

特化等级裂腹鱼类的研究现状及驯养繁殖进展

张峰华^{1,2}, 梁涛^{1,2}, 李建波^{1,2}, 范士琦³, 何滔³

¹国家电投集团黄河上游水电开发有限责任公司, 陕西 西安

²青海黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁

³西南大学水产学院, 重庆

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月19日; 发布日期: 2026年3月3日

摘要

裂腹鱼亚科鱼类隶属于鲤形目鲤科, 主要分布于青藏高原及周边水域, 是该地区的特有鱼类, 且在长江、黄河、雅鲁藏布江、怒江、印度河、湄公河等水系也有分布。这类鱼能够适应高寒缺氧环境, 是高原水生生态系统中的关键类群, 具有重要的科学研究价值, 并且成为区域重要的经济鱼研究对象。然而, 由于水利工程建设影响, 裂腹鱼的生殖洄游通道受到阻隔另有过度捕捞、水质污染及外来物种入侵等多重因素, 导致其生存和自然繁殖受到制约, 因此, 开展人工驯养与繁殖研究尤为迫切。本文系统梳理了特化等级裂腹鱼类的研究现状和驯养进展, 以期为推动人工繁殖与资源保护提供参考。

关键词

特化等级裂腹鱼, 研究现状, 人工驯养, 繁育技术

Current Research Status and Advances in Domestication and Breeding of Specialized Schizothoracine Fishes

Fenghua Zhang^{1,2}, Tao Liang^{1,2}, Jianbo Li^{1,2}, Shiqi Fan³, Tao He³

¹Upper Yellow River Hydropower Development Co., Ltd., State Power Investment Corporation (SPIC), Xi'an Shaanxi

²Qinghai Upper Yellow River Hydropower Development Co., Ltd., State Power Investment Corporation (SPIC), Xining Qinghai

³College of Fisheries, Southwest University, Chongqing

Received: January 28, 2026; accepted: February 19, 2026; published: March 3, 2026

Abstract

Fishes of the subfamily Schizothoracinae belong to the family Cyprinidae in the order Cypriniformes.

文章引用: 张峰华, 梁涛, 李建波, 范士琦, 何滔. 特化等级裂腹鱼类的研究现状及驯养繁殖进展[J]. 水产研究, 2026, 13(1): 35-43. DOI: 10.12677/ojfr.2026.131006

They are primarily distributed in the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding waters, making them endemic to this region. They also occur in river systems such as the Yangtze, Yellow, Yarlung Tsangpo, Nu, Indus, and Mekong Rivers. These fish are capable of adapting to cold and low-oxygen environments, and many species have high-quality, nutritious flesh, making them a valuable source of scientific research. They are key groups in the plateau aquatic ecosystem and have become important species for regional economic fish studies. However, due to factors such as the impact of water conservancy projects blocking their reproductive migration routes, overfishing, water pollution, and the introduction of invasive species, their survival and natural reproduction are severely constrained. Therefore, research on artificial breeding and cultivation has become particularly urgent. This paper systematically reviews the current research status and progress in the cultivation of specialized Schizothoracinae fishes, aiming to provide a reference for promoting artificial reproduction and resource conservation.

Keywords

Specialized Schizothoracine Fishes, Research Status, Artificial Breedin, Reproductive Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

裂腹鱼亚科鱼类多样性丰富, 物种数量众多, 在青藏高原鱼类区系占据核心地位, 其广泛分布于青藏高原边缘地带海拔约 1000 米的江河湖泊, 延伸至海拔 5000~6000 米的雪线附近[1]。基于裂腹鱼类耐高海拔、强辐射与低温的特质, 研究者对其类群展开大量分析, 为研究地质事件、生命演化过程及极端环境适应机制提供了大量的参考数据[2] [3]。

裂腹鱼亚科鱼类记录了高原隆升与环境演变历史。曹文宣等[4]基于咽骨、颌骨、须、鳞片、消化道等形态特征提出裂腹鱼类在演化过程中形成原始、特化与高度特化三个等级, 这正是对高原阶段性隆升历史的直接生物学响应。孟玮[5]对两种特化等级裂腹鱼类的研究中发现, 天山与青藏高原的地质活动促进了西北地区斑重唇鱼(*Diptychus maculatus*)的遗传分化, 并在其基因组中发现了大量与海拔、温度相关的适应性位点。何德奎[6]的研究也表明, 晚新生代青藏高原阶段性的抬升引发了环境变化, 而环境变化与高度特化等级裂腹鱼类的起源演化息息相关。

目前, 裂腹鱼类正面临多重压力: 一方面, 受高原特殊生境限制, 它们普遍种群稀少、分布狭窄, 遗传资源非常脆弱; 另一方面, 其固有的低繁殖率和慢生长速度, 导致种群在受损后难以自然恢复[7]; 另外, 近 20 年来, 由于过度捕捞、水利工程建设、生境碎片化、气候变化等因素[8]-[10], 裂腹鱼类的资源、自然分布区域日趋减少, 许多特化程度高的种类已成为濒危物种。本综述整合现有研究, 旨在为不同特化等级裂腹鱼类的针对性保护与驯养繁殖提供理论依据。

2. 裂腹鱼类的分类、系统发育与地理分布格局

近年来, 研究者们根据咽喉齿行数、须的退化、鳞片覆盖程度等演化程度, 将裂腹鱼类分为三个等级类群, 其中原始等级包括裂腹鱼属(*Schizothorax*)、扁吻鱼属(*Aspiorhynchus*)和裂鲤属(*Schizocypris*), 类群特征为: 身体鳞片覆盖全身, 或仅局部发生退化; 下咽齿为 3 行; 通常具有 2 对触须, 少数属仅有 1 对。特化等级包括叶须鱼属(*Ptychobarbus*)、重唇鱼属(*Diptychus*)及裸重唇鱼属(*Gymnodiptychus*), 类群表

现为：体表鳞片出现局部退化，或完全退化；下咽齿减为 2 行；触须仅保留 1 对。高度特化等级的类群则具有以下特征：体表鳞片完全缺失；下咽齿为 2 行，个别属甚至仅有 1 行；触须完全消失，该等级包括裸鲤属(*Gymnocypris*)、裸裂尻鱼属(*Schizopygopsis*)、黄河鱼属(*Chuanchia*)、扁咽齿鱼属(*Platypharodon*)、高原鱼属(*Herzensteinia*)和尖裸鲤属(*Oxygymnocypris*) [5]。

近年来，人们通过线粒体 DNA 和核 DNA 标记进行裂腹鱼类的进化遗传学研究，并利用分子证据与形态特化等级的异同之处，探讨其进化历程与青藏高原隆升的协同关系。迪丽娜·茹斯坦木等[11]通过对 GenBank 数据库中 64 种裂腹鱼类的线粒体基因组数据进行分析，明确了裂腹鱼类“原始”、“特化”和“高度特化”3 个等级各自的聚类，并推断青藏高原的阶段性演化和气候变化全程参与影响腹鱼类的起源及各个等级的分化和成种事件，这与何德奎等[6]在分析了分布于青藏高原及其邻近地区 23 个种和亚种 36 个群体高度特化等级裂腹鱼类的线粒体 DNA 细胞色素 *b* 序列，重建了系统发育关系后所得到的结论基本一致。李亚莉[12]通过对青藏高原三种裂腹鱼线粒体全基因组的测定及分子进化分析，也为青藏高原是裂腹鱼类的起源和分化中心提供了分子数据的支持。

不同特化等级类群的地理分布格局呈现类群的特化程度越高，其分布海拔带也越高的规律性。裂腹鱼亚科鱼类的分布以青藏高原为中心，北至天山、祁连山，东达峨眉山、云贵高原，南抵喜马拉雅山，西以兴都库什山与帕米尔高原为界[13]-[15]。青藏高原的隆起及其隆起的阶段性造成了裂腹鱼类分布格局由高原边缘向高原腹地特化，原始类群大部分种类分布于青藏高原海拔 1250~2500 m 的各水系，其中扁吻鱼是唯一分布在内陆干旱区的属；特化等级类群主要分布在青藏高原海拔为 2750~3750 m 处，其中重唇鱼属仅分布在青藏高原西段至北疆；高度特化等级类群则分布在青藏高原海拔 1500~5000 m 及其邻近地区主体水系中上游[7] [16] (见表 1)。

Table 1. Geographical distribution of Schizothoracine fishes with different specialization levels [7]

表 1. 不同特化等级的裂腹鱼类地理分布[7]

| 等级群类 | 特征 | 属 | 分布 |
|--------|----------------------------------|-------------|---------------------------|
| 原始等级 | 体鳞被覆全身或局部退化，下咽齿 3 行，触须 2 对或 1 对。 | 裂腹鱼属(54 种) | 除黄河以外的所有青藏高原的边缘地区 |
| | | 扁吻鱼属(1 种) | 塔里木河水系及雅鲁藏布江的中游 |
| | | 裂鲤属(2 种) | 阿富汗的赫尔曼德河及巴基斯坦、伊朗地区 |
| 特化等级 | 体鳞局部退化或全部退化，下咽齿 2 行，触须 1 对。 | 叶须鱼属(5 种) | 青藏高原的东部及印度河上游 |
| | | 重唇鱼属(1 种) | 仅分布在青藏高原的西端往北一直到北疆 |
| | | 裸重唇鱼属(3 种) | 青藏高原东部及西部(克什米尔和帕米尔高原) |
| 高度特化等级 | 体鳞全部退化，下咽齿 2 行或在个别属为 1 行，触须缺。 | 裸鲤属(14 种) | 除阿尔金山以北及怒江水系无分布外的青藏高原中心区域 |
| | | 裸裂尻鱼属(10 种) | 除天山以北外的青藏高原各河流上游干、支流及其湖泊 |
| | | 黄河鱼属(1 种) | 黄河上游 |
| | | 扁咽齿鱼属(1 种) | 黄河上游 |
| | | 尖裸鲤属(1 种) | 塔里木河水系及雅鲁藏布江的中游 |
| | | 高原鱼属(1 种) | 在金沙江上游支流沱沱河及藏北内陆水体扎加藏布有分布 |

3. 特化等级相关的生理生态适应性研究

3.1. 对高原极端环境的生理适应

为了能在氧气稀薄且低温的高原环境中生存，裂腹鱼逐步演化出独特的生理适应机制，其心血管、

呼吸等多个系统协同作用,有效维持体内稳态,这些适应特征通过遗传不断累积和优化,使得裂腹鱼类群在极端环境条件下能够更好地生存与繁衍,有研究者通过对裂腹鱼类进行比较基因组学分析,试图探究与高原环境适应的候选基因[17];Yan Chao 等[18]首次克隆了西藏裂腹鱼 *Cygb1* 和 *Cygb2* 的基因序列,对其蛋白质特性进行了预测,并测定了 *Cygb1* 和 *Cygb2* 基因在重度和中度缺氧条件下的表达,结果发现幽门螺杆菌中的 *Cygb1* 和 *Cygb2* 基因都是低氧诱导的基因;还有研究者[19]通过温度驯化(10℃、15℃和 20℃)对尖裸鲤幼鱼生长、耐热性和肠道应激反应进行分析,以期了解气候变化对裂腹鱼类的潜在影响。不同特化等级裂腹鱼在血红蛋白含量、肌红蛋白浓度、血管生成等方面呈现不同程度的差异,侯微微等[20]在比较了三种裂腹鱼血细胞及血浆的元素含量后发现,裂腹鱼会通过调控血细胞内元素含量来适应高原低温环境,且元素含量呈现出与海拔相关的分布模式,相较生活在低海拔长江上游的齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)而言,生活在高海拔低氧环境的软刺裸鲤(*Gymnocypris doubula*)肌肉中的硒和锶含量以及脊椎骨中锶含量显著增加,这也表明裂腹鱼体内的微量元素为了适应高原低氧环境在长期进化中产生与海拔相关的差异[21];而通过对不同海拔高度的裂腹鱼亚科鱼类血红蛋白(Hb)浓度测试分析发现,Hb 基因的遗传变化改变了裂腹鱼的 Hb-O₂ 亲和力,有助于对西藏水环境的适应性[22]。此外,高海拔和低海拔的裂腹鱼在基因表达上也存在明显差异,主要在糖酵解/糖原生成、脂质生物合成和血管生成等通路上表达,这些都是对于长期适应低氧环境的关键基因[23];武晓会[21]比较了软刺裸鲤和齐口裂腹鱼组织中的蛋白表达量,发现软刺裸鲤 *TGF-β1* 的细胞相对活性更高,具有低氧适应性,此前也有研究者已证实软刺裸鲤中 *HIF* 和 *EPO* 基因同样具有低氧适应的功能,并得出硬骨鱼可能分别演化出适应应激性低氧和长期低氧环境两种不同机制的结论[24]。

3.2. 形态与食性适应

鱼类食性的差异与表面形态有关,如口裂大小、肠道长短和鳃的长短都会影响鱼的摄食性能[25]。此外,选定的形态特征与微生境开发之间有很强的关系王起等[26]对怒江上游三种裂腹鱼类(怒江裂腹鱼(*Schizothorax nukiangensis*)、裸腹叶须鱼(*Ptychobarbus kaznakovi*)、热裸裂尻鱼(*Schizopygopsis thermalis*))的摄食与消化器官比较研究表明:形态分化随着特化等级升高,鱼类口部、鳃耙、肠道等摄食器官发生显著变化,如须的退化、下咽齿行数减少、肠道弯曲数增加等;不同种存在食性差异,如怒江裂腹鱼和裸腹叶须鱼为杂食偏动物食性,而热裸裂尻鱼为杂食偏植物食性,三者食物重叠指数低,生态位分化明显;朱挺兵等[27]通过对裸腹叶须鱼的食性研究发现,浮游生物是其肠道内容物的主要成分,这也与胡睿[28]的研究结果一致,由此分析出特化等级越高的物种分布海拔越高,摄食器官的简化与食性泛化可能是对高寒寡营养环境的适应策略。有研究者发现食性可能会导致裂腹鱼肠道菌群的差异引起的,并主要对优势菌群产生影响,并且食性也会影响特定菌群的数量变化,从而影响肠道微生物的丰度[29]-[31]。另外,在同一水体中,不同特化等级的裂腹鱼类往往通过食性生态位分离实现共存,从而减少直接竞争,例如,同流域中生存的小头裸裂尻鱼一般以浮游生物为主要食物,而裸腹叶须鱼则主要摄食较小的水生动物[29]。

3.3. 繁殖生物学特性

幼鱼阶段裂腹鱼类在产卵类型、性成熟年龄、繁殖季节等方面存在差异[32][33]。水温和光照变化则是季节更替最明显的特征,影响着裂腹鱼类的性成熟时间,且繁殖期早晚与物种特化程度密切相关。高度特化的种群在适应极端环境的过程中,形成了更早启动繁殖的策略——它们通常在初春水温约 3℃时开始繁殖;相比之下,特化程度较低的种群则倾向于在更温暖的水温条件下繁殖,一般需等待水温上升至 10℃以上才会开始繁育活动[13][30]。当鱼成熟时,两性都会出现第二性征,雄鱼则更为明显[34][35],在对裂腹鱼群体的研究中,不同研究者的研究结果也各有差异,但就性别而言,性成熟期较早的一般为

雄鱼。生活在雅鲁藏布江的巨须裂腹鱼(*Schizothorax macropogon*)性成熟年龄分别为 5.2 龄(雄)和 7.2 龄(雌), 繁殖期在每年的 3~4 月, 这与隶属于高度特化种群裸裂尻鱼属中的拉萨裸裂尻鱼(*Schizopygopsis younghusbandi*)相差不大, 其性成熟年龄分别为 4.4 龄(雄)和 7.1 龄(雌), 繁殖期在每年的 3~4 月; 而同属于裸裂尻鱼属的宝兴裸裂尻鱼(*Schizopygopsis chengi baoxingensis*)性成熟年龄分别为 7.0 龄(雄), 10.0 龄(雌), 繁殖期从每年 5 月维持至 9 月[36]-[38]。

裂腹鱼类卵粒大, 卵黄含量丰富, 可为但相较其他淡水鱼而言, 繁殖力相对较低, 绝对繁殖力约为 2374~16,242 粒, 平均相对繁殖力约为 20~45 粒/g [30][36], 严太明等[37]对软刺裸裂尻鱼(*Schizopygopsis malacanthus*)的繁殖力研究发现, 其绝对繁殖力为 1176~9342 粒, 相对繁殖力为 15.7~58.8 粒/g; 任波等[39]通过三年对扁吻鱼的怀卵量研究发现, 其绝对繁殖力在 175,230~496,791 粒之间波动, 相对繁殖力为 23.4~71.0 粒/g; 对巨须裂腹鱼的研究发现, 其绝对繁殖力为 2781~24,970.5 粒, 相对繁殖力为 2.28~0.091 粒/克[30]。对以上鱼类进行相关性分析后发现, 裂腹鱼类的绝对繁殖力与其体长体重均呈现性关系。就鱼类产卵类型而言, 有学者已通过对卵母细胞的形态发育同步性和在一个繁殖季节内的产卵次数将其分为三类, 即完全同步产卵型、分批同步产卵型和分批非同步产卵型[30][40]。在对裂腹鱼类的研究中发现, 昆明裂腹鱼(*Schizothorax grahami*)和齐口裂腹鱼卵均具有单峰型特征, 属一次性产卵类型[41][42]; 而部分裂腹鱼类虽卵巢一年只成熟一次, 但所有的成熟卵会分批产出, 纳木错裸鲤(*Gymnocypris namensis*) [43]、青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*) [44]和尖裸鲤(*Oxygymnocypris stewartii*) [45][46]等都属于分批同步产卵型, 分析这种现象产生的原因是鱼类生活在高原地区, 受季节和食物限制, 卵母细胞在当年不能发育成熟, 这种分批产卵方式也有利于增加种群遗传多样性与稳定性, 提高后代成活率。

4. 驯养与人工繁殖研究进展

濒危鱼类因数量稀少, 随时存在灭绝风险, 对该种鱼类进行保护通常采用人工繁育与增殖放流措施。在人工繁育时, 通常要对催产前的亲鱼进行高蛋白饵料的强化投喂, 这是为了加强营养积累, 促进性腺发育, 若未进行充分的营养摄入, 性腺则无法正常发育, 影响催产结果[47]-[49]。

4.1. 驯养技术的探索与实践

亲鱼培育指的是创造一切有利于亲鱼性腺发育的条件促进性腺成熟的一个过程, 亲鱼的年龄、健康状况以及光照、温度、流水速度等都会对性腺发育产生影响[50][51]。亲鱼都需要经过科学系统的亲鱼培育, 穆娴等[52]选择规格在 1.5~2 千克/尾以上、活力好、体表无伤的野生怒江裂腹鱼作为亲鱼进行驯化培育, 并以 8 小时/天的冲水次数, 60 m³/小时的冲水量对亲鱼养殖缸进行冲水; 赵贺等[53]选用体长为 152.31~271.25 mm, 体质量为 102.17~265.31 g 的野生新疆克孜勒河厚唇裂腹鱼(*Schizothorax irregularis*)作为亲鱼, 并在面积 ≥ 667 m², 水深 ≥ 0.6 m, 循环水 ≥ 1 m³ 的养殖池中进行驯化培育; 同样, 曾本和等[54]也选择野生拉萨裂腹鱼作为亲鱼进行培育, 全天增氧, 流水刺激, 养殖池进水口流速为 0.4 m/s; 而张建明等[55]则选用人工养殖 4 龄以上齐口裂腹鱼亲鱼进行流水养殖培育, 其中雌鱼体重为 1.6~2.8 kg, 雄鱼选择 0.8~1.5 kg 的体重, 养殖水温控制在 6℃~20℃。

亲鱼培育达到性成熟阶段后, 需要及时人工干预促进排卵与受精过程获得受精卵, 可通过模拟自然环境中的特定生态刺激, 如周期性水流、温差波动或光照调节等, 并配置合理的雌雄亲鱼搭配比例, 以诱导其自然繁殖行为。当亲鱼已发育成熟却不能自然产卵时, 通常借助外源性激素进行催产处理。当注射激素催产后仍不能正常产卵时, 则需采取人工采卵与采精技术, 通过人工完成受精过程, 避免卵细胞因过度发育而退化, 导致繁殖失败, 无法获得苗种培育[56]。对于裂腹鱼类人工繁育的研究报道相对较少, 且人工繁育技术还不成熟, 有待进一步完善[57]。为了提高裂腹鱼类人工繁殖的成功率, 一般选用催产素

组合注射的方式,并根据亲鱼发育情况,选择一二次或多次注射,剂量也视情况而定[58]。彭洪等[57]采用 LRH-A (5 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和 DOM (1 mg/kg)两针法对厚唇裂腹鱼雌鱼进行注射催产,注射间距 12 h;雄鱼采用一针注射 LRH-A + DOM 法,注射剂量减半,成功催产;苏奇等[59]对弧唇裂腹鱼(*Schizothorax curvilibiatus*)雌鱼同样进行二次注射法,第一针注射剂量为 LHRH-A2 (4 $\mu\text{g}/\text{kg}$) + HCG (600 IU/kg) + DOM (3.2 mg/kg),功繁殖出弧唇裂腹鱼 F1 苗种。

环境作为外界因素对于胚胎发育产生很大影响[60][61],裂腹鱼类适应高原地区的水体环境,其野外天然繁殖场所温度较低。且裂腹鱼类特化程度越高,在人工驯养时对生态模拟的精准度要求越高。对于高度特化类群而言,低水温、生长期短、饵料生物专一性强(以着生藻类为主),导致鱼体在原产地生长缓慢。目前研究者模拟原生境水环境,在全淡水中采用微流水对青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)亲鱼进行人工驯养繁殖,夏季水温不高于 25 $^{\circ}\text{C}$,越冬水温不低于 14 $^{\circ}\text{C}$,并采用全人工配合饲料投喂,并控制投喂量与投喂次数,有效提高了生长速度,并缩短了养殖周期[62];从野外捕捞获得的拉萨裸裂尻鱼亲鱼未经人工驯养繁殖,由于生产后体质弱易患病,且停止摄食,造成亲本死亡率极高,龚君华等[63]模拟河流水流环境,采用流水刺激亲鱼,并通过添加了南极磷虾等香味浓郁的饵料诱导亲鱼摄食,提高了亲鱼存活率。中度特化类群仍需低温、高溶氧的水质,对关键环境因子(水温、溶氧)仍有较强依赖,但较高度特化类群而言,食性范围略广,且池塘或流水驯养模式相对成熟,人工配合饲料研发较多,添加剂种类选择范围也更广,对于亲鱼培育中营养强化方案的研究也相对较多[64]-[67]。原始等级类群则对水温、溶氧的要求相对较宽,食性则更为复杂,目前是驯养技术最为成熟的类群,接近常规养殖鱼类,并已应用集约化养殖模式[68]-[72]。

4.2. 存在的问题

当前对于裂腹鱼类的驯养研究虽有所进展,但仍存在许多瓶颈。如生理应激机制不明,对于裂腹鱼类应激反应的内分泌与免疫调控通路缺乏系统的深入研究[73];且针对特化等级和高度特化等级类群的裂腹鱼的饲料配方研发滞后,对于如何满足亲鱼的特殊营养需求尚不明确[71];且目前人工驯养群体多来自野生亲本,规模小,近亲繁殖风险高,针对保护遗传学背景下的可持续驯养策略方面的研究存在空白[74]-[76]。

5. 展望

总体来看,对于裂腹鱼类群的人工驯养繁育在技术上已经取得较大进展,仍存在技术难点,距离裂腹鱼规模化苗种生产和大规模增殖放流还存在很大差距。未来围绕人工驯养的研究应更加深入,一方面,通过研发改进基于物联网的循环水养殖系统,实现对水温、溶氧、流速的精准模拟;另一方面,深度解析不同特化等级裂腹鱼的核心营养需求和代谢途径,指导开发不同生长阶段的专用饲料,突破摄食瓶颈;另外,开展分子标记辅助选育并逐步驯化培育出适应人工环境的新品系,并针对裂腹鱼常见疾病建立健康管理与病害绿色防控体系。这不仅对物种保护至关重要,也为开发独特的高原冷水鱼产业奠定坚实的科学与技术基础。

基金项目

课题名称:黄河羊曲水电站鱼类增殖、放流关键技术研究及效果评估项目(1161-GCJS-FY-[2024]第 19 号(总 727 号))。

参考文献

[1] 赵新全, 祁得林, 杨洁. 青藏高原代表性土著动物分子进化与适应研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

- [2] 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): 808-824.
- [3] Du, T., Ding, C., Yang, K., Chen, J., Liu, X., Lv, W., *et al.* (2024) A Global Dataset on Species Occurrences and Functional Traits of Schizothoracinae Fish. *Scientific Data*, **11**, Article No. 272. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03098-2>
- [4] 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的隆起关系[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 118-130.
- [5] 孟玮. 两种特化等级裂腹鱼类分子系统地理格局研究[D]: [博士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [6] 何德奎, 陈毅峰. 高度特化等级裂腹鱼类分子系统发育与生物地理学[J]. 科学通报, 2007(3): 303-312.
- [7] 代应贵, 肖海. 裂腹鱼类种质多样性研究综述[J]. 中国农学通报, 2011, 27(32): 38-46.
- [8] 邹习俊. 四川裂腹鱼核型及遗传多样性研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [9] Lamberti, G.A., Chaloner, D.T. and Hershey, A.E. (2010) Linkages among Aquatic Ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, **29**, 245-263. <https://doi.org/10.1899/08-166.1>
- [10] 崔丽莉, 毕晓敏, 王真宽, 雷春云, 周睿, 邵宗怀, 蔺应福, 李成, 杨碧莲, 李寿好, 付贵权, 鲁祥兴. 腾冲地区鱼类资源现状调查[J]. 水产研究, 2025, 12(4): 247-258.
- [11] 迪丽娜·茹斯坦木, 袁晓倩, 张琪, 等. 基于线粒体基因组数据的裂腹鱼类系统发育研究[J]. 中国水产科学, 2022, 29(6): 781-791.
- [12] 李亚莉. 青藏高原三种裂腹鱼线粒体全基因组的测定及分子进化分析[D]: [博士学位论文]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [13] 武云飞, 吴翠珍. 青藏高原鱼类[M]. 成都: 四川科技出版社, 1992: 297-515.
- [14] 赵新全, 祈得林, 杨洁. 青藏高原代表性土著分子进化和适应研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-70.
- [15] 陈毅峰, 曹文宣. 裂腹鱼亚科[M]//乐佩琦. 中国动物志: 硬骨鱼纲鲤形目(下卷). 北京: 科学出版社, 2000: 273-390.
- [16] 陈毅峰. 裂腹鱼类的系统进化及资料生物学[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2000: 1-102.
- [17] Tong, C. and Li, M. (2020) Genomic Signature of Accelerated Evolution in a Saline-Alkaline Lake-Dwelling Schizothoracine Fish. *International Journal of Biological Macromolecules*, **149**, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.207>
- [18] Chao, Y., Xia, M., Wu, R., Chen, Q., Zheng, Z. and Qi, D. (2018) Molecular Characterization and Expression Changes of Cytoglobin Genes in Response to Hypoxia in a Tibetan Schizothoracine Fish, *Schizopygopsis pylzovi*. *Fish Physiology and Biochemistry*, **45**, 863-872. <https://doi.org/10.1007/s10695-018-0582-1>
- [19] Zhu, T., Li, X., Wu, X. and Yang, D. (2022) Temperature Acclimation Alters the Thermal Tolerance and Intestinal Heat Stress Response in a Tibetan Fish *Oxygymnocypris stewartii*. *Frontiers in Microbiology*, **13**, Article ID: 898145. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.898145>
- [20] 侯微微, 吴智超, 江守文, 等. 三种裂腹鱼血细胞及血浆的元素含量测定与比较[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(6): 60-65.
- [21] 武晓会, 刘洋, 许强华. 软刺裸鲤和齐口裂腹鱼肌肉和骨骼中的元素分析[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(11): 163-169.
- [22] Lei, Y., Yang, L., Zhou, Y., Wang, C., Lv, W., Li, L., *et al.* (2021) Hb Adaptation to Hypoxia in High-Altitude Fishes: Fresh Evidence from Schizothoracinae Fishes in the Qinghai-Tibetan Plateau. *International Journal of Biological Macromolecules*, **185**, 471-484. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.186>
- [23] 汤先湖, 郝恬, 江守文, 等. 3种不同海拔裂腹鱼肾脏转录组比较[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(3): 543-551.
- [24] 姜华鹏. 高原裂腹鱼 HIF1B 和 HIF2A 基因的低氧适应性研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [25] Motta, P.J., Clifton, K.B., Hernandez, P., *et al.* (1995) Ecomorphological Correlates in Ten Species of Subtropical Seagrass Fishes: Diet and Microhabitat Utilization. *Environmental Biology of Fishes*, **44**, 7-60.
- [26] 王起, 刘明典, 朱峰跃, 等. 怒江上游三种裂腹鱼类摄食及消化器官比较研究[J]. 动物学杂志, 2019, 54(2): 207-221.
- [27] 朱挺兵, 李飞, 杨德国. 金沙江上游赠曲的鱼类与裸腹叶须鱼的食性[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1086-1092.
- [28] 胡睿. 金沙江上游鱼类资源现状与保护[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中国科学院, 2012.

- [29] 郝佳慧. 裂腹鱼食物选择与微生物互作[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海大学, 2023.
- [30] 刘洁雅. 西藏巨须裂腹鱼个体生物学和种群动态研究[D]: [硕士学位论文]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017.
- [31] 里克, 鸿年, 费, 等. 鱼类种群生物统计量的计算和解析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [32] 张友钊, 徐丽, 卢群, 等. 赤水河保偶河段和母享河段水生生物群落特征[J]. 渔业信息与战略, 2023, 38(4): 270-281.
- [33] 刘星辰. 怒江上游支流玉曲河不同特化等级裂腹鱼类的产卵场分布、繁殖策略及仔稚鱼生长研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2025.
- [34] 徐滨, 朱祥云, 魏开金, 等. 拉萨裂腹鱼的胚胎及仔稚鱼发育特征[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(5): 663-670.
- [35] Li, W., Guo, W., Liu, H., Qiao, Q., Zhao, K., Ai, D., et al. (2024) Spawning Grounds of Schizothoracinae Fish on the Tibetan Plateau. *Environmental Biology of Fishes*, 107, 1263-1276. <https://doi.org/10.1007/s10641-024-01634-y>
- [36] 周翠萍. 宝兴裸裂尻鱼的繁殖生物学研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [37] 严大明, 蒲勇, 胡佳祥, 等. 金沙江软刺裸裂尻鱼繁殖特性研究[J]. 四川农业大学学报, 2025, 43(1): 25-32.
- [38] 赵凯. 青海湖及其邻近水系特有裂腹鱼类的分子系统发育及系统地理学[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006.
- [39] 任波, 任慕莲, 郭焱, 等. 扁吻鱼的生物学研究[J]. 水产学杂志, 2006(2): 9-22.
- [40] 施琼芳. 鱼类生理学[M]. 北京: 农业出版社, 1991.
- [41] 詹会祥, 郑永华, 晏宏, 等. 昆明裂腹鱼繁殖生物学研究[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(5): 92-96.
- [42] 张建禄, 王开锋, 边坤, 等. 汉中地区齐口裂腹鱼生物学研究[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(12): 5263-5268.
- [43] 何德奎, 陈毅峰, 蔡斌. 纳木错裸鲤性腺发育的组织学研究[J]. 水生生物学报, 2001(1): 1-13.
- [44] 胡安, 唐诗声, 龚生兴. 青海湖地区的鱼类区系和青海湖裸鲤的生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1975: 49-62.
- [45] 霍斌. 尖裸鲤个体生物学和种群动态学研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [46] Huo, B., Xie, C.X., Ma, B.S., Yang, X.F. and Huang, H.P. (2012) Reproductive Biology of *Oxygymnocypris stewartii* in the Yarlung Zangbo River in Tibet, China. *Environmental Biology of Fishes*, 96, 481-493. <https://doi.org/10.1007/s10641-012-0031-4>
- [47] 赵年桦, 徐筱, 赵贺, 等. 塔里木裂腹鱼人工繁殖、胚胎发育和早期仔鱼发育研究[J]. 西北农业学报, 2021, 30(12): 1767-1776.
- [48] 刘海平, 刘孟君, 刘艳超. 西藏巨须裂腹鱼早期发育特征[J]. 水生生物学报, 2019, 43(2): 367-378.
- [49] 夏子惠, 赵贺, 邱梦, 等. 宽口裂腹鱼的人工催产、胚胎发育及早期仔鱼发育观察[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(3): 471-481.
- [50] 李亚宁. 小麦胚芽对黄颡鱼雌性亲鱼健康及繁殖性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [51] 胡伟华. 杂交黄颡鱼“黄优1号”遗传特性及母本繁殖性能改善的研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [52] 穆娴, 刘庆山, 吴欢欢, 等. 怒江裂腹鱼野生亲鱼驯养及人工繁育试验[J]. 科学养鱼, 2025(8): 15-17.
- [53] 赵贺, 洪继彪, 赵年桦, 等. 新疆克孜勒河厚唇裂腹鱼人工繁殖及胚胎、早期仔鱼发育研究[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(3): 414-422.
- [54] 曾本和, 杨瑞斌, 刘海平, 等. 拉萨裂腹鱼人工繁殖初探[J]. 淡水渔业, 2020, 50(5): 69-73.
- [55] 张建明, 姜伟. 人工繁殖齐口裂腹鱼胚胎及仔鱼发育观察[J]. 西南农业学报, 2019, 32(9): 2238-2244.
- [56] 陈四清. 圆斑星鲃(*Verasper variegatus*)人工繁育技术及遗传特性的研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [57] 彭淇, 吴彬, 陈斌, 等. 野生重口裂腹鱼[*Schizothorax (Racoma) davidi* (Sauvage)]的性腺发育观察与人工繁殖研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 651-655.
- [58] 赵贺. 新疆克孜勒河厚唇裂腹鱼人工繁育及环境因子对幼鱼生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- [59] 苏奇, 杨培灿, 贺凯, 等. 雅鲁藏布江弧唇裂腹鱼人工繁殖与早期发育研究[J]. 中国水产科学, 2025, 32(9): 1242-1253.

- [60] Ling, L., Chang, Y., Liu, C., Lai, P. and Hsu, T. (2017) Oxidative Stress Intensity-Related Effects of Cadmium (CD) and Paraquat (PQ) on UV-Damaged-DNA Binding and Excision Repair Activities in Zebrafish (*Danio Rerio*) Embryos. *Chemosphere*, **167**, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.068>
- [61] Liu, J., Hu, R., Liu, J., Zhang, B., Wang, Y., Liu, X., *et al.* (2015) Cytotoxicity Assessment of Functionalized CdSe, CdTe and InP Quantum Dots in Two Human Cancer Cell Models. *Materials Science and Engineering: C*, **57**, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.07.044>
- [62] 李天. 青海湖裸鲤生物学特性及异地人工驯养繁殖技术[J]. 科学养鱼, 2009(6): 6-7, 28.
- [63] 龚君华, 曾本和. 拉萨裸裂尻鱼产后亲鱼护理方法[J]. 水产养殖, 2022, 43(8): 67-68.
- [64] 牛建功, 张涛, 刘鸿, 等. 斑重唇鱼人工驯养繁育技术研究[J]. 科学养鱼, 2016(12): 10-12.
- [65] 虎永彪, 张艳萍, 史小宁, 等. 厚唇裸重唇鱼人工繁殖技术[J]. 中国水产, 2014(8): 63-64.
- [66] 李筱芹, 曾如奎, 倪达富, 等. 分布于雅砻江中游厚唇裸重唇鱼的饵料生物组成与摄食特性[J]. 水产学报, 2025, 49(3): 158-177.
- [67] 周礼敬, 詹会祥. 昆明裂腹鱼人工养殖技术[J]. 家畜生态学报, 2013, 34(6): 81-84.
- [68] 赵树海, 杨光清, 宝建红, 等. 长丝裂腹鱼全人工繁殖试验[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(4): 101-104.
- [69] 杨光清, 赵树海, 宝建红, 等. 短须裂腹鱼鱼种和成鱼网箱养殖试验[J]. 现代农业科技, 2016(17): 225-226, 228.
- [70] 徐伟毅, 刘跃天, 冷云, 杨再兴, 孟自荣, 张谷丁, 宝建红. 云南裂腹鱼驯化养殖试验[J]. 淡水渔业, 2002(6): 31-32.
- [71] 陈礼强, 吴青, 郑曙明. 细鳞裂腹鱼人工繁殖研究[J]. 淡水渔业, 2007(5): 60-63.
- [72] 徐伟毅, 云跃天, 宝建红, 等. 小裂腹鱼全人工繁殖试验[J]. 淡水渔业, 2004(5): 39-41.
- [73] 樊均德, 方静, 何敏. Glu 细胞与 5-HT 细胞在两种裂腹鱼肠道的免疫组织化学研究[J]. 四川农业大学学报, 2006(4): 444-447.
- [74] 赵远飞. 雅安市雅鱼资源的保护与合理开发利用现状调查[J]. 中国水产, 2001(12): 76-77.
- [75] 聂竹兰, 魏杰, 程勇. 塔里木裂腹鱼生物学研究初探[J]. 塔里木大学学报, 2010, 22(3): 113-116.
- [76] 郭焱, 谢春刚, 罗刚, 等. 新疆维吾尔自治区水产种质资源现状与保护[J]. 中国水产, 2021(3): 67-71.