹鱼类人工养殖的时间增加和规模扩大, 在养殖过程中放养密度增加、集约化程度加大, 养殖疾病也逐渐扩大范围, 愈发复杂多变, 且耐药性越来越强, 经常引起鱼类的大规模死亡, 给裂腹鱼类养殖业造成了巨大的损失。目前, 寄生虫病、真菌性和细菌性疾病在裂腹鱼类中均有报道。

寄生虫病 有关养殖裂腹鱼类寄生虫病, 早期多见于发病症状的描述以及预防和治疗方法的经验介绍, 主要有小瓜虫病、车轮虫病、斜管虫病、指环虫病等裂腹鱼类苗种常见疾病的报道^[107-108]。随后, 有学者对裂腹鱼类感染多子小瓜虫(*Ichthyophthirius multifiliis*)的病理学开展了研究^[109]。在印度北阿坎德邦冷水鱼养殖场跑道养殖的患病理氏裂腹鱼体表和尾鳍上观察到0.4~0.8 mm的白色斑点, 经鉴定病原为多子小瓜虫, 其感染率与温度有关, 7月感染率最高(84.80%), 12月最低(21.99%)。实验室条件下, 2%氯化钠和250 mg/L甲醛溶液的混合溶液对该病的治疗效果较佳^[110]。

细菌性疾病 裂腹鱼类养殖过程中出现的细菌性疾病报道较多, 主要见于嗜水气单胞菌、温和气单胞菌(*A. sobria*)、维氏气单胞菌(*A. veronii*)、无乳链球菌(*Streptococcus agalactiae*)和迟缓爱德华氏菌(*Edwardsiella tarda*)等^[111-115]。其临床表现为游动缓慢, 食欲不振, 胸鳍、腹鳍、尾鳍基部出血, 眼球突出, 腹部肿大, 肝脏、肾脏、脾脏等内脏充血甚至肿胀等^[111, 113-114]。在细菌病防治方面, Zhou等^[114]指出降低养殖密度(10~20 kg/m³)和改善水质是防治疾病的关键措施, 也可在饲料中添加抗应激物质(如益生菌、脂多糖、抗坏血酸), 并加强细菌疫苗的开发。Liu等^[116]报道在约2.0 BL/s (BL为体长, body length)条件下(流速19.2 cm/s)进行有氧运动训练, 可提高齐口裂腹鱼幼鱼的生长性能、有效提高其对嗜水气单胞菌的先天免疫反应和抗病性。张桓桥等^[117]筛选到对维氏气单胞菌具有较好体外抑制效果的中草药苏木、五倍子、地榆、黄芩、诃子、黄连, 其复方中草药的质量比为5:4:4:3:2:1。

真菌性疾病 裂腹鱼类养殖过程中的真菌性疾病以水霉病感染率最高, 主要感染死卵或体表受伤组织, 形成棉絮状的灰白色覆盖物, 水霉和绵霉是引发该病的最常见病原体。对于水霉病的防治, 可用2%~5%氯化钠溶液浸泡病鱼3~5 min^[108]。陈美群等^[118]指出养殖过程中患皮肤病的异齿裂腹鱼和拉萨裸裂尻鱼皮肤充血溃烂, 出现灰白色斑块, 并附着白色绒毛状霉菌, 对其病灶部位进行分离, 分别得到71株细菌和45株真菌以及41株细菌和18株真菌。

可见, 裂腹鱼类皮肤病潜在的病原微生物较为复杂, 可能是细菌和真菌双重感染的结果。

5 营养价值及加工利用

5.1 营养价值

裂腹鱼类蛋白含量高、肉质细嫩、易加工, 富含氨基酸、不饱和脂肪酸、矿物质和维生素, 是营养丰富、味道鲜美的营养保健水产品^[7-11]。齐口裂腹鱼和青海湖裸鲤均属于优质蛋白, 其肌肉蛋白含量较高, 含有丰富的必需氨基酸与鲜味氨基酸。齐口裂腹鱼肌肉蛋白质含量为 16.7%, 必需氨基酸、鲜味氨基酸和谷氨酸含量分别占氨基酸总量的 47.9%、35.2% 和 14.6%, 多不饱和脂肪酸含量占脂肪酸总量的 19.9%^[7]。青海湖裸鲤肌肉粗蛋白含量为 17.3%~18.9%, 粗脂肪含量为 1.5%~3.4%; 18 种氨基酸总量 15.5%~17.2%, 其中必需氨基酸 (除色氨酸) 总量 6.4%~7.1%, 鲜味氨基酸总量 5.8%~6.5%; 必需氨基酸占氨基酸总量百分比大于 41%, 必需氨基酸/非必需氨基酸为 70% 左右, 均超过了 FAO/WHO 提出的标准^[9]。

青海湖裸鲤还富含多种功能性脂肪酸。研究表明, 青海湖裸鲤鱼油占可食用部分 25.1%, 鱼油中共提取和鉴定直链、单支链、多支链饱和和脂肪酸, 单不饱和、多不饱和脂肪酸, 以及呋喃基和环丙烷基脂肪酸等 47 种脂肪酸, 含有多种不常见的奇数碳链脂肪酸。饱和脂肪酸中中等长度碳链的脂肪酸比例较高, 比长链脂肪酸更具保健营养价值。多不饱和脂肪酸含量为 25.4%, 以二十碳五烯酸 (EPA, 9.4%) 和二十二碳六烯酸 (DHA, 6.7%) 比例最高^[119]。多不饱和脂肪酸具有促进脑神经系统发育、降血脂、预防心血管疾病和癌症等功效。青海湖裸鲤多不饱和脂肪酸含量接近深海鱼油, 具备替代深海鱼油的可能性, 有助于促进裂腹鱼类种质资源的综合利用与深度开发。

5.2 贮藏及加工

裂腹鱼类由于味道鲜美, 富含必需氨基酸和多不饱和脂肪酸, 深得人们喜爱, 但目前相关产品以鲜销为主。齐口裂腹鱼养殖和开发利用较早, 相关产品除了鲜销外, 还被加工成鱼糜产品和鱼罐头等^[120]。裂腹鱼类产品的肌肉品

质变化、贮藏期和保鲜剂使用也引起学者们的广泛关注^[120-121]。王文娟等^[121]研究齐口裂腹鱼保鲜肉滴水损失率和冷冻肉渗出损失率随时间的变化规律, 建立挥发性盐基氮含量、硫代巴比妥酸值与贮藏时间和温度的动力学模型, 并对贮藏过程中的品质变化及适宜货架期进行了预测。由于鱼糜产品方便、营养和适口, 需求量很大。Xiao 等^[120]研究了不同浓度比例的壳聚糖和姜黄素对齐口裂腹鱼鱼糜储存质量的影响, 研究表明, 壳聚糖浓度为 0.36% 时, 两种保鲜剂混合对鱼糜具有显著的保鲜效果, 可延缓鱼糜的物理和化学变化, 并将其在 -3 °C 下的保质期延长至 10 d。

裂腹鱼类蕴含的生物活性成分和保健功效也正逐步被开发。鱼蛋白水解产生的蛋白水解物和抗氧化活性肽, 很容易被人体吸收和利用, 可作为营养补充剂。鱼蛋白水解产物可作为药品或配料应用于功能食品行业, 也可作为天然肉风味的调味基料用于复合调味品中^[122]。谢开梅^[123]用响应面法优化鱼肉水解工艺, 利用不同蛋白酶水解齐口裂腹鱼肉蛋白, 发现最优水解酶组合是以动物蛋白酶为主, 风味蛋白酶为辅。齐口裂腹鱼肉酶解产物还原力和超氧阴离子自由基清除能力表现出较强的抗氧化性^[123]。以裂腹鱼类鱼肉蛋白为原料制备抗氧化活性肽, 对保健食品的开发和裂腹鱼类蛋白利用率的提高都具有极其重要的意义。

随着裂腹鱼类养殖产量不断增加, 在其加工过程中也产生了一些下脚料。提取鱼皮中的胶原蛋白, 可充分利用鱼类资源, 增加鱼类生产的附加值。研究表明, 选用乙酸提取齐口裂腹鱼皮中的胶原蛋白, 经过优化提取工艺, 其胶原蛋白提取率可达 67.3%, 并保存了胶原蛋白三螺旋结构的完整性^[124-125]。因此, 裂腹鱼类下脚料可替代陆生动物 (牛皮、猪皮等) 来提取胶原蛋白, 广泛应用于各行业, 从而促进其精深加工业的发展。

6 总结与展望

裂腹鱼类是我国的宝贵水产种质资源, 不仅是研究多倍体鱼类演化和高原适应机制的重要科研材料^[1], 也是高蛋白低脂肪的优质水产品, 对促进当地水产养殖业的发展具有重大意

义。经过几十年的不懈努力,我国科研人员在裂腹鱼类种质资源保护与利用方面总结形成了大量宝贵的科研成果,但也存在着一些不足。

6.1 种质资源保护

尽管对裂腹鱼类采取了一些保护措施,其自然种群恢复与保护现状仍不理想,水产种质资源保护区的保护效果也有待评估。随着人工繁育技术的不断突破,裂腹鱼类增殖放流在青藏高原及周边地区已经广泛开展,对自然种群有一定恢复。然而,无序的放流可能存在一定的遗传同质化风险,需对放流种群进行遗传多样性的分析,放流苗种的存活情况也需开展规范的监测与效果评估^[6]。禁渔无疑是目前效果最显著也是最直接的保护措施,但在实施禁捕的水域,其鱼类增殖放流量是否应该有所减少。而放流量减少的科学依据取决于禁渔效果和增殖放流效果的双重评估。

鱼类资源的保护和恢复是一项长期而复杂的工作,需要全面开展禁捕后全流域鱼类资源监测与评估,以便掌握其生态环境承载力和渔业资源恢复状况^[126]。完善种质资源保护区的建设和管理已成为禁渔后裂腹鱼类保护研究和规划的首要措施。建议根据种质资源保护区不同保护对象的栖息地特征及其濒危程度,从自然流域的角度分析其空间布局、功能区划分以及保护对象设置的合理性,以期为优化保护区提供科学依据,更加有效地保护裂腹鱼类资源。人工增殖放流建议优化调整放流种类和数量,增加濒危裂腹鱼类的放流比例。放流前应对放流水域进行本底调查,了解其生态容量、生态结构、食物链构成,以确定适宜放流区域、放流物种、放流规格和放流数量。放流后加强跟踪监测和效果评估,实时调整放流地点、时间和数量,保证最佳放流效果,并通过分子标记对放流鱼类开展遗传多样性评价^[126],同时应注意防止流域之间交叉放流,以避免不同地理种群间遗传分化减弱。

综上,有必要将水产种质资源保护区、人工增殖放流和全面禁渔政策有机结合,从而有效开展裂腹鱼类野生资源的恢复与保护工作,最终形成就地保护、迁地保护、增殖放流和遗传多样性保护等完整的裂腹鱼类多样性保护体系^[126]。

6.2 种质资源利用

目前我国裂腹鱼类的人工繁殖、养殖技术日益成熟。然而,裂腹鱼类养殖仍然没有专用的人工配合饲料,养殖户多采用大宗淡水鱼或其他冷水鱼类的专用饲料,由于该饲料不符合自身营养需求,可能使其营养失衡,并增加养殖成本。同时,繁殖和养殖过程中仍频繁遭受各种疾病的侵袭,而目前治疗方式主要参考其他鱼类的防治经验,针对裂腹鱼类的抗病机理研究较少。由于累代人工繁殖和养殖集约化,裂腹鱼类种质资源出现不同程度的退化,表现为生长缓慢、个体小型化和抗病力弱等问题,因此有必要开展与其生长、抗逆和抗病性状的SNPs关联分析,并有针对性的应用于裂腹鱼类的分子育种工作中。

裂腹鱼类属于高蛋白低脂肪的高端水产品,富含必需氨基酸、鲜味氨基酸和多不饱和脂肪酸,其生物活性成分具有良好的保健功效。但由于现阶段产业发展和科研投入的综合影响,裂腹鱼类的养殖规模仍然较小,产品加工也处于起步阶段。尽管目前齐口裂腹鱼已研发出少量产品,但也仅限于狭小的地方市场,未来其开发利用的广度和深度仍需大力加强,充分发挥其作为优良种质资源的特质。后期建议以齐口裂腹鱼和青海湖裸鲤为优先开发对象,开展良种选育、专用饲料和疫苗研制以及产品深加工,切实有效地推动裂腹鱼类的开发利用,并实施裂腹鱼类产业化经营,加强和完善苗种、饲料、技术以及加工销售等环节的社会化服务体系,确保我国裂腹鱼类养殖产业的健康有序发展。

参考文献 (References):

- [1] 马宝珊,魏开金,赵天一,等.裂腹鱼类系统进化及高原适应性研究进展[J].湖泊科学,2023,35(3):808-820.
Ma B S, Wei K J, Zhao T Y, *et al.* Research progress on the systematic evolution and plateau adaptation of schizothoracine fishes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 808-820 (in Chinese).
- [2] 陈锋,陈毅峰.拉萨河鱼类调查及保护[J].水生生物学报,2010,34(2):278-285.
Chen F, Chen Y F. Investigation and protection strategies of fishes of Lhasa River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010,

- 34(2): 278-285 (in Chinese).
- [3] 唐文家, 何德奎. 黄河上游茨哈峡至积石峡段鱼类资源调查 (2005—2010 年)[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 600-608.
Tang W J, He D K. Fish resource survey on Cihaxia to Jishixia stretches in the upper reaches of Yellow River (2005-2010)[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(4): 600-608 (in Chinese).
- [4] 谢从新, 霍斌, 魏开建, 等. 雅鲁藏布江中游裂腹鱼类生物学与资源保护 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Xie C X, Huo B, Wei K J, *et al.* Biology and resource conservation of Schizothoracinae fishes in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River[M]. Beijing: Science Press, 2019 (in Chinese).
- [5] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 中国脊椎动物红色名录 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(5): 500-551.
Jiang Z G, Jiang J P, Wang Y Z, *et al.* Red list of China's vertebrates[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(5): 500-551 (in Chinese).
- [6] 蒋万胜, 兰香英, 王金秀, 等. 中国大鲵种质资源保护与利用研究进展 [J]. *水产学报*, 2022, 46(4): 683-705.
Jiang W S, Lan X Y, Wang J X, *et al.* Recent progress in the germplasm resources conservation and utilization of the Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(4): 683-705 (in Chinese).
- [7] 周兴华, 郑曙明, 吴青, 等. 齐口裂腹鱼肌肉营养成分的分析 [J]. *大连水产学院学报*, 2005, 20(1): 20-24.
Zhou X H, Zheng S M, Wu Q, *et al.* An analysis of the nutritive composition in muscle of prenatant's schizothoracin *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2005, 20(1): 20-24 (in Chinese).
- [8] 周兴华, 向泉, 陈建. 重口裂腹鱼肌肉营养成分的分析 [J]. *营养学报*, 2006, 28(6): 536-537.
Zhou X H, Xiang X, Chen J. Analysis of the nutritional components in muscle of *Schizothorax (Racoma) davidi* (Sauvage)[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2006, 28(6): 536-537 (in Chinese).
- [9] 魏振邦, 史建全, 孙新, 等. 6 个地区青海湖裸鲤肌肉营养成分分析 [J]. *动物学杂志*, 2008, 43(1): 96-101.
Wei Z B, Shi J Q, Sun X, *et al.* Analysis of muscle nutritional components of *Gymnocypris przewalskii* in six regions[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2008, 43(1): 96-101 (in Chinese).
- [10] 邓君明, 张曦, 龙晓文, 等. 三种裂腹鱼肌肉营养成分分析与评价 [J]. *营养学报*, 2013, 35(4): 391-393.
Deng J M, Zhang X, Long X W, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional composition in muscle of three *Schizothorax* species[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2013, 35(4): 391-393 (in Chinese).
- [11] 陈美群, 谭猛, 刘海平. 西藏两种裂腹鱼鱼肉肉质构特征比较分析 (英文)[J]. *水生生物学报*, 2018, 42(6): 1224-1231.
Chen M Q, Tan M, Liu H P. Texture analyses of two Schizothoracinae fishes in Xizang Autonomous Region, China[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, 42(6): 1224-1231 (in Chinese).
- [12] 陈毅峰, 曹文宣. 裂腹鱼亚科 [M]//乐佩奇. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目 (下卷). 北京: 科学出版社, 2000: 273-388.
Chen Y F, Cao W X. Schizothoracinae [M]//Yue P Q. *Fauna Sinica-Osteichthyes-Cypriniformes III*. Beijing: Science Press, 2000: 273-388 (in Chinese).
- [13] Petr T. Mountain fisheries in developing countries[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003.
- [14] Ma B S, Xie C X, Huo B, *et al.* Age and growth of a long-lived fish *Schizothorax oconnori* in the Yarlung Tsangpo River, Tibet[J]. *Zoological Studies*, 2010, 49(6): 749-759.
- [15] Huo B, Xie C X, Ma B S, *et al.* Age and growth of *Oxygymnocypris stewartii* (Cyprinidae: Schizothoracinae) in the Yarlung Tsangpo River, Tibet, China[J]. *Zoological Studies*, 2012, 51(2): 185-194.
- [16] Zhou X J, Xie C X, Huo B, *et al.* Age and growth of *Schizothorax waltoni* (Cyprinidae: Schizothoracinae) in the Yarlung Tsangpo River, China[J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2017, 45(1): 346-354.
- [17] Zhou X J, Xie C X, Huo B, *et al.* Reproductive biology of *Schizothorax waltoni* (Cyprinidae: Schizothoracinae) in the Yarlung Zangbo River in Tibet, China[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2015, 98(2): 597-609.
- [18] Duan Y J, Huo B, Ma B S, *et al.* Reproductive biology of *Schizopygopsis younghusbandi* Regan 1905 (Cyprinidae: Schizothoracinae) in the middle reaches of Yarlung Tsangpo River, China[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(5): 1825-1834.
- [19] Ma B S, Chu Z P, Zhou R H, *et al.* Longitudinal patterns of fish assemblages in relation to environmental factors in the Anning River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109864.
- [20] 霍斌, 李大鹏, 刘香江, 等. 西藏巴松错渔业资源与环境研究 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
Huo B, Li D P, Liu X J, *et al.* Research on fishery resources and fishery environment in Basungko, Xizang[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023 (in Chinese).
- [21] 曹文宣, 陈宜瑜, 武云飞, 等. 裂腹鱼类的起源和演化及其与

- 青藏高原隆起的关系 [M]//中国科学院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题. 北京: 科学出版社, 1981: 118-130.
- Cao W X, Chen Y Y, Wu Y F, *et al.* The origin and evolution of schizothoracids and its relationship with the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau[M]//Qinghai-Xizang Plateau Comprehensive Scientific Expedition, Chinese Academy of Sciences. The era, amplitude and form of the Qinghai-Xizang Plateau uplift. Beijing: Science Press, 1981: 118-130 (in Chinese).
- [22] 武云飞, 吴翠珍. 青藏高原鱼类 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1992.
- Wu Y F, Wu C Z. The Fishes of the Qinghai-Xizang Plateau[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1992 (in Chinese).
- [23] 马燕武, 郭焱, 张人铭, 等. 新疆塔里木河水系土著鱼类区系组成与分布 [J]. 水产学报, 2009, 33(6): 949-956.
- Ma Y W, Guo Y, Zhang R M, *et al.* Fauna composition and distribution of aboriginal fish in the Tarim River of Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(6): 949-956 (in Chinese).
- [24] 农业部渔业局. 国家级水产种质资源保护区资料汇编 (第一批)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- Fisheries Bureau of MOA. Data compilation of national aquatic germplasm resources reserves, (I) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (in Chinese).
- [25] 农业部渔业局. 国家级水产种质资源保护区资料汇编 (第二批)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- Fisheries Bureau of MOA. Data compilation of national aquatic germplasm resources reserves, (II) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (in Chinese).
- [26] 农业部渔业局. 国家级水产种质资源保护区资料汇编 (第三批)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- Fisheries Bureau of MOA. Data compilation of national aquatic germplasm resources reserves, (III) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (in Chinese).
- [27] 农业部渔业局. 国家级水产种质资源保护区资料汇编 (第四批)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- Fisheries Bureau of MOA. Data compilation of national aquatic germplasm resources reserves, (IV) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (in Chinese).
- [28] 农业部渔业局. 国家级水产种质资源保护区资料汇编 (第五批)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- Fisheries Bureau of MOA. Data compilation of national aquatic germplasm resources reserves, (V) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (in Chinese).
- [29] 农业部办公厅. 农业部办公厅关于公布第六批国家级水产种质资源保护区面积范围和功能分区的通知 [EB/OL]. (2013-06-17)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201307/t20130717_3528743.htm.
- General Office of MOA. The notice of sixth batch of national aquatic germplasm resources reserve area and function partition [EB/OL]. (2013-06-17)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201307/t20130717_3528743.htm (in Chinese).
- [30] 农业部办公厅. 农业部办公厅关于公布第七批国家级水产种质资源保护区面积范围和功能分区的通知 [EB/OL]. (2014-07-22)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201410/t20141027_4115713.htm.
- General Office of MOA. The notice of seventh batch of national aquatic germplasm resources reserve area and function partition [EB/OL]. (2014-07-22)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201410/t20141027_4115713.htm (in Chinese).
- [31] 农业部办公厅. 农业部办公厅关于公布第八批国家级水产种质资源保护区面积范围和功能分区的通知 [EB/OL]. (2015-06-25)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201506/t20150625_4718745.htm.
- General Office of MOA. The notice of eighth batch of national aquatic germplasm resources reserve area and function partition [EB/OL]. (2015-06-25)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201506/t20150625_4718745.htm (in Chinese).
- [32] 农业部办公厅. 农业部办公厅关于公布第九批国家级水产种质资源保护区面积范围和功能分区的通知 [EB/OL]. (2016-09-07)[2023-05-01]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201609/t20160907_5268189.htm.
- General Office of MOA. The notice of ninth batch of national aquatic germplasm resources reserve area and function partition [EB/OL]. (2016-09-07)[2023-05-01]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201609/t20160907_5268189.htm (in Chinese).
- [33] 农业部办公厅. 农业部办公厅关于公布第十批国家级水产种质资源保护区面积范围和功能分区的通知 [EB/OL]. (2017-10-31)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201711/t20171109_5865406.htm.
- General Office of MOA. The notice of tenth batch of national aquatic germplasm resources reserve area and function partition [EB/OL]. (2017-10-31)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201711/t20171109_5865406.htm (in Chinese).

- [34] 农业农村部办公厅. 农业农村部办公厅关于公布第十一批国家级水产种质资源保护区面积范围和功能分区的通知[EB/OL]. (2018-11-06)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201811/t20181108_6162599.htm.
General Office of MOA. The notice of tenth batch of national aquatic germplasm resources reserve area and function partition[EB/OL]. (2018-11-06)[2023-05-01]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201811/t20181108_6162599.htm (in Chinese).
- [35] 盛强, 茹辉军, 李云峰, 等. 中国国家级水产种质资源保护区分布格局现状与分析[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 62-80.
Sheng Q, Ru H J, Li Y F, et al. The distribution pattern of national aquatic germplasm reserves in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(1): 62-80 (in Chinese).
- [36] 朱挺兵, 刘海平, 李学梅, 等. 西藏鱼类增殖放流初报[J]. 淡水渔业, 2017, 47(5): 34-39.
Zhu T B, Liu H P, Li X M, et al. A preliminary review of fish stock enhancement in Xizang, China[J]. Freshwater Fisheries, 2017, 47(5): 34-39 (in Chinese).
- [37] 陈大庆, 熊飞, 史建全, 等. 青海湖裸鲤研究与保护[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Chen D Q, Xiong F, Shi J Q, et al. Research and protection of *Gymnocypris przewalskii przewalskii*[M]. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese).
- [38] 杨月静, 向梦斌, 叶祥益, 等. 齐口裂腹鱼 SNP 标记与生长性状的关联分析[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 278-285.
Yang Y J, Xiang M B, Ye X Y, et al. Association analysis between SNP markers and growth-related traits in *Schizothorax prenanti*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 278-285 (in Chinese).
- [39] Xiao S J, Mou Z B, Fan D D, et al. Genome of tetraploid fish *Schizothorax oconnori* provides insights into early re-diploidization and high-altitude adaptation[J]. iScience, 2020, 23(9): 101497.
- [40] Tian F, Liu S J, Zhou B Z, et al. Chromosome-level genome of Tibetan naked carp (*Gymnocypris przewalskii*) provides insights into Tibetan highland adaptation[J]. DNA Research, 2022, 29(4): dsac025.
- [41] Wang F Y, Wang L H, Liu D, et al. Chromosome-level assembly of *Gymnocypris eckloni* genome[J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 464.
- [42] Liu H P, Xiao S J, Wu N, et al. The sequence and *de novo* assembly of *Oxygymnocypris stewartii* genome[J]. Scientific Data, 2019, 6(1): 190009.
- [43] Niu J G, Zhang R M, Hu J W, et al. Chromosomal-scale genome assembly of the near-extinction big-head schizothorcin (*Aspiorhynchus laticeps*)[J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 556.
- [44] Luo H, Ye H, Xiao S J, et al. Development of SNP markers associated with immune-related genes of *Schizothorax prenanti*[J]. Conservation Genetics Resources, 2016, 8(3): 223-226.
- [45] Luo H, Xiao S J, Ye H, et al. Identification of immune-related genes and development of SSR/SNP markers from the spleen transcriptome of *Schizothorax prenanti*[J]. PLoS One, 2016, 11(3): e0152572.
- [46] Zhou J, Zhou B, Li Q, et al. Isolation and characterization of 33 EST-SNP markers in *Schizothorax prenanti*[J]. Conservation Genetics Resources, 2018, 10(2): 205-207.
- [47] Ma J J, Zhang R X, Zhao W, et al. SNP marker development and polymorphism detection of *Schizothorax waltoni*[J]. Conservation Genetics Resources, 2020, 12(2): 199-203.
- [48] 产久林, 姜华鹏, 刘一萌, 等. CO I 和 16S rRNA 基因在高原裂腹鱼物种鉴定中的应用[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(4): 98-104.
Chan J L, Jiang H P, Liu Y M, et al. Application of COI and 16S rRNA gene for identification of Tibetan Plateau *Schizothorax* species[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(4): 98-104 (in Chinese).
- [49] 叶华, 罗辉, 张争世, 等. 齐口裂腹鱼细菌性败血症关联的 SNP 标记及其应用: 106967831A[P]. 2017-07-21.
Ye H, Luo H, Zhang Z S, et al. SNP marker associated with bacterial septicemia of *Schizothorax prenanti* and application of SNP marker: 106967831A[P]. 2017-07-21 (in Chinese).
- [50] 杨天燕, 孟玮, 高天翔, 等. 塔里木裂腹鱼群体的微卫星多态性分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1109-1114.
Yang T Y, Meng W, Gao T X, et al. Genetic polymorphism of microsatellite DNA in *Schizothorax biddulphi* populations[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(6): 1109-1114 (in Chinese).
- [51] 李光华, 金方彭, 周睿, 等. 基于 SNP 标记的短须裂腹鱼自然群体遗传多样性分析[J]. 水生生物学报, 2018, 42(2): 271-276.
Li G H, Jin F P, Zhou R, et al. Genetic diversity analysis of natural population of *Schizothorax wangchiachii* based on SNP markers[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(2): 271-276 (in Chinese).
- [52] 杨鑫, 黄坤, 胡靖蕊, 等. 周公河齐口裂腹鱼种群的遗传多样性和遗传结构[J]. 水生生物学报, 2022, 46(11): 1712-1718.
Yang X, Huang K, Hu J R, et al. Preliminary study on genetic diversity and population structure of *Schizothorax prenanti* from Zhougong River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022,

- 46(11): 1712-1718 (in Chinese).
- [53] 安丹丹, 代应贵, 邹习俊. 基于 AFLP 分析的乌江四川裂腹鱼种群遗传结构及多样性研究 [J]. 渔业科学进展, 2021, 42(4): 39-45.
- An D D, Dai Y G, Zou X J. AFLP analysis of genetic structure and diversity in population of *Schizothorax kolzovi* from the Wujiang River[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(4): 39-45 (in Chinese).
- [54] Fang D A, Luo H, He M, *et al.* Genetic diversity and population differentiation of naked carp (*Gymnocypris przewalskii*) revealed by cytochrome oxidase subunit I and D-loop[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 827654.
- [55] Guo X Z, Zhang G R, Wei K J, *et al.* Phylogeography and population genetics of *Schizothorax o'connori*: strong subdivision in the Yarlung Tsangpo River inferred from mtDNA and microsatellite markers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29821.
- [56] Yu M C, Zhang D S, Hu P, *et al.* Divergent adaptation to Qinghai-Tibetan Plateau implicated from transcriptome study of *Gymnocypris dobula* and *Schizothorax nukiangensis*[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2017, 71: 97-105.
- [57] Zhou J S, Wang W L, Li Z C, *et al.* Metabolome and transcriptome analysis of liver and oocytes of *Schizothorax oconnori* raised in captivity[J]. *Frontiers in Genetics*, 2021, 12: 677066.
- [58] Li R W, Zhang R F, Yi J Y, *et al.* Characterization and expression profiles of muscle transcriptome in Schizothoracine fish, *Schizothorax prenanti*[J]. *Gene*, 2019, 685: 156-163.
- [59] Ye H, Xiao S J, Wang X Q, *et al.* Characterization of spleen transcriptome of *Schizothorax prenanti* during *Aeromonas hydrophila* infection[J]. *Marine Biotechnology*, 2018, 20(2): 246-256.
- [60] 段荟芹, 王利. 齐口裂腹鱼 *CDHS* 基因特性及其对温和气单胞菌感染的应答 [J]. 生物技术通报, 2017, 33(3): 162-168.
- Duan H Q, Wang L. Characteristics of gene *CDHS* in *Schizothorax prenanti* and its response to *Aeromonas sobria* infection[J]. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(3): 162-168 (in Chinese).
- [61] 王虹, 彭爽, 刘佳喜, 等. 齐口裂腹鱼 *HMGB1* 基因克隆及其对嗜水气单胞菌胁迫的响应 [J]. 水产学报, 2018, 42(12): 1957-1966.
- Wang H, Peng S, Liu J X, *et al.* Cloning of *HMGB1* gene from *Schizothorax prenanti* and its response to *Aeromonas hydrophila* stress[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(12): 1957-1966 (in Chinese).
- [62] 陈德芳, 芦路, 蒲云丹, 等. 齐口裂腹鱼 *Hsp60* cDNA 克隆及其在无乳链球菌感染中的 mRNA 表达 [J]. 水产学报, 2022, 46(9): 1680-1688.
- Chen D F, Lu L, Pu Y D, *et al.* Cloning and mRNA expression analysis of *Schizothorax prenanti Hsp60* in *Streptococcus agalactiae* infection[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(9): 1680-1688 (in Chinese).
- [63] 李云坤. 齐口裂腹鱼抗病毒和抗细菌免疫的脾脏转录组分析 [D]. 成都: 四川农业大学, 2017.
- Li Y K. Transcriptome profiling of spleen provides insights into anti-viral and anti-bacteria immunity in *Schizothorax prenanti*[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2017 (in Chinese).
- [64] Du X G, Li Y K, Li D, *et al.* Transcriptome profiling of spleen provides insights into the antiviral mechanism in *Schizothorax prenanti* after poly (I: C) challenge[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 62: 13-23.
- [65] 龚生兴, 胡安. 青海湖裸鲤 [*Gymnocypris przewalskii przewalskii* (Kessler)] 精子寿命和胚胎发育的观察 [M]//青海省生物研究所. 青海湖地区的鱼类区系和青海湖裸鲤的生物学. 北京: 科学出版社, 1975: 65-76.
- Gong S X, Hu A. Observation of sperm longevity and embryonic development in *Gymnocypris przewalskii przewalskii*[M]//Qinghai Institute of Biology. Fish fauna in Qinghai Lake area and biology of *Gymnocypris przewalskii*. Beijing: Science Press, 1975: 65-76 (in Chinese).
- [66] 陈永祥, 罗泉笙. 乌江上游四川裂腹鱼幼鱼发育的观察 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 1997, 14(2): 106-109.
- Chen Y X, Luo Q S. An observation on the development of larva of *Schizothorax kozlovi* in upper reaches of Wu River[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 1997, 14(2): 106-109 (in Chinese).
- [67] 谢春刚, 郭焱, 吐尔逊·提立瓦尔地, 等. 国家一级保护动物扁吻鱼全人工繁殖技术研究 [J]. 中国水产, 2017(2): 96-98.
- Xie C G, Guo Y, Tiliwardi T, *et al.* Research on artificial breeding technology of *Aspiorhynchus laticeps*, a national class protected animal[J]. China Fisheries, 2017(2): 96-98 (in Chinese).
- [68] 周礼敬, 詹会祥, 刘桂兰, 等. 昆明裂腹鱼全人工繁殖技术研究 [J]. 海洋与渔业, 2016(5): 52-55.
- Zhou L J, Zhan H X, Liu G L, *et al.* Study on artificial breeding technology of *Schizothorax grahami*[J]. Ocean and Fishery, 2016(5): 52-55 (in Chinese).
- [69] 姜雨杰, 赵树海, 肖文, 等. 灰裂腹鱼全人工繁殖技术初报 [J]. 大理大学学报, 2018, 3(12): 79-81.

- Jiang Y J, Zhao S H, Xiao W, *et al.* Study on artificial propagation technique of *Schizothorax griseus*[J]. *Journal of Dali University*, 2018, 3(12): 79-81 (in Chinese).
- [70] 青海省生物研究所水生生物研究组, 内蒙古自治区察哈尔右翼后旗鱼种站. 内蒙古自治区察哈尔右翼后旗的青海湖裸鲤 [J]. *淡水渔业*, 1976, 6(10): 6-10.
- Aquatic Biology Research Group of Qinghai Institute of Biology, Fish Species Station in Chahar Right Back Banner, Inner Mongolia Autonomous Region. *Gymnocypris przewalskii przewalskii kessler* in Qahar Youyi Houqi of Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Freshwater Fisheries*, 1976, 6(10): 6-10 (in Chinese).
- [71] Wu H, Li M H, Zeng R K, *et al.* Substrate type and brightness preference of *Schizothorax wangchiachii* and *Percocypris pingi* juveniles[J]. *Aquaculture Research*, 2020, 51(7): 2790-2798.
- [72] Bai Y Q, Lin C Y, Huang X L, *et al.* Investigation and preliminary laboratory study on substrate preference of *Schizothorax lantsangensis*[J]. *River Research and Applications*, 2022, 38(1): 131-137.
- [73] 周杨浩, 吴艳红, 张平梅, 等. 人工模拟产卵环境中青海湖裸鲤的繁殖行为 [J]. *水生生物学*, 2021, 45(5): 1120-1128.
- Zhou Y H, Wu Y H, Zhang P M, *et al.* Reproductive behaviors of *Gymnocypris przewalskii* in artificial mimic spawning environments[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(5): 1120-1128 (in Chinese).
- [74] 金方彭, 郭祖锋, 周睿, 等. 澜沧江光唇裂腹鱼池塘养殖水质理化因子高低温季节变化研究 [J]. *现代农业科技*, 2014(24): 263-265,269.
- Jin F P, Guo Z F, Zhou R, *et al.* Research on change of physical and chemical factors of *Schizothorax lissolabius* tsao pond aquaculture water quality in high and low temperature seasons in Lancang River[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(24): 263-265,269 (in Chinese).
- [75] 王金林, 潘瑛子. 不同环境因子对拉萨裸裂尻鱼受精卵孵化的影响 [J]. *高原科学研究*, 2022, 6(1): 40-47.
- Wang J L, Pan Y Z. Effects of different environmental factors on the incubation of fertilized eggs of *Schizopygopsis youngusbandi* Regan[J]. *Plateau Science Research*, 2022, 6(1): 40-47 (in Chinese).
- [76] 曾本和, 方媛林, 何文佳, 等. 振动和水流对拉萨裸裂尻鱼受精卵孵化性能的影响 [J]. *高原科学研究*, 2022, 6(3): 37-44.
- Zeng B H, Fang Y L, He W J, *et al.* Effects of vibration and water low on hatching performance of *Schizopygopsis Youngusbandi* fertilized eggs[J]. *Plateau Science Research*, 2022, 6(3): 37-44 (in Chinese).
- [77] 秦希获, 刘国勇, 鄢玉娇, 等. 光照对细鳞裂腹鱼受精卵孵化率及仔鱼生长、摄食的影响 [J]. *水生生态学杂志*, 2017, 38(5): 97-102.
- Qin X H, Liu G Y, Wu Y J, *et al.* Effects of light intensity on the hatching rate of fertilized *Schizothorax chongi* eggs and on the growth and feeding of larvae[J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, 38(5): 97-102 (in Chinese).
- [78] 吴青, 蔡礼明, 陆建平, 等. 齐口裂腹鱼幼鱼对水温 and 溶解氧的耐受力研究 [J]. *四川畜牧兽医学院学报*, 2001, 15(3): 20-22,53.
- Wu Q, Cai L M, Lu J P, *et al.* Studies on the tolerance ability of young *Schizothorax prenanti* to variance of the water temperature and dissolved oxygen[J]. *Journal of Sichuan Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2001, 15(3): 20-22,53 (in Chinese).
- [79] 蔡露, 房敏, 林少明, 等. 溶氧对齐口裂腹鱼幼鱼呼吸代谢的影响 [J]. *三峡大学学报 (自然科学版)*, 2013, 35(1): 81-84.
- Cai L, Fang M, Lin S M, *et al.* Effect of dissolved oxygen on respiratory metabolism of juvenile *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Science Edition)*, 2013, 35(1): 81-84 (in Chinese).
- [80] 韩京成, 曹婷婷, 刘国勇, 等. 温度和流速对齐口裂腹鱼幼鱼呼吸代谢的影响 [J]. *武汉大学学报 (理学版)*, 2010, 56(1): 81-86.
- Han J C, Cao T T, Liu G Y, *et al.* Effects of temperature and flow velocity on the respiratory metabolism of *Schizothorax prenanti* juveniles[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2010, 56(1): 81-86 (in Chinese).
- [81] 郭鹤. 温度驯化对齐口裂腹鱼热耐受和生长代谢的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- Guo H. Effects of temperature acclimation on the heat tolerance and growth metabolism in *Schizothorax prenanti*[D]. Chongqing: Southwest University, 2019 (in Chinese).
- [82] Li S, Guo H, Chen Z Y, *et al.* Effects of acclimation temperature regime on the thermal tolerance, growth performance and gene expression of a cold-water fish, *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2021, 98: 102918.
- [83] 赵年桦, 赵贺, 强壮, 等. 水温、光周期和光照强度对塔里木裂腹鱼幼鱼存活、摄食和生长的影响及其盐碱耐受能力研究 [J]. *南方水产科学*, 2021, 17(5): 54-63.
- Zhao N H, Zhao H, Qiang Z, *et al.* Effects of water temperature, photoperiod and light intensity on survival, feeding and growth of *Schizothorax biddulphi* juveniles and their tolerance of salinity and alkalinity[J]. *South China Fisheries Sci-*

- ence, 2021, 17(5): 54-63 (in Chinese).
- [84] Wang C, Xie S Q, Zheng H T, *et al.* Effects of feeding frequency on the growth, body composition and SOD, GPX and HSP70 gene expression in *Schizothorax wangchiachi*[J]. *Aquaculture Reports*, 2022, 22: 100942.
- [85] Barani H K, Dahmardeh H, Miri M, *et al.* The effects of feeding rates on growth performance, conversion efficiency and body composition of juvenile snow trout, *Schizothorax zarudnyi*[J]. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 2019, 18(3): 507-516.
- [86] 许家炜, 陈静, 林晨宇, 等. 齐口裂腹鱼在低照度下的趋光行为[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(8): 2394-2402.
- Xu J W, Chen J, Lin C Y, *et al.* The phototaxis behavior of *Schizothorax prenanti* in low light intensity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(8): 2394-2402 (in Chinese).
- [87] Xu J W, Lin C Y, Dai H C, *et al.* Influence of low-intensity light on phototactic behaviour of *Schizothorax oconori* Lloyd[J]. *River Research and Applications*, 2020, 36(2): 296-304.
- [88] 邵俭, 谢从新, 许静, 等. 不同饵料对 3 种西藏鱼类仔鱼生长及存活的影响[J]. *淡水渔业*, 2012, 42(6): 49-53.
- Shao J, Xie C X, Xu J, *et al.* Effects of different diets on growth and survival of three species of Tibetan fish larvae[J]. *Freshwater Fisheries*, 2012, 42(6): 49-53 (in Chinese).
- [89] 吴兴兵, 杨德国, 朱永久, 等. 不同开口饵料对四川裂腹鱼仔鱼生长和成活率的影响[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(6): 9-12,23.
- Wu X B, Yang D G, Zhu Y J, *et al.* Effects of initial feeding on the growth and survival of *Schizothorax kozlovi* Nikolsky larvae[J]. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(6): 9-12,23 (in Chinese).
- [90] 曾本和, 王万良, 张驰, 等. 不同开口饲料及投喂频率对拉萨裂腹鱼仔鱼存活和生长的影响[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(4): 38-43.
- Zeng B H, Wang W L, Zhang C, *et al.* Effects of different micro diets and feeding frequency on survival and growth of larvae of *Schizothorax waltoni*[J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(4): 38-43 (in Chinese).
- [91] 周兴华, 郑曙明, 吴青, 等. 齐口裂腹鱼幼鱼饲料中营养素适宜含量和最适能量蛋白比的研究[J]. *大连水产学院学报*, 2007, 22(1): 37-41.
- Zhou X H, Zheng S M, Wu Q, *et al.* The optimum nutrient requirements and energy protein ratio in formulated feed in juvenile *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2007, 22(1): 37-41 (in Chinese).
- [92] 段彪, 向泉, 吴青. 齐口裂腹鱼日粮中钙和磷及适宜钙磷比的研究[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 27(2): 219-222.
- Duan B, Xiang X, Wu Q. Optimum P and Ca contents and Ca : P ratio in the diets for *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2005, 27(2): 219-222 (in Chinese).
- [93] 宁毅. 重口裂腹鱼幼鱼日粮中蛋白质、脂肪和碳水化合物需求量研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- Ning Y. Optimal macronutrient composition of formulated diets for David's Schizothoracin [*Schizothorax (Racoma) davidi*] juveniles[D]. Nanning: Guangxi University, 2013 (in Chinese).
- [94] 李同庆, 刘芸嘉, 曹杰英, 等. 不同蛋白水平饵料对青海湖裸鲤能量收支的影响[J]. *河北渔业*, 2011(12): 20-23.
- Li T Q, Liu Y J, Cao J Y, *et al.* Effects of diets with different protein levels on energy budget of *Gymnocypris przewalskii*[J]. *Hebei Fisheries*, 2011(12): 20-23 (in Chinese).
- [95] 师园. 人工养殖青海湖裸鲤幼鱼蛋白质和能量需要量的研究[D]. 西宁: 青海大学, 2015.
- Shi Y. Study of protein and energy requirements' of juvenile naked carp (*Gymnocypris przewalskii*) in Qinghai Lake[D]. Xining: Qinghai University, 2015 (in Chinese).
- [96] Meng Y Q, Li C Z, Qin Q W, *et al.* Dietary lipid levels affect the growth performance, lipid deposition, and antioxidative capacity of juvenile scaleless carp, *Gymnocypris przewalskii*, on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2018, 49(4): 788-797.
- [97] 曾本和, 张竹忪, 刘海平, 等. 饲料蛋白质水平对拉萨裸裂尻鱼幼鱼生长、饲料利用、形体指标和肌肉营养成分的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(3): 1231-1239.
- Zeng B H, Zhang B B, Liu H P, *et al.* Effects of dietary protein level on growth, feed utilization, morphology parameters and muscle nutritional components of *Schizopygopsis younghusbandi younghusbandi* Regan[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(3): 1231-1239 (in Chinese).
- [98] 徐兆利, 曾本和, 杨瑞斌, 等. 饲料蛋白质水平对拉萨裸裂尻鱼幼鱼免疫和抗氧化能力的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(12): 5645-5654.
- Xu Z L, Zeng B H, Yang R B, *et al.* Effects of dietary protein level on immune and antioxidant capacity of juvenile *Schizopygopsis younghusbandi younghusbandi* Regan[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(12): 5645-5654 (in Chinese).
- [99] Zeng B H, Wang W L, Dong Y W. Dietary protein requirement of the high altitude's representative teleost juveniles

- Schizopygopsis younghusbandi* (Cypriniformes: Cyprinidae) [J]. *Aquaculture Research*, 2020, 51(7): 2852-2862.
- [100] 曾本和, 向泉, 周兴华, 等. 高脂饲料中胆汁酸水平对齐口裂腹鱼肠道组织结构及脂肪代谢酶活性的影响 [J]. *水产学报*, 2016, 40(9): 1340-1348.
- Zeng B H, Xiang X, Zhou X H, *et al.* Effect of bile acid level in high lipid diet on the intestinal structure and lipid metabolic enzymes activities of juvenile *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(9): 1340-1348 (in Chinese).
- [101] 李彦红, 张飞飞, 黄丽娟, 等. 纳米硒对齐口裂腹鱼生长、肌肉成分、血清生化及抗氧化指标的影响 [J]. *中国水产科学*, 2020, 27(6): 682-691.
- Li Y H, Zhang F F, Huang L J, *et al.* Influence of dietary nano-selenium on growth, muscle composition, and serum biochemical and antioxidant indices of *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(6): 682-691 (in Chinese).
- [102] Zhang L, Wu Y L, Wang L, *et al.* Effects of Oxidized Konjac glucomannan (OKGM) on growth and immune function of *Schizothorax prenanti*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, 35(4): 1105-1110.
- [103] Chen M R, Wang S Y, Liang X, *et al.* Effect of dietary acid-olysis-oxidized konjac glucomannan supplementation on serum immune parameters and intestinal immune-related gene expression of *Schizothorax prenanti*[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(12): 2558.
- [104] Chen M R, Wu Y L, Yan Q P, *et al.* Effects of dietary konjac oligosaccharide supplementation on serum immune parameters and intestinal immunity of *Schizothorax prenanti*[J]. *Fisheries Science*, 2019, 85(1): 157-165.
- [105] 杨理想, 向泉, 周兴华, 等. 核黄素对齐口裂腹鱼生长性能、体组成、免疫及抗氧化能力的影响 [J]. *水产学报*, 2020, 44(5): 836-844.
- Yang L X, Xiang X, Zhou X H, *et al.* Effects of riboflavin on growth performance, body composition, immunity and antioxidant capacity of *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(5): 836-844 (in Chinese).
- [106] Mohan M, Bhanja S K, Basade Y. Performance of chitin incorporated diet on the indigenous Kumaon Himalayan fishes: snow trout, *Schizothorax Richardsonii* (Gray) and golden mahseer, *Tor puitora* (Hamilton)[J]. *Indian Journal of Fisheries*, 2009, 56(2): 135-137.
- [107] 马燕武, 任波, 张人铭, 等. 扁吻鱼鱼苗寄生虫病防治试验 [J]. *水产学杂志*, 2006, 19(1): 43-46.
- Ma Y W, Ren B, Zhang R M, *et al.* Studies on the prevention and cure of parasitosis in *Aspiorhynchus laticeps* offspring[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2006, 19(1): 43-46 (in Chinese).
- [108] 杨光清, 赵树海, 宝建红, 等. 两种裂腹鱼病害防治研究 [J]. *中国水产*, 2015(6): 60-62.
- Yang G Q, Zhao S H, Bao J H, *et al.* Research on disease control of two schizothoracine fishes[J]. *China Fisheries*, 2015(6): 60-62 (in Chinese).
- [109] 马德昭, 田菲, 刘思嘉, 等. 青海湖裸鲤和黄河裸裂尻鱼感染多子小瓜虫的病理学比较研究 [J]. *水生生物学报*, 2019, 43(5): 1081-1091.
- Ma D Z, Tian F, Liu S J, *et al.* The different pathology of *Gymnocypris przewalskii przewalskii* and *Schizopygopsis pylzovi* infected with *Ichthyophthirius multifiliis*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(5): 1081-1091 (in Chinese).
- [110] Mallik S K, Shahi N, Das P, *et al.* Occurrence of *Ichthyophthirius multifiliis* (White spot) infection in snow trout, *Schizothorax richardsonii* (Gray) and its treatment trial in control condition[J]. *Indian Journal of Animal Research*, 2015, 49(2): 227-230.
- [111] 赵静, 王利, 钟红梅. 温和气单胞菌对齐口裂腹鱼血浆中抗氧化酶的影响 [J]. *西南民族大学学报 (自然科学版)*, 2016, 42(6): 621-625.
- Zhao J, Wang L, Zhong H M. Changes of serum antioxidant enzymes in *Schizothorax prenanti* artificially infected with *Aeromonas sobria*[J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2016, 42(6): 621-625 (in Chinese).
- [112] Du Z J, Huang X L, Chen D F, *et al.* Studies on etiology and antimicrobial susceptibility testing of skin ulcer disease in *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 2011, 10(13): 1731-1734.
- [113] 罗辉, 杨月静, 向梦斌, 等. 齐口裂腹鱼感染嗜水气单胞菌后血液生化指标与组织病理学研究 [J]. *淡水渔业*, 2017, 47(4): 44-50.
- Luo H, Yang Y J, Xiang M B, *et al.* Blood biochemical indices and histopathology of the *Schizothorax prenanti* during early stage of infection by *Aeromonas hydrophila*[J]. *Freshwater Fisheries*, 2017, 47(4): 44-50 (in Chinese).
- [114] Zhou Y, Geng Y, Wang K Y, *et al.* *Edwardsiella tarda* infection in cultured Ya-fish, *Schizothorax prenanti*, in China[J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47(7): 2349-2354.
- [115] 张雨薇, 耿毅, 余泽辉, 等. 黄河裸裂尻鱼无乳链球菌的分离鉴定与多位点序列分型 [J]. *中国水产科学*, 2016, 23(5): 1217-1224.

- Zhang Y W, Geng Y, Yu Z H, *et al.* Identification of the pathogen *Streptococcus agalactiae* in *Schizopygopsis pylzovi* (Kessler) by multilocus sequence typing[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(5): 1217-1224 (in Chinese).
- [116] Liu G Y, Wu Y J, Qin X H, *et al.* The effect of aerobic exercise training on growth performance, innate immune response and disease resistance in juvenile *Schizothorax prenanti*[J]. *Aquaculture*, 2018, 486: 18-25.
- [117] 张桓桥, 商宝娣, 张效平, 等. 31 种中草药及其复方对维氏气单胞菌体外抑菌研究 [J]. *淡水渔业*, 2022, 52(3): 74-81.
- Zhang H Q, Shang B D, Zhang X P, *et al.* The antibacterial effect of 31 kinds of Chinese herbal medicines and their compounds on *Aeromonas veronii* *in vitro*[J]. *Freshwater Fisheries*, 2022, 52(3): 74-81 (in Chinese).
- [118] 陈美群, 潘瑛子, 牟振波, 等. 西藏 3 种冷水鱼皮肤病灶中潜在病原微生物分析 [J]. *西南农业学报*, 2019, 32(9): 2245-2252.
- Chen M Q, Pan Y Z, Mou Z B, *et al.* Analysis of potential pathogenic microorganisms in skin lesions of three cold-water fishes in Xizang[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(9): 2245-2252 (in Chinese).
- [119] 薄海波, 王霞, 翟宗德, 等. 碱催化法衍生化气相色谱/质谱法分析青海湖裸鲤鱼油中的脂肪酸 [J]. *色谱*, 2006, 24(2): 181-184.
- Bo H B, Wang X, Zhai Z D, *et al.* Analysis of fatty acids in *Gymnocypris przewalskii* oil by gas chromatography/mass spectrometry with base-catalyzed transesterification[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2006, 24(2): 181-184 (in Chinese).
- [120] Xiao L, Xin S L, Wei Z L, *et al.* Effect of chitosan nanoparticles loaded with curcumin on the quality of *Schizothorax prenanti* surimi[J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101178.
- [121] 王文娟, 汪水平, 李代金, 等. 不同贮藏温度齐口裂腹鱼肌肉品质的变化及货架期预测 [J]. *食品科学*, 2014, 35(14): 229-233.
- Wang W J, Wang S P, Li D J, *et al.* Quality changes and shelf life prediction of *Schizothorax prenanti* muscle at different storage temperatures[J]. *Food Science*, 2014, 35(14): 229-233 (in Chinese).
- [122] 周成, 邬应龙, 夏晓杰, 等. 响应面法优化齐口裂腹鱼肉蛋白酶解工艺的研究 [J]. *食品工业科技*, 2014, 35(2): 192-196.
- Zhou C, Wu Y L, Xia X J, *et al.* Optimization of *Schizothorax prenanti* Tchang protein enzymatic hydrolysis technology by response surface methodology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(2): 192-196 (in Chinese).
- [123] 谢开梅. 齐口裂腹鱼肉酶解工艺优化及酶解产物体外抗氧化活性研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2014.
- Xie K M. Study on the enzymic hydrolysis and antioxidant capacity of the *Schizothorax prenanti* Tchang[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2014 (in Chinese).
- [124] 张敏. 酸法和酶法提取齐口裂腹鱼皮胶原蛋白及鉴定性质研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2014.
- Zhang M. Extraction and characterization of ASC and PSC from skin of *Schizothorax prenanti* (Tchang)[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2014 (in Chinese).
- [125] 刘娟, 苏联解, 张婷, 等. 乙酸提取齐口裂腹鱼皮胶原蛋白工艺优化 [J]. *食品科技*, 2015, 40(7): 257-262.
- Liu J, Su L J, Zhang X, *et al.* Optimization of conditions for collagen extraction with acetic acid from the skin of *Schizothorax prenanti* Tchang[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(7): 257-262 (in Chinese).
- [126] 董芳, 方冬冬, 张辉, 等. 长江十年禁渔后保护与发展 [J]. *水产学报*, 2023, 47(2): 029318.
- Dong F, Fang D D, Zhang H, *et al.* Protection and development after the ten-year fishing ban in the Yangtze River[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(2): 029318 (in Chinese).

Research progress on conservation and utilization of schizothoracine fishes (Osteichthyes: Cyprinidae)

MA Baoshan¹, WU Yidi¹, HUO Bin², JIN Jiali¹, WANG Hong³,
HE Huke¹, LI Yunfeng^{1*}, LIANG Hongwei^{1*}

1. National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing,
Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Wuhan 430223, China;

2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Livestock Technology Service Center of Gannan Tibetan Autonomous Prefecture, Gannan 737000, China

Abstract: Schizothoracine fishes (Cyprinidae, Osteichthyes) are a group of cyprinid fishes distributed in and around the Qinghai-Xizang Plateau. China is a concentrated distribution area of schizothoracine fishes, with a total of 11 genera and about 99 species and subspecies, mainly distributed in plateau rivers and lakes in Xizang, Xinjiang, Qinghai, Gansu, Shaanxi, Sichuan, Yunnan, Guizhou, Chongqing, Hubei and Hunan provinces. Schizothoracine fishes share the morphological trait that specialized scales (anal scales) distribute on each side of the anal and anal fin bases, which are characterized by slow growth, long life span, late sexual maturity, and low fertility. With the development of society and economy, human activities such as overfishing, biological invasion and hydroelectric development have seriously threatened the survival of schizothoracine fishes, and most schizothoracine fishes are in the status of critically endangered, endangered, vulnerable and near threatened at present. In order to protect and restore the natural populations of schizothoracine fishes, the establishment of aquatic germplasm resource reserves and artificial proliferation and release are the two primary measures adopted. The comprehensive ban on fishing for 5 to 10 years is another robust measure. Schizothoracine fishes are typical cold-water fishes with high water quality requirements, usually can only live in pollution-free cold water at high altitude areas, with high protein content, tender and delicious meat, easy processing, rich in amino acids, unsaturated fatty acids, minerals and vitamins. Schizothoracine fishes have become a new economic growth point in the local market and have broad consumption prospects. In the context of large-scale conservation and a total ban on fishing, the artificial farming of schizothoracine fishes can not only protect their natural resources, but also meet the expanding market demand and increase the income of local fishermen. After decades of scientific and technological research and breeding promotion, the large-scale breeding and commercial culture of schizothoracine fishes have been realized. By referring to relevant literature and combining with field investigation, this study summarized and reviewed the research progress of the biological characteristics, resource conservation status, germplasm evaluation and genetic breeding, breeding techniques, and intensive processing of schizothoracine fishes, focused on the exploration of germplasm genetic resources, artificial breeding and technology development, and finally analyzed the existing problems and development prospects. This study provides a reference for the resource conservation of schizothoracine fishes and the high-quality development of fishery culture in mountainous areas.

Key words: schizothoracine fishes; resource conservation; genetic analysis; culture; disease; exploitation and utilization

Corresponding authors: LI Yunfeng. E-mail: lyf086@yfi.ac.cn;

LIANG Hongwei. E-mail: lianghw@yfi.ac.cn

Funding projects: Project of Yellow River Fisheries Resources and Environment Investigation from the MARA; National Freshwater Aquatic Germplasm Resource Center (FGRC18537); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD09, 2023TD33)