

赣江发现溯河洄游型刀鲚(*Coilia nasus*)^{*}

杨一帆¹, 姜涛², 高小平³, 轩中亚¹, 陈修报², 李乐康³, 刘洪波², 杨健^{1,2**}

(1: 南京农业大学无锡渔业学院, 无锡 214081)

(2: 中国水产科学研究院长江中下游渔业生态环境评价与资源养护重点实验室, 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 无锡 214081)

(3: 江西省九江市水产科学研究所, 九江 332000)

摘要: 基于鱼类江海洄游与否的电子探针耳石锶和钙微化学判别手段, 对 2020 年 5 月采于赣江炉子窑江段的 21 尾刀鲚的生态表型进行了生活史重建的探索. 研究发现, 16 尾为典型的溯河洄游型刀鲚, 其占总刀鲚标本数量的比例达 76%, 远高于迄今鄱阳湖及其通湖水系所报道的相关比率. 赣江中应该存在洄游型刀鲚的产卵场. 这些首次确证了赣江中溯河洄游型刀鲚的存在, 并体现出了在长江生态大保护及 2019 年 2 月 1 日业已开始的相关禁渔等国策下, 赣江水域洄游型刀鲚资源量和栖息地有恢复向好的趋势. 宜尽快开展赣江下游相关类群分布区和产卵场等及水利工程、河道挖沙等潜在威胁因素影响的全面调查, 以便有效保护该水域的刀鲚资源及其关键栖息地.

关键词: 赣江; 刀鲚; 耳石微化学; 溯河洄游; 鄱阳湖; 保护

Discovery of anadromous *Coilia nasus* in the Ganjiang River, Lake Poyang Basin, China^{*}

Yang Yifan¹, Jiang Tao², Gao Xiaoping³, Xuan Zhongya¹, Chen Xiubao², Li Lekang³, Liu Hongbo² & Yang Jian^{1,2**}

(1: Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Fishery Eco-environment Assessment and Resource Conservation in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery, Wuxi 214081, P.R.China)

(3: Jiujiang Fisheries Research Institute, Jiujiang 332000, P.R.China)

Abstract: A confirmatory study on the distribution of anadromous *Coilia nasus* was conducted using otolith strontium and calcium microchemistry, based on 21 fishes sampled at the Luziyao section of the Ganjiang River in Lake Poyang Basin on May 27th, 2020. The results indicated that 16 individuals were anadromous-long supermaxilla ecomorphotype and constituted as high as 76% of the total sampled fish. The proportion is far higher than those reported in literature till now for *C. nasus* around the Lake Poyang and its tributaries. The spawning site of the fish possibly exists in the Ganjiang River. The present study firstly confirmed the existence of anadromous *C. nasus* in the Ganjiang River and provided objective evidence on the recovery tendency of resource and habitat for this fish under the national policies of ecological protection and the corresponding ban on fishing (started on February 1st, 2019) in the Yangtze River. To rescue protection of resources and key habitats for *C. nasus* in the Ganjiang River, further studies are urgently needed to more accurately locate the distributing areas and spawning sites, and assess the potential impacts from human activities (e.g., hydraulic engineering, sand mining of river bed) to *C. nasus*.

Keywords: Ganjiang River; *Coilia nasus*; otolith microchemistry; anadromy; Lake Poyang; protection

^{*} 2020-11-30 收稿; 2021-01-07 收修改稿.

农业农村部农业财政专项项目 (CJDC-2017-22) 和无锡市留学人员科技活动择优重点资助项目 (CZ2019231400) 联合资助.

^{**} 通信作者; E-mail: jiany@ffrc.cn.

刀鲚(*Coilia nasus*), 是我国的名贵鱼类, 被认为是“长江三鲜”之首, 长江生态大保护的“旗帜种”之一^[1]. 每年春季, 溯河洄游型长江刀鲚会从沿海经河口逆江洄游至长江中下游沿线湖泊繁殖^[2-4]. 由于长期受到过捕和生境破坏等人为因素的影响, 其资源量已急剧下降^[1], 开展准确追溯其现存分布区和产卵场的工作非常困难.

鄱阳湖为我国的第一大淡水湖, 湖区联通赣江、抚河、信江、饶河和修水五大水系^[5]. 近年来基于耳石微化学图谱的客观确认, 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心在鄱阳湖及其相关水系中刀鲚分布区和产卵场的调查中取得了一些新突破. 研究不仅发现长江刀鲚仍可生殖洄游回到距长江口近千千米的鄱阳湖(如湖口、庐山(原星子)、都昌、余干、永修等水域)中^[6-7], 而且首次发现庐山—都昌(特别是麻头池到刘家山湖区)水域是一个长江溯河洄游型刀鲚的产卵场(对应于受精卵的孵化场)^[7-10]并实证通湖的信江亦有该洄游型刀鲚的分布且该水系内应该也存在刀鲚产卵场^[7]. 近期, 国家大力实施“长江生态大保护”及“长江十年禁渔”(2019年2月1日起农业农村部停止发放长江刀鲚、凤鲚、中华绒螯蟹专项捕捞许可证, 标志着这些品种已先期开始禁渔)等一系列国策, 将对长江鱼类资源及其栖息地的恢复与保护起到举足轻重的作用. 进一步基于上述耳石微化学手段来实证受惠于捕捞强度下降、生态环境向好等新形势下鄱阳湖及其联通水系所出现的新分布区或产卵场^[11], 无疑将对评价上述国策所产生的实际效果做出独特的贡献.

赣江是鄱阳湖流域的第一大河^[12], 长约 760 余 km^[13], 在南昌以下分西支(主支)、中支、北支、南支入鄱阳湖; 主支在永修吴城镇附近入湖. 该河流曾发生过由于过捕、水污染、水利工程的兴建等因素, 导致分布区、特别是产卵场的消失, 直至长江鲟鱼灭绝的教训^[14]. 有关赣江刀鲚的研究尚很缺乏, 仅刘雄军等^[15]在 2015 年 5—8 月对鄱阳湖、赣江和抚河下游的调查中捕获鲚属鱼类 206 尾; 其中长颌鲚(曾命名为 *C. ectenes* Jordan et Seale, 1905) 2 尾(是否为赣江个体不明), 被认为是洄游型刀鲚, 及近 10 年赣江流域未发现有该类刀鲚分布^[13]的报道. 实际上, 长江流域刀鲚存在 5 个生态表型; 而长颌鲚和短颌鲚(曾命名为 *C. brachygnathus* Kreyenberg et Pappenheim, 1903) 均既有溯河洄游, 又有淡水定居两种表型; 上颌骨长度等传统的形态分析经验并不能确证两类刀鲚是否为溯河洄游的个体. 因此, 引入能够有效反映刀鲚生境履历及洄游习性的方法, 来破解上述难题非常重要. 渔业环境微化学凭借其独特的学科交叉及可“破译”积累在耳石上鱼类所经历环境元素背景特性

的优势^[16], 已被证实为能够客观、准确地反演鱼类生境履历和洄游模式的重要方法之一^[17-21].

2020 年 5 月, 笔者实验室在赣江采集到刀鲚(含长颌鲚和短颌鲚 2 种形态型^[1]) 共 21 尾. 利用上述耳石微化学技术^[17-19]及刀鲚 5 种生态表型的分型基准^[1], 笔者首次对上述形态型个体的生态表型归属进行了确认并分析了其是否有溯河洄游史特征. 本研究拟为确证现今赣江中是否存在溯河洄游型刀鲚及推测其可能的产卵场; 以及利用刀鲚做为“模式”鱼种^[11], 尝试评价在上述生态大保护及禁渔的国策下, 通鄱阳湖河流水系洄游型鱼类资源的恢复响应状况提供技术支撑和理论依据.

1 材料和方法

1.1 材料

于 2020 年 5 月 27 日在赣江主支炉子窑江段(29°9' N, 116°0' E, 距长江口约 860 km) 进行科研渔业特许捕捞(图 1). 用单层定置丝网作业, 网目 20 mm, 网片高度 1.2 m, 单张网长 50 m, 3 张连一张共 150 m. 作业网次为 1 次, 时间为 15:00 至次日 6:00, 共 15 h. 共采集到刀鲚标本 21 尾(表 1). 本文中按照上颌骨形态以长颌鲚(上颌骨>头长)和短颌鲚(上颌骨<头长)的方式对两类个体加

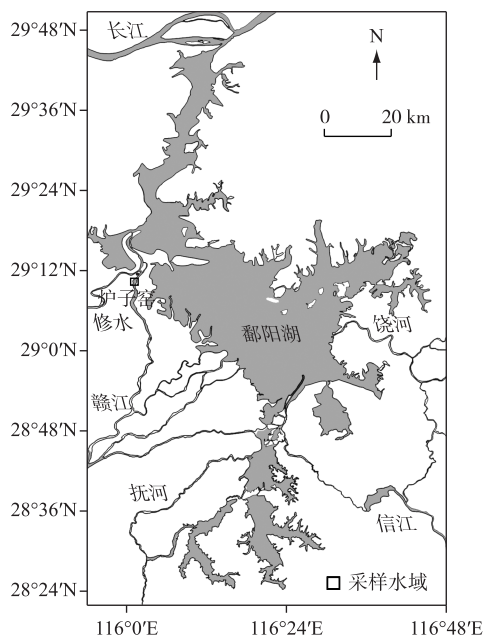


图 1 本研究刀鲚的采样位置

Fig.1 Sampling location of *Coilia nasus* in the present study

以表述. 其中长颌鲢共 16 尾, 全长为(288±25) mm, 体重为(61.97±19.68) g; 短颌鲢共 5 尾, 全长为(239±42) mm, 体重为(29.69±21.26) g. 鱼体标本带回实验室后-20℃冰箱冷冻保存备用.

刀鲚解冻后解剖摘取耳石. 考虑到相对于星耳石与微耳石, 矢耳石体积最大, 参考笔者实验室前期的方法选择左矢耳石作为研究材料, 并进行前处理及微化学分析^[6,20-21]. 用环氧树脂(Epofix, 丹麦 Struers 公司)包埋耳石, 将包埋耳石的树脂粘贴到玻璃片上, 切割多余树脂, 先用 70 μm 金刚砂轮(Discoplan-TS 碾磨机, 丹麦 Struers 公司)和 35 μm 金刚砂轮(Discoplan-TS 碾磨机, 丹麦 Struers 公司)粗磨至暴露耳石, 再用 15 μm 和 10 μm 砂纸精磨至暴露耳石核心, 抛光(LaboPol-35 磨抛机, 丹麦 Struers 公司)以消除表面划痕, 切割多余玻璃片. 用 Milli-Q 水超声清洗 5 min, 烘干后, 用真空镀膜机(JEE420, 日本电子株式会社)镀膜(36A, 25s).

表 1 赣江刀鲚标本的信息
Tab.1 Sampling details of *Coilia nasus* collected from the Ganjiang River

标本类型	样本编号	全长/mm	体重/g	头长/mm	上颌骨长/mm	上颌骨长/头长	性成熟度	年龄/a
长颌鲢	20GJCN01	313	79.16	44.21	49.05	1.10948	♀ III	2+
	20GJCN02	310	67.67	43.02	50.14	1.16550	♀ III	2+
	20GJCN03	308	75.67	43.38	45.18	1.04149	♀ IV	2+
	20GJCN04	303	79.86	44.34	49.22	1.11006	♀ III	2+
	20GJCN05	288	65.27	41.56	48.64	1.17036	♂ III	2+
	20GJCN06	315	102.43	44.45	52.47	1.18043	♀ III	2+
	20GJCN07	289	70.95	39.94	45.31	1.13445	♀ II	2+
	20GJCN08	289	66.15	40.52	45.95	1.13401	♂ III	3+
	20GJCN09	322	76.78	44.72	48.26	1.07916	♀ III	2+
	20GJCN10	297	58.15	41.35	47.42	1.14680	♂ III	2+
	20GJCN11	279	45.61	38.33	44.94	1.17245	♂ II	2+
	20GJCN12	279	58.18	41.76	49.86	1.19397	♀ III	2+
	20GJCN13	272	44.78	39.16	47.24	1.20633	♂ II	2+
	20GJCN14	245	33.39	34.72	38.34	1.10426	♂ II	2+
	20GJCN15	253	35.09	35.60	43.53	1.22275	♂ II	2+
	20GJCN16	244	32.33	34.57	39.04	1.12930	♂ II	2+
短颌鲢	20GJCB01	248	49.22	39.37	35.39	0.89891	♀ IV	2+
	20GJCB02	248	28.89	37.66	33.26	0.88317	♂ III	2+
	20GJCB03	273	53.00	39.55	34.74	0.87838	♀ III	2+
	20GJCB04	162	8.29	25.34	21.86	0.86267	♂ III	1+
	20GJCB05	166	9.07	26.80	22.65	0.84515	♀ II	1+

1.2 耳石微化学分析

基于碳酸钙(CaCO₃)和钛酸锶(SrTiO₃)的标准样品,使用X射线电子探针微区分析仪(简称电子探针)(EPMA, JXA-8100 型, 日本电子株式会社)分析耳石微化学. 即从耳石核心至耳石边缘沿最长径一条直线进行元素 Sr 和 Ca 的定量线含量分析^[6,20-21], 如果最长径上有划痕或者缺损, 则选择次长径进行分析. 按惯例本研究计算出标准化的 Sr/Ca×10³比值(即本文表述的 Sr/Ca 比值). 随后对耳石样品进行 Sr 元素的面分布分析, 并形成耳石过核心截面各部位 Sr 信号高低的 16 色直观图谱(黑色和红色分别反映最低和最高的浓度水平). 为方便展示以及按照惯例, 根据日本电子 JXA-8100 操作说明在其 Mapping Analysis 界面下将所得 Sr 信号转换为相对于电子探针内标准的相对浓度(%). 上述 EPMA 分析过程具体的参数设定见表 2.

表 2 电子探针分析的条件
Tab.2 The operation conditions for electron probe microanalysis

分析项目	加速电压/kV	电子束电流/A	束斑直径/μm	驻留时间/s	间隔/像素/μm
线分析	15	2.0×10 ⁻⁸	5	15	10
面分析	15	5.0×10 ⁻⁷	5	0.03	7×7

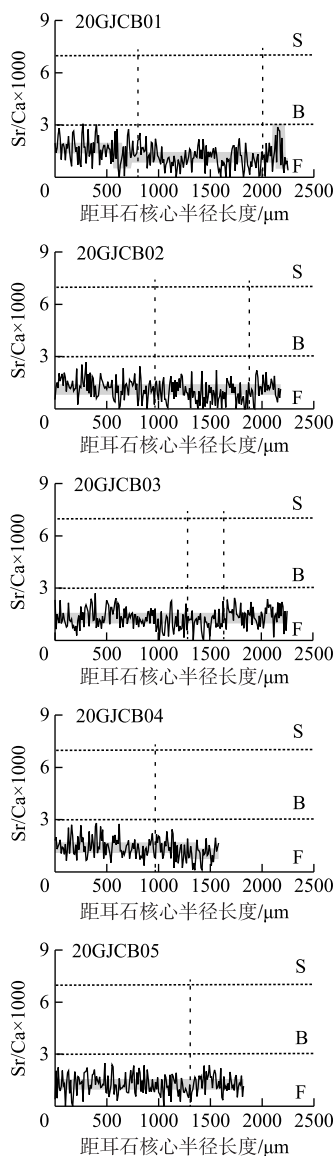


图2 赣江5尾短颌鲚个体耳石Sr/Ca比(黑窄线)和其趋势转换结果(灰宽线)(图中两条水平虚线分别对应Sr/Ca比值为3和7. 竖直虚线对应年轮. S表示海水, B表示河口半咸水, F表示淡水)^[6,11,20]

Fig.2 Otolith Sr/Ca ratio transects (black narrow line) and their shifts (grey wide line) of 5 short-supermaxilla *Coilia nasus* from the Ganjiang River (The two horizontal dotted lines in the figure correspond to Sr/Ca ratios of 3 and 7, respectively. The vertical dotted lines correspond to annuli. S means sea water, B means brackish water, and F means fresh water)^[6,11,20]

根据姜涛等^[22]方法,对耳石矢状面先进行抛光以消除表面划痕,再用5% EDTA酸蚀后用光学显微镜观察年轮,读取年龄.

1.3 数据处理

根据本研究室前期研究结果刀鲚耳石Sr/Ca比值及Sr含量高低图谱与其盐度生境对应关系为:淡水Sr/Ca比值 ≤ 3 ,低Sr蓝色图谱;河口半咸水 $3 < \text{Sr/Ca}$ 比值 ≤ 7 ,较高Sr绿色至黄色图谱;海水Sr/Ca比值 > 7 ,高Sr红色图谱^[6,11,20].

利用Excel 2019计算淡水系数(freshwater coefficient, F_c),即洄游性鱼类早期生活史阶段对淡水生境的依存程度^[23],具体为定量线分析结果中自耳石核心开始连续对应淡水生境Sr/Ca比值 ≤ 3 的耳石径长和直到耳石最边缘点的耳石径长百分比^[23-24].使用SPSS 22.0软件对不同生活史阶段耳石Sr/Ca比值的差异性进行非参数检验($P < 0.05$ 为显著水平, Mann-Whitney U -test).利用Liu等^[25]的方法使用STARS(sequential T -test analysis of regime shifts)来对定量线分析的结果进行趋势转换,设定置信度 P 为0.05、截断长度为5、Huber权重为1.

2 结果

2.1 赣江刀鲚耳石Sr/Ca比及淡水系数

根据耳石读取年龄来看,长颌鲚有15尾为2+龄,有1尾为3+龄;短颌鲚有2尾为1+龄,其余3尾均为2+龄.

短颌鲚耳石定量线分析的Sr/Ca值及其趋势转换结果显示,所有5尾个体耳石从核心到边缘Sr/Ca比值的类型相同,均处于 < 3 的低水平(图2).

16尾长颌鲚的Sr/Ca值类型富有变化,基于数值趋势转换的结果,从核心至边缘可见显著的由低到高再降低的3个变化阶段(图3).表3和图3的结果显示,随个体的不同,其耳石Sr/Ca值第1阶段分别为从耳石核心沿矢状面向边缘延伸至710、740、930、1170、970、1170、750、1360、940、820、760、1120、970、650、880、680 μm 半径长(即径长,下同)的范围.其耳石区域的Sr/Ca较低(< 3).20GJCN03、20GJCN08和20GJCN15样品在第1阶段进入第1年轮,其余样品在第2阶段进入第2年轮.之后的第2阶段随个体的不同,分别为距核心向边缘方向的径长710~2010、740~1920、930~2020、1170~2040、970~2060、1170~2100、750~1790、1360~1900、940~1930、820~1840、760~2350、1120~2090、970~1960、650~1690、880~1760、680~1540 μm 的范围, Sr/Ca比显著升高(> 3).其中20GJCN07、20GJCN10、20GJCN11、20GJCN13该阶段的Sr/Ca比值

甚至大于 7. 除个体 20GJCN14 外,接下来的第 3 阶段,其耳石区域的 Sr/Ca 比有显著降低(多数大于 3). 除了样品 20GJCN08 和 20GJCN11,其余样品在第 2 阶段末期和第 3 阶段前期进入第 2 年轮. 16 尾长颌鲚耳石均显示 Sr/Ca 比变动的第 1 阶段与第 2 阶段、第 2 阶段与第 3 阶段间存在显著差异($P<0.05$). 而只存在两个阶段的 20GJCN14,第 1 阶段和第 2 阶段也存在显著差异($P<0.05$).

表 3 赣江刀鲚耳石 Sr/Ca 比值的变化
Tab.3 Variations in otolith Sr /Ca ratio of *Coilia nasus* from the Ganjiang River

标本类型	样本号	耳石 Sr/Ca 比值 变化阶段	距耳石核心半径 长度/ μm	元素测定点数 (<i>N</i>)	Sr/Ca 比值 (平均值 \pm 标准差)*
长颌鲚	20GJCN01	1	0~710	72	1.69 \pm 0.62 ^a
		2	710~2010	131	4.38 \pm 1.03 ^b
		3	2010~2100	91	1.05 \pm 0.39 ^a
	20GJCN02	1	0~740	75	1.65 \pm 0.79 ^a
		2	740~1920	119	3.99 \pm 1.04 ^b
		3	1920~1930	2	0.99 \pm 0.16 ^a
	20GJCN03	1	0~930	94	1.04 \pm 0.63 ^a
		2	930~2020	110	3.61 \pm 0.94 ^b
		3	2020~2050	4	2.02 \pm 0.24 ^a
	20GJCN04	1	0~1170	118	1.40 \pm 0.57 ^a
		2	1170~2040	87	4.17 \pm 0.90 ^b
		3	2040~2070	4	1.45 \pm 1.29 ^a
	20GJCN05	1	0~970	98	1.40 \pm 0.64 ^a
		2	970~2060	110	4.95 \pm 1.03 ^b
		3	2060~2070	2	2.21 \pm 0.15 ^a
	20GJCN06	1	0~1170	118	1.19 \pm 0.52 ^a
		2	1170~2100	94	3.74 \pm 0.93 ^b
		3	2100~2140	5	1.98 \pm 0.77 ^a
	20GJCN07	1	0~750	76	1.53 \pm 0.65 ^a
		2	750~1790	105	5.54 \pm 1.42 ^b
		3	1790~1810	3	1.31 \pm 0.46 ^a
	20GJCN08	1	0~1360	137	1.27 \pm 0.98 ^a
		2	1360~1900	55	3.38 \pm 0.85 ^b
		3	1900~1930	4	1.80 \pm 0.72 ^a
	20GJCN09	1	0~940	95	1.88 \pm 0.62 ^a
		2	940~1930	100	3.84 \pm 1.04 ^b
		3	1930~1940	2	1.59 \pm 1.65 ^a
	20GJCN10	1	0~820	83	1.66 \pm 0.57 ^a
		2	820~1840	103	5.36 \pm 1.31 ^b
		3	1840~1860	3	1.54 \pm 0.53 ^a
	20GJCN11	1	0~760	77	1.64 \pm 0.63 ^a
		2	760~2350	160	5.67 \pm 1.56 ^b
		3	2350~2390	5	2.01 \pm 0.81 ^a
	20GJCN12	1	0~1120	113	1.45 \pm 0.58 ^a
		2	1120~2090	98	5.80 \pm 0.95 ^b
		3	2090~2110	3	2.27 \pm 0.70 ^a
	20GJCN13	1	0~970	98	1.48 \pm 0.54 ^a
		2	970~1960	100	5.46 \pm 1.31 ^b
		3	1960~1970	2	2.26 \pm 0.64 ^a

续表 1

标本类型	样本号	耳石 Sr/Ca 比值 变化阶段	距耳石核心半径 长度/ μm	元素测定点数 (<i>N</i>)	Sr/Ca 比值 (平均值 \pm 标准差) *
短颌鲚	20GJCN14	1	0~650	66	1.66 \pm 0.53 ^a
		2	650~1690	105	4.34 \pm 1.04 ^b
	20GJCN15	1	0~880	89	1.25 \pm 0.58 ^a
		2	880~1760	89	4.31 \pm 1.07 ^b
		3	1760~1800	5	2.81 \pm 0.83 ^a
	20GJCN16	1	0~680	69	1.80 \pm 0.55 ^a
		2	680~1540	87	3.81 \pm 1.03 ^b
		3	1540~1570	4	1.30 \pm 1.08 ^a
	20GJCB01	1	0~2250	226	1.30 \pm 0.69
	20GJCB02	1	0~2180	219	1.11 \pm 0.60
短颌鲚	20GJCB03	1	0~2390	240	1.29 \pm 0.56
	20GJCB04	1	0~1580	159	1.36 \pm 0.58
	20GJCB05	1	0~1820	183	1.27 \pm 0.56

* 不同字母上标代表差异显著 ($P<0.05$, Mann-Whitney U -test) .

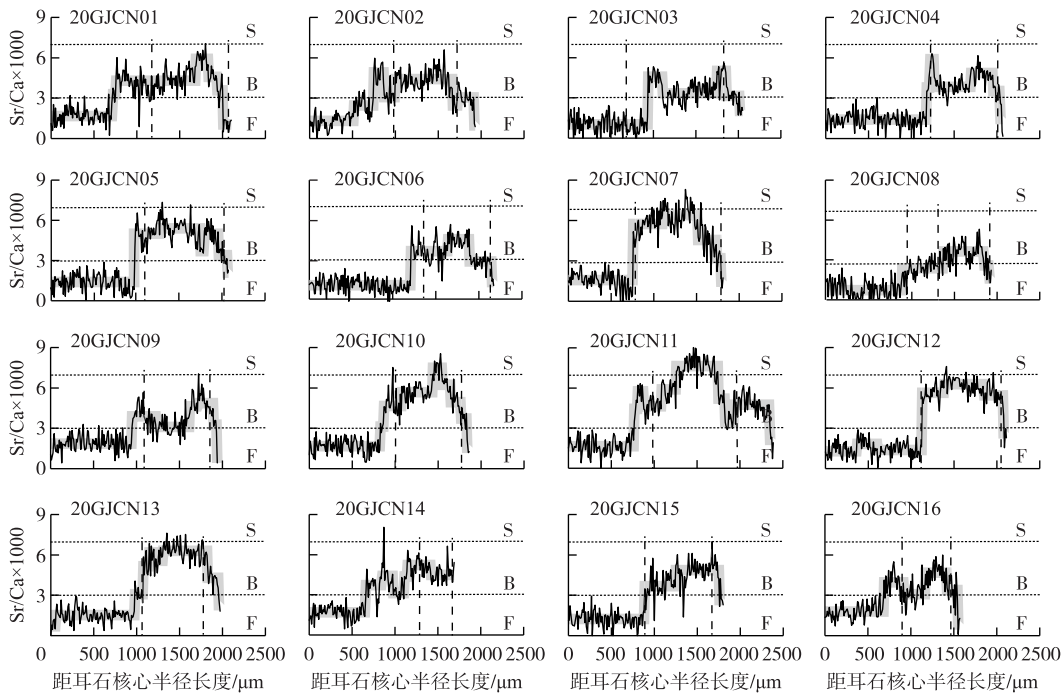


图 3 赣江 16 尾长颌鲚个体耳石 Sr/Ca 比(黑窄线)和趋势转换结果(灰宽线)(图中两条水平虚线分别对应 Sr/Ca 比值为 3 和 7. 竖直虚线对应年轮. S 表示海水, B 表示河口半咸水, F 表示淡水) [6,11,20]

Fig.3 Otolith Sr/Ca ratio transects (black narrow line) and their shifts (grey wide line) of 16 long-supermaxilla *Coilia nasus* from the Ganjiang River (The two horizontal dotted lines in the figure correspond to Sr/Ca ratios of 3 and 7, respectively. The vertical dotted lines correspond to annuli, S means sea water, B means brackish water, and F means fresh water) [6,11,20]

此外,长颌鲚的 F_c 为 0.47 ± 0.10 ,短颌鲚的 F_c 均为 1.00,长颌鲚与短颌鲚 F_c 之间的差异极显著 ($P < 0.01$) (图 4)。

2.2 赣江刀鲚耳石 Sr 含量图谱

短颌鲚耳石从核心到边缘整个截面均呈现的是低 Sr 的蓝色图谱(图 5)。长颌鲚相应截面颜色图谱富于变化(图 6)。首先是耳石核心及附近显示出低 Sr 的蓝色区域。与上述短颌鲚的图谱相似。随之则出现了明显高 Sr 含量的绿色、黄色、甚至更高的红色图谱(如 20GJCN10 和 20GJCN11)。除 20GJCN14 外,其余长颌鲚个体耳石的边缘部分还可变化回低 Sr 的蓝色图谱。从两类刀鲚耳石整体图谱来看,后者的不同颜色分色图谱和前者单纯蓝色图谱的差别极为显著。目视观察即可截然区分。所有耳石经酸蚀后可清晰观察到年轮特征(图 7)。

3 讨论

淡水和海水的元素组成及背景含量有着显著的不同,如元素 Sr 在海水中的背景含量可高至淡水背景值的 100 倍^[26] 甚至 5000 倍^[27]。鱼类在经历这些不同盐度水域生活史过程时,耳石中所形成对应区域的 Sr/Ca 比值高低或 Sr 含量图谱颜色的转换会发生规律性的变化^[11,28],从而可用于客观准确地重建其洄游的生境履历。基于多年对海区、江河和湖区刀鲚耳石微化学特征及对应不同盐度生境的关联性研究,笔者研究室发现刀鲚耳石 Sr/Ca 比值及 Sr 含量高低图谱与其盐度生境一般存在以下的规律^[6,11,20,29],即淡水(盐度 < 5 ,下同):Sr/Ca 比值 ≤ 3 ,低 Sr 蓝色图谱;河口半咸水(5~25): $3 < \text{Sr/Ca 比值} \leq 7$,较高 Sr 绿色至黄色图谱;海水(> 25):Sr/Ca 比值 > 7 ,高 Sr 红色图谱。这些“有”或“无”的规律为本研究判断赣江刀鲚个体的溯河洄游性提供了较为直观和客观的标准。

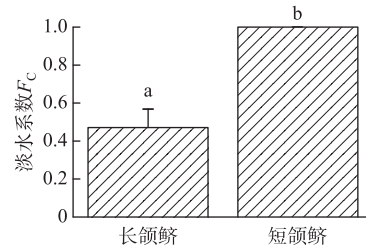


图 4 赣江刀鲚(长颌鲚和短颌鲚形态型)的淡水系数(不同字母代表差异极显著, $P < 0.01$, one-way ANOVA)

Fig.4 The freshwater coefficient of long-supermaxilla and short-supermaxilla *Coilia nasus* from the Ganjiang River (Those with different alphabet letters are significantly different at $P < 0.01$, one-way ANOVA)

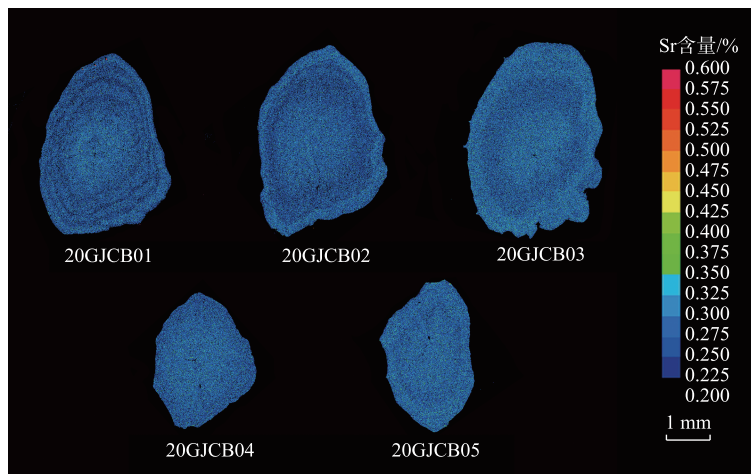


图 5 赣江短颌鲚耳石 Sr 含量的面分析图谱

Fig.5 X-ray intensity maps of Sr content in the otolith of short-supermaxilla *Coilia nasus* from the Ganjiang River

从前述本研究的结果可见,所采得短颌鲚类群耳石全径长的 Sr/Ca 比值均 < 3 ,对应的图谱均呈低 Sr 的蓝色。这些都呈现淡水生境履历的特征,且 F_c 为 1.00 显示出其全生活史均在淡水中度过;因此,可以确定这些个体均为典型淡水定居型生态表型。与其相对照,本研究所采长颌鲚类个体耳石的中部区域都有从核心到 $700 \sim 1360 \mu\text{m}$ 不等径长,较大范围的低 Sr/Ca 比值 (< 3) 的区域。对应的图谱均呈低 Sr 的蓝色。这表明上述个体均在淡水生境中孵化(对应其亲本在淡水生境中产卵),相应地早期生活史阶段需要在淡水中发育的

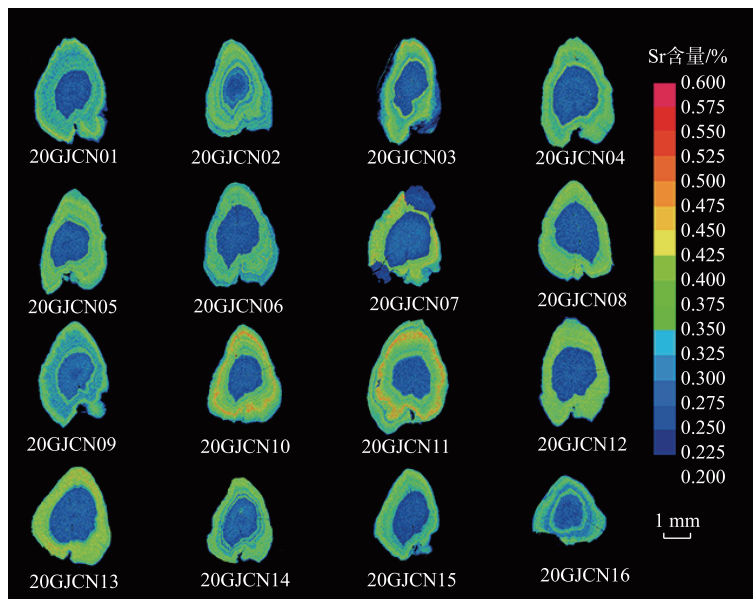


图6 赣江长颌鲢耳石 Sr 含量的面分析图谱

Fig.6 X-ray intensity maps of Sr content in the otoliths of long-supermaxilla *Coilia nasus* from the Ganjiang River

状况. 需要注意的是,在这范围之后,耳石上则会转换出现从数百到数千微米间隔的 Sr/Ca 比值(>3)的区域,且对应的 Sr 含量图谱则变换成了 Sr 含量水平显著增高的绿色、黄色、甚至红色图谱. 根据之前的大量研究不难发现^[6,11,20,29],这些海水的生境履历表明上述个体在发育到对应的生活史阶段已经入海,在半咸水或海水栖息地中继续发育和生长. 多数个体在第1冬龄之前离开淡水,进入河口半咸水,但 20GJCN03、20GJCN08 和 20GJCN15 个体在第1冬龄之后离开淡水,进入河口半咸水. 离开淡水生境后,多数个体会在河口或者近岸半咸水水域栖息,而部分个体(如 20GJCN07、20GJCN10、20GJCN11 和 20GJCN13)会继续向远岸高盐度海域迁徙. 及至第2冬龄后,除 20GJCN08 外均已启动生殖洄游. 与其他个体相比,20GJCN08 作为本研究中唯一1尾3+龄个体,其于第3冬龄后启动生殖洄游,这种情况与袁传宓^[30]所报道的刀鲚(长颌鲢)1~3冬龄时启动生殖洄游的情况相符. 由于这些个体又都在距离长江口近千千米的赣江水域被捕获,故这些长颌鲢均为典型的溯河洄游型刀鲚生态表型个体,同时该批鱼成熟度为 II~IV 期(恢复阶段至后成熟阶段)^[31],因此可认为是为生殖洄游进入赣江的亲鱼. 从赣江所孵化起源的刀鲚(长颌鲢)仔幼鱼可能会对鄱阳湖、长江干流、长江口及相邻海区资源量的补充起到不可忽视的作用.

值得注意的是,20GJCN14 刀鲚(长颌鲢)个体耳石边缘部分 Sr/Ca 比值结果显示依旧为 >3 的半咸水生境特征,其原因应该与此溯河洄游长颌鲢亲鱼迅速上溯^[32]以及耳石上 Sr/Ca 比值沉积有一定的时滞有关^[33]. 相似情况在本研究室前期长江安庆段(毗邻鄱阳湖)该相同生态表型刀鲚耳石微化学研究中也有发现^[34]. 此外,20GJCN07 个体耳石微化学结果显示耳石后端与翼叶部分 Sr 含量异常偏低. 类似情况在 Tzeng 等^[35]所研究的鳊耳石中也有报道. 其原因主要为矢耳石正常耳石晶体结构为文石,由于晶体结构发生变化,由文石变成了球文石,导致 Sr/Ca 比值异常偏低^[35]. 因此,在今后的研究中有必要利用诸如拉曼光谱分析等技术进一步分析该个体耳石上异常区域的晶体结构,以确认其值异常的原因. 同时有鉴于此,笔者建议今后在进行基于耳石微化学分析的鱼类生境履历反演研究时,除了有耳石轴上的定量线分析外,有必要对耳石进行全剖面的面分布分析,避免因晶体结构异常等原因而导致生境履历反演时发生严重误判.

本研究的耳石微化学结果首次直观地确认和实证了目前赣江有溯河洄游型刀鲚(溯河洄游长颌鲢生态表型)分布的现状. 值得注意的是,本研究所获长颌鲢绝大部分为溯河洄游型刀鲚. 其占总刀鲚标本尾数的比率达 76%,不仅远高于淡水定居型短颌鲢的比率(24%);亦远高于迄今文献中所报道鄱阳湖及其通湖水

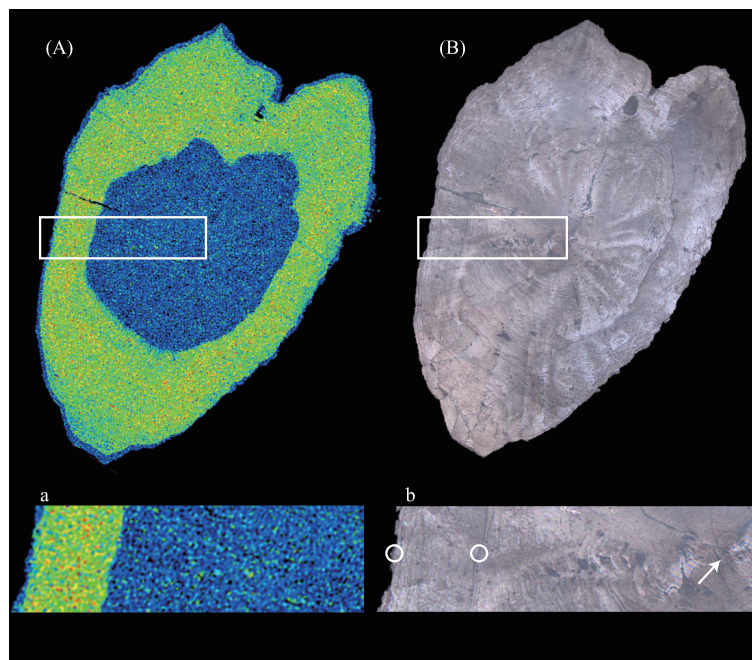


图7 刀鲚耳石相同过核心矢状面电子探针 Sr 面分布测定(A)及光学显微镜反射光观察(B)下的截面图
(a 为从核心到边缘耳石生境 Sr 含量变化; b 为从核心到边缘的年龄变化
(核心用箭头表示; 年轮用圆圈表示). a 和 b 是耳石上的同一区域)

Fig.7 The same sagittal section map through the core of otoliths for *Coilia nasus* from the Ganjiang River under Sr content measurement by electron probe analysis (A) and reflected light observation by optical microscope (B), respectively (The map a shows the variation of habitat Sr content from core to edge in otolith; the map b shows the change of annuli from core to edge in otolith (core: arrowhead; annuli: circled).

The maps a and b show the same area in otolith)

系调查所获洄游型或全部长颌鲚数占总尾数的比率,如 3.6% (鄱阳湖、赣江和抚河)、0.97% (鄱阳湖、赣江和抚河下游)、0.16% (鄱阳湖)^[15]、15% (信江)^[36]等. 该现象显示出,虽然赣江流域已近 10 年未发现有溯河洄游刀鲚^[13],但得益于上述长江生态大保护,特别是从去年开始实施的长江禁渔的国策,赣江水域洄游型刀鲚资源量和栖息地有恢复向好的趋势. 由于这些个体均自长江口外海区沿江入湖而来;因此,本研究的结果也可从某种意义上反映出,作为刀鲚重要洄游通道、分布区甚至产卵场的长江干流及鄱阳湖^[8,37],其中相应的资源量和栖息地应该同样具有恢复向好的趋势. 相关的刀鲚资源跟踪、评价和其栖息地验证研究急需尽快得到开展.

本研究所采赣江洄游型长颌鲚虽为 2 龄以上,但除 20GJCN03 个体为 IV 期外,无论雌、雄,其性成熟度均仅为 II ~ III 期;远未到产卵繁殖 (V 期) 的阶段. 这种情况与我们之前发现并定位的庐山市 (原星子县) 周边水域刀鲚产卵场情况完全不同 (繁殖度 III ~ VI 期)^[8],而与信江刀鲚 (II ~ III) 的情况相类似^[7]. 笔者推测,这些个体溯江繁殖的目的地产卵场尚未到,即赣江中存在洄游型刀鲚未知的产卵场,但其相应的产卵场可能在采样点上游附近或更远的江段中合适水域,这在今后的工作中需要深入调查. 水利工程是影响洄游型鱼类洄游通道和产卵场最主要的人为因素之一^[38]. 目前距本研究采样点最近的是在建的江西赣江丰城龙头山水电站枢纽^[39-40] (约 130 km 上游) 及 2019 年底建成的江西赣江新干航电枢纽^[41] (约 180 km 上游). 这两座大型枢纽水库虽拟或建有仿生态鱼道^[40,42],但其效果尚有待确认;因此,近期宜重点进行赣江这些枢纽以下江段洄游刀鲚分布及产卵场的定位调查,并开展这些枢纽及下游河道挖沙等人类经济开发活动对洄游刀鲚分布区、洄游通道、产卵场潜在影响的评价,以便对赣江水域该名贵鱼种资源及其栖息地环境进行有效

保护. 同样需要注意的是, 拟建的大型鄱阳湖水利枢纽工程建拦水闸位置选定在靠近该湖入长江水道的屏风山与长岭山间(其下游距长江仅 27 km)^[43]. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心迄今所发现的鄱阳湖内(如庐山/星子、都昌、永修、鄱阳、余干等)及其通湖赣江、信江溯河洄游型刀鲚的分布区或产卵场几乎全在闸址的上游^[6-11, 32, 36]. 该水利枢纽工程的建设有调枯不控洪的原则和 3 月上中旬—8 月 31 日泄水闸门全部敞开, 江湖连通的水位调度方案. 这类措施对鄱阳湖洄游型刀鲚意义重大, 即如果不能确保闸口适宜通江过鱼环境的话, 自海溯江入湖的刀鲚将无法到达这些关键栖息地, 则上述分布区或产卵场功能将受到破坏性影响. 因此, 从赣江、鄱阳湖、长江、长江口及口外沿海等水域洄游刀鲚资源需联动保护的角度来看, 鄱阳湖水利枢纽工程的建设需要高度重视闸址有效的江湖连通性.

4 结论

1) 耳石微化学结果首次发现并确证了目前赣江有溯河洄游型刀鲚分布, 为把握在长江生态大保护及 10 年禁渔的国策下赣江水域洄游型刀鲚资源量和栖息地有恢复向好的趋势提供了客观理论依据.

2) 溯河洄游型长颌鲚占总刀鲚标本尾数比率达 76%, 远高于迄今文献中所报道的鄱阳湖及其通湖水系的相关比率.

3) 赣江中存在洄游型刀鲚未知的产卵场. 相应的产卵场应该位于采样点上游附近或更远的江段中合适水域.

4) 宜尽快全面调查赣江下游全江段洄游型刀鲚的分布区及产卵场, 并评价水利工程、河道挖沙等人类经济开发活动的潜在威胁和破坏, 以对刀鲚资源及关键栖息地进行抢救性保护.

5 参考文献

- [1] Jiang T, Liu HB, Xuan ZY *et al.* Classification of ecomorphotypes of *Coilia nasus* from the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 518-527. DOI: 10.18307/2020.0220. [姜涛, 刘洪波, 轩中亚等. 长江中下游流域刀鲚(*Coilia nasus*)生态表型的划分. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 518-527.]
- [2] Yuan CM, Qin AL, Liu RH *et al.* On the classification of the anchovies, *Coilia*, from the lower Yangtze River and the southeast coast of China. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1980, **16**(3): 67-82. [袁传宓, 秦安龄, 刘仁华等. 关于长江中下游及东南沿海各省的鲚属鱼类种下分类的探讨. 南京大学学报, 1980, **16**(3): 67-82.]
- [3] Duan JR, Zhang HY, Liu K *et al.* An overview of *Coilia ectenes* in Jiangsu section of the Yangtze River. *Agricultural Science & Technology*, 2012, **13**(9): 1950-1954.
- [4] Yuan CM. Spawning migration of *Coilia nasus*. *Bulletin of Biology*, 1987, **22**(12): 1-3. [袁传宓. 刀鲚的生殖洄游. 生物学通报, 1987, **22**(12): 1-3.]
- [5] Kuang HF, Hu CH, Wu GL *et al.* Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 964-976. DOI: 10.18307/2020.0406. [匡荟芬, 胡春华, 吴根林等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 964-976.]
- [6] Jiang T, Zhou XQ, Liu HB *et al.* Two microchemistry patterns in otoliths of *Coilia nasus* from Poyang Lake, China. *Journal of Fisheries of China*, 2013, **37**(2): 239-244. DOI: 10.3724/SP.J.1231.2013.38138. [姜涛, 周昕期, 刘洪波等. 鄱阳湖刀鲚耳石的两种微化学特征. 水产学报, 2013, **37**(2): 239-244.]
- [7] Lu MJ. Studies on otolith morphometry and microchemistry of *Coilia nasus* collected from the Poyang Lake [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [卢明杰. 鄱阳湖水域刀鲚耳石的形态学和微化学研究[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [8] Jiang T, Yang J, Lu MJ *et al.* Discovery of a spawning area for anadromous *Coilia nasus* Temminck et Schlegel, 1846 in Poyang Lake, China. *Journal of Applied Ichthyology*, 2017, **33**(2): 189-192. DOI: 10.1111/jai.13293.
- [9] Yang J, Jiang T, Lu MJ *et al.* First identification of a possible nursery area for diadromous *Coilia nasus* in the Poyang Lake nearly 1000 km away from the Yangtze River Estuary. *Frontiers in Marine Science*, 2015, **2**: 40. DOI: 10.3389/conf.fmars.2015.03.00040.
- [10] Jiang T. Study on migratory ecology of *Coilia* fish in Chinese waters inferred from otolith morphometric and microchemical characteristics [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. [姜涛. 基于耳石形态和微化学特征的

- 我国鲚属鱼类洄游生态学研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2014.]
- [11] Sokta L, Jiang T, Liu HB *et al.* Loss of *Coilia nasus* habitats in Chinese freshwater lakes: An otolith microchemistry assessment. *Heliyon*, 2020, **6**(8): e04571. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04571.
- [12] You HL, Wu YM, Du BX *et al.* Analysis on annual runoff variation characteristics of Ganjiang River and its influence factors from 1950-2016. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, **50**(7): 48-54. [游海林, 吴永明, 杜冰雪等. 1950—2016 年赣江径流量变化特征及其影响因素分析. 水利水电技术, 2019, **50**(7): 48-54.]
- [13] Tong LL, Guo CB, Wang R *et al.* Research status of water environment and fish resources under multiple human disturbances in the Gan-Jiang River Basin: A review. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(12): 2879-2892. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201912009. [全路路, 郭传波, 王瑞等. 多重人类活动干扰下赣江流域水环境和鱼类资源的研究现状分析. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(12): 2879-2892.]
- [14] Liu SP, Chen DQ, Duan XB *et al.* The resources status quo and protection strategies on Chinese shad. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**(6): 679-684. [刘绍平, 陈大庆, 段辛斌等. 中国鲚鱼资源现状与保护对策. 水生生物学报, 2002, **26**(6): 679-684.]
- [15] Liu XJ, Wu XP, Ouyang S. A comparative study of some biological and ecological characteristics of *Coilia nasus* in different geographical populations. *Life Science Research*, 2016, **20**(2): 135-139. [刘雄军, 吴小平, 欧阳珊. 不同水域刀鲚的若干生物生态学特性比较研究. 生命科学研究, 2016, **20**(2): 135-139.]
- [16] Campana SE. Otolith science entering the 21st century. *Marine and Freshwater Research*, 2005, **56**(5): 485. DOI: 10.1071/mf04147.
- [17] Liu HB, Jiang T, Qiu C *et al.* Otolith microchemistry of four fish species from the Changjiang River estuary, China. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, **49**(6): 1358-1364. DOI: 10.11693/hyhz20180300069. [刘洪波, 姜涛, 邱晨等. 长江口水域四种鱼类的耳石微化学研究. 海洋与湖沼, 2018, **49**(6): 1358-1364.]
- [18] Arai T, Kotake A, Aoyama T *et al.* Identifying sea-run brown trout, *Salmo trutta*, using Sr: Ca ratios of otolith. *Ichthyological Research*, 2002, **49**(4): 380-383. DOI: 10.1007/s102280200057.
- [19] Hermann TW, Stewart DJ, Limburg KE *et al.* Unravelling the life history of Amazonian fishes through otolith microchemistry. *Royal Society Open Science*, 2016, **3**(6): 160206. DOI: 10.1098/rsos.160206.
- [20] Li MM, Jiang T, Khumbanyiwa DD *et al.* Reconstructing habitat history of *Coilia nasus* from the Hexian section of the Yangtze River in Anhui Province by otolith microchemistry. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(5): 1054-1061. DOI: 10.7541/2017.132. [李孟孟, 姜涛, Khumbanyiwa DD 等. 基于耳石微化学的长江安徽和县江段刀鲚生境履历重建. 水生生物学报, 2017, **41**(5): 1054-1061.]
- [21] Chen TT, Jiang T, Li MM *et al.* Inversion of habitat history for the long-jaw ecotype *Coilia nasus* collected from Nanjing section of the Yangtze River. *Journal of Fisheries of China*, 2016, **40**(6): 882-892. [陈婷婷, 姜涛, 李孟孟等. 长江南京江段长颌鲚生境履历的反演. 水产学报, 2016, **40**(6): 882-892.]
- [22] Jiang T, Liu HB, Lu MJ *et al.* The comparison of different pre-treatment methods for acquiring otolith annuli of *Coilia nasus*. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, **37**(2): 62-67. DOI: 10.11758/yykxjz.20150318001. [姜涛, 刘洪波, 卢明杰等. 几种前处理方法所获刀鲚(*Coilia nasus*)耳石年轮的效果比较. 渔业科学进展, 2016, **37**(2): 62-67.]
- [23] Liu HB, Jiang T, Xuan ZY *et al.* Otolith microchemical analysis of tapertail anchovy *Coilia nasus* from Ariake Sea and its adjacent tributaries in Japan. *Fisheries Science*, 2020, **39**(4): 500-508. [刘洪波, 姜涛, 轩中亚等. 日本有明海及周边水域刀鲚耳石微化学研究. 水产科学, 2020, **39**(4): 500-508.]
- [24] Jiang T, Liu HB, Shen XQ *et al.* Life history variations among different populations of *Coilia nasus* along the Chinese coast inferred from otolith microchemistry. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 2014, **59**(2): 383-389. DOI: 10.5109/1467650.
- [25] Liu HB, Jiang T, Yang J. Unravelling habitat use of *Coilia nasus* from the Rokkaku River and Chikugo River estuaries of Japan by otolith strontium and calcium. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, **37**(6): 52-60. DOI: 10.1007/s13131-018-1190-8.
- [26] Pontual H, Geffen AJ. Otolith microchemistry. In: Panfili J, Pontual H, Wright PJ *et al.* eds. *Manual of fish sclerochronology*. Brest: Ifremer-IRD Coedition, 2004: 245-307.
- [27] Chowdhury MJ, Blust R. Strontium. In: Wood CM, Farrell AP, Brauner CJ eds. *Homeostasis and toxicology of non-essential metals*. Fish physiology series. New York: Elsevier, 2012.
- [28] Yang J, Jiang T, Liu HB. Are there habitat salinity markers of the Sr:Ca ratio in the otolith of wild diadromous fishes? A

- literature survey. *Ichthyological Research*, 2011, **58**(3): 291-294. DOI: 10.1007/s10228-011-0220-8.
- [29] Yang J, Arai T, Liu H *et al.* Reconstructing habitat use of *Coilia mystus* and *Coilia ectenes* of the Yangtze River estuary, and of *Coilia ectenes* of Taihu Lake, based on otolith strontium and calcium. *Journal of Fish Biology*, 2006, **69**(4): 1120-1135. DOI: 10.1111/j.1095-8649.2006.01186.x.
- [30] Yuan CM. The resources and population composition and causes of *Coilia nasus* in the middle and lower reaches of the Yangtze river. *Chinese Journal of Zoology*, 1988, **23**(3): 12-15. DOI: 10.13859/j.cjz.1988.03.005. [袁传宓. 长江中下游刀鲚资源和种群组成变动状况及其原因. 动物学杂志, 1988, **23**(3): 12-15.]
- [31] Li YX, Xie SG, Li ZJ *et al.* Gonad development of an anadromous fish *Coilia ectenes* (Engraulidae) in lower reach of Yangtze River, China. *Fisheries Science*, 2007, **73**(6): 1224-1230. DOI: 10.1111/j.1444-2906.2007.01459.x.
- [32] Jiang T, Liu HB, Li MM *et al.* Investigation on shrimp feeding of *Coilia nasus* during its anadromous migration along the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 458-463. DOI: 10.18307/2018.0217. [姜涛, 刘洪波, 李孟孟等. 溯河洄游长江刀鲚(*Coilia nasus*)摄食虾类的调查. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 458-463.]
- [33] Yokouchi K, Fukuda N, Shirai K *et al.* Time lag of the response on the otolith strontium/calcium ratios of the Japanese eel, *Anguilla japonica* to changes in strontium/calcium ratios of ambient water. *Environmental Biology of Fishes*, 2011, **92**(4): 469-478. DOI: 10.1007/s10641-011-9864-5.
- [34] Li MM, Jiang T, Chen TT *et al.* Otolith microchemistry of the estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* from the Anqing section of the Yangtze River and its significance for migration ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(8): 2788-2795. DOI: 10.5846/stxb201601280212. [李孟孟, 姜涛, 陈婷婷等. 长江安庆江段刀鲚耳石微化学及洄游生态学意义. 生态学报, 2017, **37**(8): 2788-2795.]
- [35] Tzeng W, Chang C, Wang C *et al.* Misidentification of the migratory history of anguillid eels by Sr/Ca ratios of vaterite otoliths. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, **348**: 285-295. DOI: 10.3354/meps07022.
- [36] Lu MJ, Jiang T, Liu HB *et al.* Existence of anadromous *Coilia nasus* in Xinjiang River of Jiangxi Province as determined by otolith microchemistry. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, **22**(5): 978-985. DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.15092. [卢明杰, 姜涛, 刘洪波等. 信江发现溯河洄游型刀鲚的实证研究. 中国水产科学, 2015, **22**(5): 978-985.]
- [37] Jiang T, Liu HB, Lu MJ *et al.* A possible connectivity among estuarine tapertail anchovy (*Coilia nasus*) populations in the Yangtze River, Yellow Sea, and Poyang Lake. *Estuaries and Coasts*, 2016, **39**(6): 1762-1768. DOI: 10.1007/s12237-016-0107-z.
- [38] Littrell KA, Ellis D, Gephard SR *et al.* Evaluating the potential for prezygotic isolation and hybridization between landlocked and anadromous alewife (*Alosa pseudoharengus*) following secondary contact. *Evolutionary Applications*, 2018, **11**(9): 1554-1566. DOI: 10.1111/eva.12645.
- [39] Zhai CX. Application of combining diversion structure for construction with permanent structure in Longtoushan hydraulic project. *Regional Governance*, 2019, (12): 295-296. [翟超雄. 龙头山水电站施工导流建筑物与永久建筑物结合的应用. 区域治理, 2019, (12): 295-296.]
- [40] Zhao YC. Analysis on adjustment of diversion scheme of Longtoushan hydraulic project. *Sichuan Water Conservancy*, 2017, (z2): 4-7, 15. [赵玉成. 浅析龙头山水电站枢纽工程导流方案的调整. 四川水利, 2017, (z2): 4-7, 15.]
- [41] Zhang Y. Analysis of future changes in water and sediment in the lower reaches of the Ganjiang River. *Henan Science and Technology*, 2019, (32): 106-108. [张颖. 赣江下游未来水沙变化分析. 河南科技, 2019, (32): 106-108.]
- [42] Guo SG. Overall design of near-nature fishway in Xingan hydraulic project in the Ganjiang River. *Port & Waterway Engineering*, 2018, (12): 155-159. [郭生根. 赣江新干航电枢纽仿生态鱼道整体设计. 水运工程, 2018, (12): 155-159.]
- [43] Chen LG, Chen LM, Xu YF *et al.* Ecological water level for proposed hydraulic construction locking Lake Poyang based upon wintering waterfowls habitat modelling. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1519-1528. DOI: 10.18307/2020.0523. [陈炼钢, 陈黎明, 徐伟凡等. 基于越冬水鸟生境模拟的拟建鄱阳湖水利枢纽生态控制水位探讨. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1519-1528.]