

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20230411002

http://www.yykxjz.cn/

许颖, 姜涛, 杨健, 刘洪波, 陈修报. 长江安庆江段存在溯河洄游型和淡水定居型刀鲚实证研究. 渔业科学进展, 2024, 45(4): 01–14

XU Y, JIANG T, YANG J, LIU H B, CHEN X B. Coexistence of freshwater resident and anadromous *Coilia nasus* in the Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province, China. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(4): 01–14

长江安庆江段存在溯河洄游型和淡水定居型刀鲚实证研究*

许颖¹ 姜涛² 杨健^{1,2①} 刘洪波² 陈修报²

(1. 南京农业大学无锡渔业学院 江苏 无锡 214081;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心渔业微化学实验室 江苏 无锡 214081)

摘要 为了探究长江十年禁渔后安庆江段刀鲚的生境履历, 利用 X 射线电子探针微区分析技术研究安庆江段不同类型长颌刀鲚(*Coilia nasus*)和短颌刀鲚的耳石 Sr 和 Ca 微化学特征。结果显示, 根据耳石 Sr/Ca 值的变化值将安庆江段的短颌刀鲚分为 2 类, 一类是其比值为一直小于 3.0 的低值, 表明其纯淡水的生境履历; 另一类是其比值不仅有小于 3.0 的低值区, 还有大于 3.0 的高值区(小于 7.0), 表明其不仅有淡水的生境履历, 还有高盐度的河口半咸水生境履历。长颌刀鲚的耳石 Sr/Ca 值均具有小于 3.0 的低值区和大于 3.0 (甚至大于 7.0)高值区的显著波动, 表现为典型的淡水、河口半咸水及海水的溯河洄游型生境履历, Sr 含量面分析图谱也可印证上述结果。本研究表明, 长江安庆江段刀鲚群体组成较为复杂, 同时存在溯河洄游型、淡水定居型短颌刀鲚和溯河洄游型长颌刀鲚 3 种生态表型个体。

关键词 长江; 安庆江段; 长颌刀鲚; 短颌刀鲚; 电子探针微区分析; 生境履历

中图分类号 Q958.12 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2024)04-0001-14

刀鲚(*Coilia nasus*), 隶属于鲱形目(Clupeiformes)、鲱科(Engraulidae)、鲱属(*Coilia*)。其有“长江三鲜”之一的美誉, 是长江中下游一种溯河洄游性的名贵鱼类。长江刀鲚种群主要分为溯河洄游和淡水定居型的长颌刀鲚(即长颌鲚, *Coilia ectenes*, 因其尚未被普遍接受为独立物种, 本文中特统称为长颌刀鲚), 溯河洄游和淡水定居型的短颌刀鲚(即短颌鲚, *Coilia brachygnathus*, 因其亦尚未被普遍接受为独立物种, 本文中特统称为短颌刀鲚)以及陆封型的湖鲚(曾用名: *Coilia ectenes taihuensis*)等 5 种生态表型(姜涛等, 2020)。长颌刀鲚的经济价值极高, 资源已趋于枯竭;

而短颌刀鲚和湖鲚的经济价值较低, 但资源相对较为丰富(吴斌等, 2015; 陈卫东等, 2017)。不同生态表型的刀鲚在外形上极其相似, 同时, 不同群体间常常存在混栖现象(姜涛等, 2013; 陈婷婷等, 2016a)。单纯根据刀鲚上颌骨的长短来辨别其是否洄游的方法已被相关学者推翻(徐钢春等, 2014; 陈婷婷等, 2016b)。目前的形态学、分子生物学等研究手段也无法对刀鲚群体的生态表型进行准确判断(程万秀等, 2011; Liu *et al.*, 2014)。因而, 准确地评价刀鲚的群体组成和资源现状及精确地定位“三场一通道”的工作较难开展(姜涛等, 2021)。耳石是硬骨鱼类内耳中最早形成的

* 国家重点研发计划(2022YFF0608203)和农业农村部财政专项(CJDC-2017-22)共同资助。

许颖, E-mail: 2021813043@stu.njau.edu.cn

① 通信作者: 杨健, 研究员, E-mail: jiany@ffrc.cn

收稿日期: 2023-04-11, 收修改稿日期: 2023-05-17

一种以 CaCO_3 为主要成分的硬组织,其通过自然生物矿化沉积而成,形态结构相对稳定,不易被重新吸收或改变,可以记录鱼类过去所经历的生境履历(Campana *et al.*, 2001; 司飞等, 2019)。其中,耳石微化学(如 Sr/Ca 值及 Sr 含量)可作为鱼类(尤其是洄游型鱼类)的生境“指纹”,在鱼类生境履历反演和生活史特征重建上极具优势(Yang *et al.*, 2006; 姜涛等, 2015; Jiang *et al.*, 2017)。

长江安庆江段隶属于安徽省,是刀鲚在长江中下游的主要分布地区之一,也是刀鲚从长江口上溯至鄱阳湖的重要洄游通道(袁传宓, 1987; Li *et al.*, 2007)。但由于刀鲚生长、发育和繁殖需要生境切换,生活史履历复杂,易受到人类活动的影响而导致资源量下降,外加长期以来的酷渔滥捕、水体污染等原因,刀鲚资源已趋于枯竭,无法形成汛期(朱孝锋等, 2009; 施炜纲等, 2009; 万全等, 2009)。在长江十年禁渔的大背景下,对长江沿线刀鲚资源的跟踪评价和保护工作意义重大(姜涛等, 2022)。因此,对长江安庆江段刀鲚开展研究的重要性不言而喻。本研究拟基于实验室前期研究工作(Jiang *et al.*, 2012、2014; 李孟孟等, 2017a),利用电子探针微区分析技术对长江十年禁渔后安庆江段不同类型长颌和短颌刀鲚进行探究,重建它们的生境履历,以期更加全面地了解该江段的群体组成和洄游模式,进而验证长江十年禁渔对洄游性鱼类保护工作中“旗舰种”之一的刀鲚资源恢复和保护的效果。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验研究所用刀鲚样本共 48 尾,均捕获于长江安徽安庆江段,其中,捕获于 2019 年 6 月和 2022 年 7 月的长颌刀鲚分别为 19 和 14 尾,捕获于 2021 年 12 月的短颌刀鲚 15 尾。首先对样品进行编号,随后测量体长、体重、上颌骨长、头长等基础数据(表 1 和表 2)。统一摘取矢耳石,先用去离子水,再用无水酒精清洗后干燥待用。统一选择左耳石开展微化学研究。

1.2 研究方法

首先,将干燥后的耳石样本用 AB 胶固定在包埋盒的底座上,静置 30 min 直至凝固。然后,使用 Epofix 环氧树脂(Struers 公司,丹麦)对耳石进行包埋,包埋完成后将其置于 38 ℃ 烘箱中固化,12 h 后取出已固化的树脂块粘贴于载玻片上,将其静置凝固,约 30 min。然后使用切磨机(Discoplan-TS, 司特尔公司,丹麦)对其进行修整。随后使用切磨机对耳石进行研磨,先粗磨后精磨:首先使用 700 目金刚砂轮对其进行粗磨,磨到耳石还没有暴露;再使用 2 000 目的砂纸进行精磨,这一阶段磨至核心将要暴露但未完全暴露出来的状态。然后,使用磨抛机(LaboPol-35, 司特尔公司,丹麦)并配合抛光液进行抛光至表面无

表 1 长江安徽安庆江段短颌刀鲚的常规测量数据

Tab.1 Sampling details of short maxillary *C. nasus* from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

样品编号 Sample code	体长 Body length/mm	体重 Body weight/g	年龄 Age	上颌骨长 Maxillary length/mm	上颌骨长/头长 Maxillary length/ Head length	性别及成熟度 Sex and maturity degree
21AQCB01	282	99.71	3	44.02	0.95	♂ II
21AQCB02	253	50.92	2	40.77	0.96	♀ II
21AQCB03	278	70.43	3	40.41	0.89	♀ II
21AQCB04	239	40.72	2	34.18	0.89	♀ II
21AQCB05	266	58.61	2	39.81	0.91	♀ II
21AQCB06	236	43.61	2	36.14	0.92	♂ II
21AQCB07	210	23.95	1	32.77	0.92	♀ II
21AQCB08	171	15.66	2	26.96	0.92	♂ II
21AQCB11	223	38.23	1	31.47	0.92	♂ II
21AQCB12	185	19.44	1	26.82	0.96	♂ II
21AQCB13	154	11.22	1	26.36	0.97	♀ II
21AQCB14	267	60.45	3	38.87	0.94	♀ II
21AQCB15	226	37.01	2	32.79	0.90	♂ II
21AQCB16	262	59.98	2	40.96	0.97	♂ II
21AQCB17	261	57.97	2	39.04	0.96	♀ II

表 2 长江安徽安庆江段长颌刀鲚的常规测量数据

Tab.2 Sampling details of long maxillary *C. nasus* from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

样品编号 Sample code	体长 Body length/mm	体重 Body weight/g	年龄 Age	上颌骨长 Maxillary length/mm	上颌骨长/头长 Maxillary length/ Head length	性别及成熟度 Sex and maturity degree
19AQCE01	273	60.81	2	43.85	1.12	♂ II
19AQCE02	256	56.67	2	43.89	1.15	♀ III
19AQCE03	235	47.43	2	43.91	1.18	♂ II
19AQCE04	258	43.79	2	39.68	1.04	♀ II
19AQCE06	261	60.56	2	42.86	1.12	♀ III
19AQCE07	249	46.63	2	41.20	1.16	♂ III
19AQCE08	256	56.12	3	45.08	1.27	♀ III
19AQCE09	254	46.92	2	40.21	1.13	♂ III
19AQCE11	263	54.63	2	46.52	1.25	♀ III
19AQCE12	257	49.51	2	39.74	1.09	♂ III
19AQCE13	261	48.60	2	44.06	1.19	♂ III
19AQCE14	245	49.99	2	45.66	1.26	♀ III
19AQCE15	273	57.47	2	43.91	1.14	♀ III
19AQCE16	256	61.78	2	41.72	1.11	♂ III
19AQCE17	258	49.32	2	42.87	1.16	♀ III
19AQCE18	255	51.24	2	45.45	1.21	♀ III
19AQCE20	256	50.55	2	43.71	1.10	♀ III
19AQCE21	263	62.29	2	42.66	1.21	♀ III
19AQCE22	244	49.21	2	36.16	1.08	♀ III
19AQCE23	252	54.75	2	39.45	1.13	♂ III
22AQCE01	282	67.82	2	48.51	1.16	♀ III
22AQCE02	296	81.29	2	52.79	1.16	♀ III
22AQCE03	282	56.66	2	46.35	1.12	♂ III
22AQCE04	267	56.73	2	47.39	1.18	♀ III
22AQCE05	281	63.96	2	46.49	1.08	♀ III
22AQCE07	322	101.82	2	58.82	1.14	♀ III
22AQCE08	291	75.66	2	21.13	0.51	♀ III
22AQCE09	273	62.92	2	49.56	1.22	♂ III
22AQCE10	251	50.32	2	46.17	1.16	♀ III
22AQCE11	271	58.12	2	45.19	1.09	♀ III
22AQCE12	298	86.73	3	44.86	1.00	♂ III
22AQCE13	284	61.91	2	47.90	1.15	♂ III
22AQCE14	295	83.18	2	53.36	1.14	♀ III
22AQCE15	253	50.65	2	43.15	1.09	♀ III

明显划痕。将耳石放入盛有 Milli-Q 水的烧杯中置于超声清洗仪中清洗 5 min, 清洗结束后晾干。最后, 使用真空镀膜机(JEE-420, 日本电子株式会社)进行镀膜, 模式为 36 A、25 s。

使用 X 射线电子探针微区分析仪(JXA-8100 型 EPMA, 日本电子株式会社, 日本)进行耳石 Sr 和 Ca 元素的微化学分析(Yang *et al*, 2006)。具体为先进行从耳石的核心开始沿着最长径一直到其边缘的定量

线分析(line transect analysis)并计算 Sr/Ca 值($Sr/Ca \times 1\,000$, 下同), 而后选取代表性个体进行耳石矢状面上 Sr 含量的面分布分析(mapping analysis)。分析参数设定见表 3。

在电子探针微区分析结束后, 将样品再次进行抛光, 以去除表面所镀的碳膜, 抛光完成后将耳石置于 5% EDTA 中酸蚀 10 s, 直到耳石年轮可以清楚地读取年龄(姜涛等, 2016)。

表 3 X 射线电子探针微区分析仪分析参数
Tab.3 The analysis parameters for electron probe X-ray microanalysis

项目 Project	加速电压 Acceleration voltage/kV	电子束电流 Beam-current/A	束斑直径 Beam spot diameter/ μm	每点驻留时间 Dwell time at each point/s	间隔/像素大小 Interval/Pixel size/ μm
定量线分析 Line transect analysis	15	2.0×10^{-8}	5	15	10
面分布分析 Mapping analysis	15	5.0×10^{-7}	5	0.03	7×7

1.3 数据分析

淡水系数(F_C)可有效地反映洄游性鱼类对淡水生境的依存程度(Jiang *et al.*, 2014), 计算公式如下:

$$F_C=L_f/L_T$$

式中, L_f 为低 Sr/Ca 值(<3.0)的耳石径长; L_T 为整个耳石的分析径长。

主要利用 Excel 2019 对实验的数据进行汇总和作图分析, 为了能更加直观地看出刀鲚耳石 Sr/Ca 值的变化趋势, 使用了 STARS (sequential-test analysis of regime shifts)方法(卢明杰等, 2015)。其中, 耳石 Sr/Ca 值的绘制参数: 截断长度为 10、Huber 权重为 1、置信度 P 为 0.1, 同时, 使用 SPSS 20.0 分析软件进行非参数检验(Mann-Whitney U-test)。

2 结果

2.1 刀鲚耳石 Sr/Ca 值的定量线分析

短颌刀鲚共 15 尾, 为 1~3 龄。根据线分析的结果可将其归为 2 类(图 1)。第 1 类耳石样品包含 9 个体(编号为 21AQCB01、21AQCB02、21AQCB03、21AQCB06、21AQCB08、21AQCB12、21AQCB13、21AQCB16 和 21AQCB17)。耳石 Sr/Ca 值有 1 个阶段, 即从核心到边缘始终稳定在低值(<3.0)。第 2 类耳石样品包含 4 尾个体(编号为 21AQCB05、21AQCB07、21AQCB14 和 21AQCB15)。它们的 Sr/Ca 值可分高值(>3.0)和低值(<3.0) 2 个阶段。个体 21AQCB05 和 21AQCB07 在核心至距核心 630 μm 和 1 420 μm 的耳

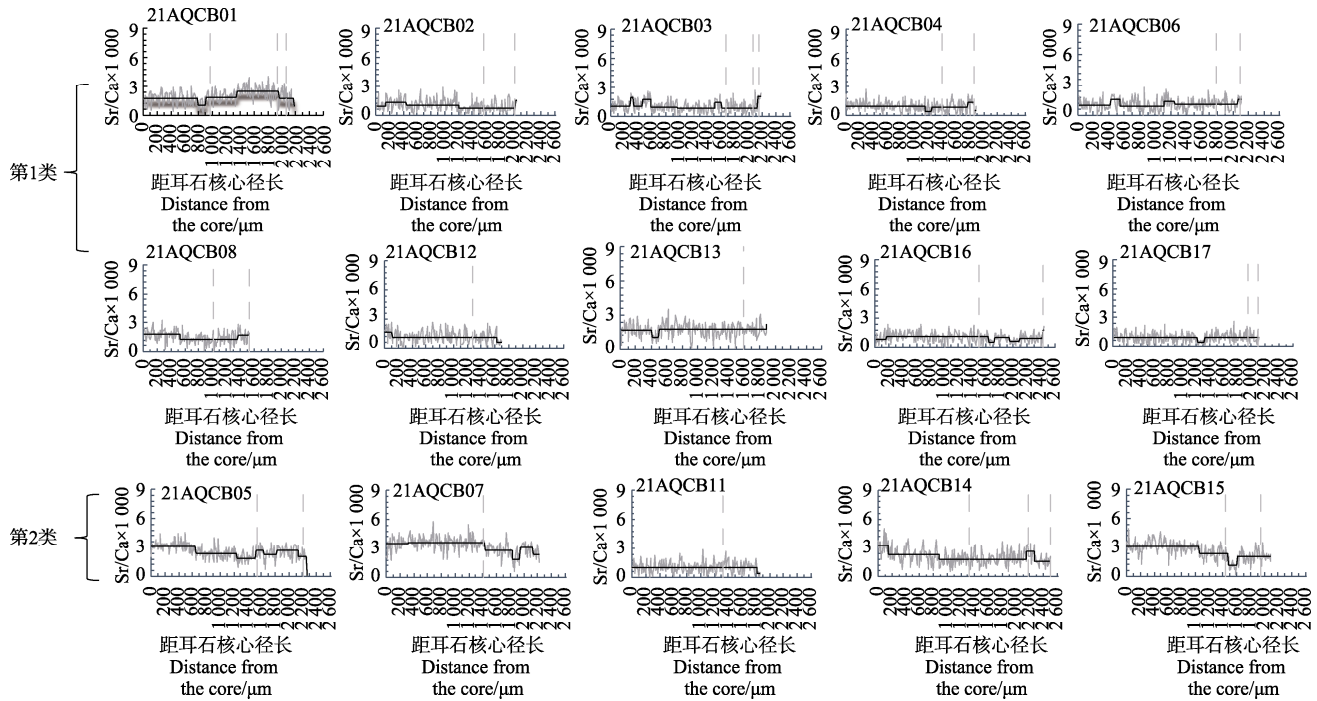


图 1 长江安徽安庆江段 15 尾短颌刀鲚(2021)耳石从核心(0 μm)到边缘定量线分析的 Sr/Ca 值变化

Fig.1 Variation of Sr/Ca values of otoliths along line transects from the core (0 μm) to the edge of 15 short maxillary *C. nasus* (2021) from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

石径长上的 Sr/Ca 值平均在 3.0 以上, 至 2 250 μm 和 2 210 μm 处, Sr/Ca 值平均处于 3.0 以下。个体 21AQCB14 在核心至距核心 140 μm 的耳石径长上的 Sr/Ca 值平均在 3.0 以上, 至 2 500 μm 处, Sr/Ca 值平均降至 3.0 以下。个体 21AQCB15 在核心至距核心 1 050 μm 的耳石径长上 Sr/Ca 值平均在 3.0 以上, 至 2 440 μm 处, Sr/Ca 值平均在 3.0 以下。各水平间差异显著($P<0.05$) (表 4)。此外, 第 1 类和第 2 类耳石样品对淡水生境依赖程度的 F_C 值分别为 1 和 0.37。

2019 年长颌刀鲚共 19 尾, 为 1~2 龄。根据线分析的结果可将其归为 2 类(图 2)。第 1 类耳石样品包含 6 尾个体(编号为 19AQCE01、19AQCE03、19AQCE06、19AQCE11、19AQCE17 和 19AQCE23)。它们的 Sr/Ca 值主要有 2 个阶段, 从核心到边缘的 Sr/Ca 值不仅有低值(<3.0), 还有高值(>3.0)。个体 19AQCE01、19AQCE03、19AQCE06、19AQCE11、

19AQCE17 和 19AQCE23 的 Sr/Ca 值在核心至距核心 770~1 120 μm 的耳石径长上均在 3.0 以下, 此为第 1 阶段(低值区)。随后, 它们的 Sr/Ca 值均开始升高并逐渐超过 3.0 并保持稳定, 此为第 2 阶段(高值区)。第 2 类耳石样品包含 13 尾个体(编号为 19AQCE02、19AQCE04、19AQCE07、19AQCE08、19AQCE09、19AQCE12、19AQCE14、19AQCE15、19AQCE16、19AQCE18、19AQCE20、19AQCE21 和 19AQCE22)。它们的 Sr/Ca 值波动较为复杂, 有 3~6 个阶段, 有小于 3.0 的低值, 还有大于 3.0 (甚至大于 7.0) 的高值。它们的 Sr/Ca 值在核心至距核心 420~1 520 μm 的耳石径长上均处于 3.0 以下, 此为第 1 阶段(低值区)。随后, Sr/Ca 值升高至 3.0 以上并保持稳定, 此为第 2 阶段(高值区)。随后, 19AQCE02、19AQCE04、19AQCE07、19AQCE08、19AQCE09、19AQCE15、19AQCE16、19AQCE20 和 19AQCE21 的 Sr/Ca 值开始降低至 3.0 以

表 4 长江安徽安庆江段短颌刀鲚样品耳石中 Sr 和 Ca 的微化学变化

Tab.4 Variation of Sr/Ca values of microchemistry analysis from the core (0 μm) to the edge in otoliths of short maxillary *C. nasus* from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

样本编号 Sampling code	耳石 Sr/Ca 值变化阶段 Variation phases of otolith Sr/Ca ratio	耳石径长 Distance from otolith core/ μm	元素测定点数量 Number of detected points	Sr/Ca $\times 10^3$ (Mean $\pm$ SD)	淡水系数 F_C
21AQCB01	1	0~2 170	218	1.94 $\pm$ 0.74	1.00
21AQCB02	1	0~2 030	204	1.00 $\pm$ 0.60	1.00
21AQCB03	1	0~2 170	218	0.99 $\pm$ 0.58	1.00
21AQCB04	1	0~1 890	190	0.99 $\pm$ 0.53	1.00
21AQCB05	1 ^a	0~630	65	3.18 $\pm$ 0.53	0.29
	2 ^b	640~2 250	161	2.32 $\pm$ 0.63	
21AQCB06	1	0~2 110	212	1.10 $\pm$ 0.55	1.00
21AQCB07	1 ^a	0~1 420	143	3.60 $\pm$ 0.68	0.64
	2 ^b	1 430~1 930	51	2.62 $\pm$ 0.75	
	3 ^a	1 940~2 120	19	3.02 $\pm$ 0.50	
	4 ^b	2 130~2 210	9	2.40 $\pm$ 0.59	
21AQCB08	1	0~1 530	154	1.55 $\pm$ 0.62	1.00
21AQCB11	1	0~1 860	187	1.08 $\pm$ 0.58	1.00
21AQCB12	1	0~1 700	171	1.19 $\pm$ 0.61	1.00
21AQCB13	1	0~1 890	190	1.67 $\pm$ 0.61	1.00
21AQCB14	1 ^a	0~140	15	3.32 $\pm$ 0.91	0.06
	2 ^b	150~2 500	236	1.97 $\pm$ 0.73	
21AQCB15	1 ^a	0~1 040	105	3.16 $\pm$ 0.66	0.50
	2 ^b	1 040~2 090	105	2.07 $\pm$ 0.72	
21AQCB16	1	0~2 440	245	1.03 $\pm$ 0.51	1.00
21AQCB17	1	0~2 110	212	0.97 $\pm$ 0.52	1.00

注: 同一样本中相同字母表示不同阶段差异不显著($P>0.05$); 不同字母代表差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The same letter in the same sample indicates that there is no significant difference in different stages ($P>0.05$); Different letters represent significant differences ($P<0.05$). The same below.

下并保持稳定。个体 19AQCE12、19AQCE14、19AQCE18 和 19AQCE22 的 Sr/Ca 值变化较为复杂,个体 19AQCE012 的 Sr/Ca 值在经历了低值(<3.0)、高值(>3.0) 2 个阶段的变化后,比值开始下降至 3.0 以下,随后,又再次上升至 3.0 以上。个体 19AQCE014 的 Sr/Ca 值在经历了 2 个阶段的变化后,再次上升至 7.0 以上,随后降低至 3.0 以上,又上升至 7.0 以上,随后比值降低且仍为 3.0 以上。个体 19AQCE018 和 19AQCE22 的 Sr/Ca 值在经历了前 2 个阶段的变化后,比值再次上升且至 7.0 以上,随后,比值降低至 3.0 以上。各水平间差异显著($P<0.05$) (表 5)。另外,第 1 类和第 2 类耳石样品对淡水生境依赖程度的 F_C 值分别为 0.50 和 0.46。

2022 年长颌刀鲚共 14 尾,为 2~3 龄。根据线分析的结果可将其归为 2 类(图 3)。第 1 类耳石样品包括 2 尾个体(编号为 22AQCE02 和 22AQCE07)。耳石 Sr/Ca 值可分为低值(<3.0)和高值(>3.0) 2 个阶段。个体 22AQCE02 和 22AQCE07 的 Sr/Ca 值在核心至距核心 1 020~1 290 μm 的耳石径长上均处于 3.0 以下,此为第 1 阶段(低值区)。随后, Sr/Ca 值升高至 3.0 以上并保持稳定,此为第 2 阶段(高值区)。第 2 类样品包含 12 尾个体(编号为 22AQCE01、22AQCE03、22AQCE04、22AQCE05、22AQCE08、22AQCE09、22AQCE10、22AQCE11、22AQCE12、22AQCE13、22AQCE14 和 22AQCE15)。它们的 Sr/Ca 值波动较为复杂,可分为 3~5 个阶段,不仅有小于 3.0 的低值,

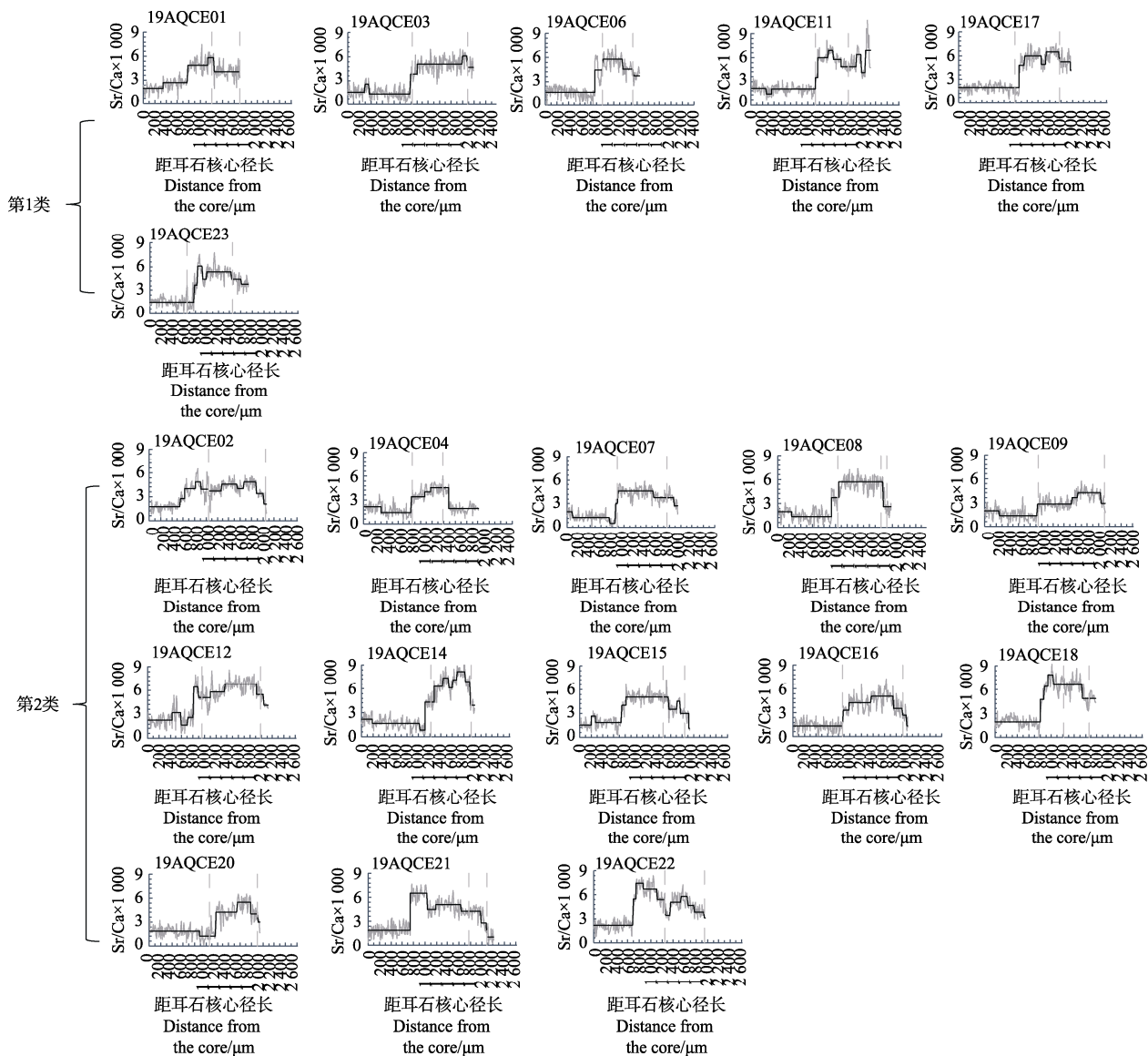


图 2 长江安徽安庆江段 19 尾长颌刀鲚(2019)耳石从核心(0 μm)到边缘定量线分析的 Sr/Ca 值变化

Fig.2 Variation of Sr/Ca values of otoliths along line transects from the core (0 μm) to the edge of 19 long maxillary *C. nasus* (2019) from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

表 5 长江安徽安庆江段长颌刀鲚样品耳石中 Sr 和 Ca 的微化学变化

Tab.5 Variation of Sr/Ca values of microchemistry analysis from the core (0 μm) to the edge in otoliths of long maxillary *C. nasus* from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

样本编号 Sampling code	耳石 Sr/Ca 值变化阶段 Variation phases of otolith Sr/Ca ratio	耳石径长 Distance from otolith core/ μm	元素测定点数量 Number of detected points	Sr/Ca $\times 10^3$ (Mean $\pm$ SD)	淡水系数 F_C
19AQCE01	1 ^a	0~770	78	2.25 $\pm$ 0.73	0.46
	2 ^b	780~1 700	93	4.55 $\pm$ 1.02	
19AQCE02	1 ^a	0~610	62	1.87 $\pm$ 0.58	0.31
	2 ^b	620~2 000	139	4.18 $\pm$ 0.87	
	3 ^a	2 010~2 050	5	2.23 $\pm$ 1.20	
19AQCE03	1 ^a	0~1 080	109	1.41 $\pm$ 0.71	0.49
	2 ^b	1 090~2 180	110	4.98 $\pm$ 0.96	
19AQCE04	1 ^a	0~820	83	1.76 $\pm$ 0.67	0.41
	2 ^b	830~1 480	66	4.07 $\pm$ 0.76	
	3 ^a	1 490~2 010	53	1.92 $\pm$ 0.50	
19AQCE06	1 ^a	0~850	86	1.49 $\pm$ 0.68	0.52
	2 ^b	860~1 630	78	4.94 $\pm$ 1.20	
19AQCE07	1 ^a	0~840	85	1.34 $\pm$ 0.57	0.44
	2 ^b	850~1 880	104	4.20 $\pm$ 0.80	
	3 ^a	1 890~1 940	6	2.75 $\pm$ 0.69	
19AQCE08	1 ^a	0~920	93	1.52 $\pm$ 0.68	0.47
	2 ^b	930~1 820	90	5.30 $\pm$ 1.05	
	3 ^a	1 830~1 990	17	2.49 $\pm$ 1.15	
19AQCE09	1 ^a	0~1 520	153	2.02 $\pm$ 0.90	0.72
	2 ^b	1 530~2 030	51	4.12 $\pm$ 0.65	
	3 ^a	2 040~2 110	8	2.82 $\pm$ 0.67	
19AQCE11	1 ^a	0~1 120	113	1.94 $\pm$ 0.58	0.54
	2 ^b	1 130~2 090	97	5.65 $\pm$ 1.30	
19AQCE12	1 ^a	0~420	43	2.18 $\pm$ 0.62	0.54
	2 ^b	430~570	15	3.22 $\pm$ 1.15	
	3 ^a	580~790	22	2.06 $\pm$ 0.86	
	4 ^b	800~2 110	132	6.01 $\pm$ 1.19	
19AQCE14	1 ^a	0~1 110	112	1.67 $\pm$ 0.67	0.56
	2 ^b	1 120~1 420	31	5.23 $\pm$ 1.23	
	3 ^c	1 430~1 520	10	7.39 $\pm$ 0.82	
	4 ^b	1 530~1 600	8	6.02 $\pm$ 0.83	
	5 ^c	1 610~1 810	21	7.89 $\pm$ 0.74	
	6 ^b	1 820~1 980	17	5.47 $\pm$ 1.61	
19AQCE15	1 ^a	0~730	74	1.81 $\pm$ 0.59	0.38
	2 ^b	740~1 910	118	4.56 $\pm$ 1.06	
	3 ^a	1 920~1 930	2	1.23 $\pm$ 0.25	
19AQCE16	1 ^a	0~860	87	1.36 $\pm$ 0.64	0.43
	2 ^b	870~1 910	105	4.36 $\pm$ 1.05	
	3 ^a	1 920~2 010	10	2.37 $\pm$ 0.94	
19AQCE17	1 ^a	0~1 050	106	1.88 $\pm$ 0.52	0.54
	2 ^b	1 060~1 970	92	5.70 $\pm$ 0.97	

续表 5

样本编号 Sampling code	耳石 Sr/Ca 值变化阶段 Variation phases of otolith Sr/Ca ratio	耳石径长 Distance from otolith core/ μm	元素测定点数量 Number of detected points	Sr/Ca $\times 10^3$ (Mean $\pm$ SD)	淡水系数 F_C
19AQCE18	1 ^a	0~800	81	1.94 $\pm$ 0.60	0.45
	2 ^b	810~930	13	5.61 $\pm$ 1.17	
	3 ^c	940~1 020	9	7.83 $\pm$ 0.80	
	4 ^b	1 030~1 780	76	6.07 $\pm$ 1.17	
19AQCE20	1 ^a	0~1 150	116	1.72 $\pm$ 0.67	0.60
	2 ^b	1 160~1 890	74	4.55 $\pm$ 1.00	
	3 ^a	1 900~1 930	4	2.82 $\pm$ 0.82	
19AQCE21	1 ^a	0~730	74	1.90 $\pm$ 0.72	0.33
	2 ^b	740~1 970	124	5.11 $\pm$ 1.09	
	3 ^a	1 980~2 200	23	1.90 $\pm$ 1.24	
19AQCE22	1 ^a	0~680	69	2.08 $\pm$ 0.60	0.35
	2 ^b	690~730	5	5.24 $\pm$ 1.00	
	3 ^c	740~860	13	7.34 $\pm$ 0.60	
	4 ^b	870~1 950	109	5.11 $\pm$ 1.30	
19AQCE23	1 ^a	0~770	78	1.54 $\pm$ 0.68	0.45
	2 ^b	780~1730	96	4.83 $\pm$ 1.04	
22AQCE01	1 ^a	0~290	30	2.02 $\pm$ 0.19	0.15
	2 ^b	300~1 850	156	3.77 $\pm$ 0.50	
	3 ^a	1 860~1 940	9	0.71 $\pm$ 0.22	
22AQCE02	1 ^a	0~1 020	103	2.21 $\pm$ 0.57	0.53
	2 ^b	1 030~1 920	90	3.89 $\pm$ 0.97	
22AQCE03	1 ^a	0~980	99	2.29 $\pm$ 0.97	0.51
	2 ^b	990~1 910	93	3.53 $\pm$ 0.30	
	3 ^a	1 920~1 950	4	0.71 $\pm$ 0.26	
22AQCE04	1 ^a	0~360	37	1.67 $\pm$ 0.59	0.19
	2 ^b	370~540	18	5.76 $\pm$ 0.35	
	3 ^c	550~860	32	7.22 $\pm$ 0.35	
	4 ^b	870~1 670	81	4.64 $\pm$ 1.08	
	5 ^a	1 680~1 940	27	1.54 $\pm$ 0.14	
22AQCE05	1 ^a	0~640	65	1.67 $\pm$ 0.50	0.33
	2 ^b	650~830	19	3.73 $\pm$ 1.21	
	3 ^c	840~1 110	28	7.36 $\pm$ 0.87	
	4 ^b	1 120~1 980	87	3.76 $\pm$ 1.99	
22AQCE07	1 ^a	0~1 290	130	3.01 $\pm$ 1.05	0.58
	2 ^b	1 300~2 240	95	1.50 $\pm$ 0.44	
22AQCE08	1 ^a	0~1 150	116	1.38 $\pm$ 0.78	0.59
	2 ^b	1 160~1 690	54	4.39 $\pm$ 0.29	
	3 ^c	1 700~1 790	10	8.75 $\pm$ 1.19	
	4 ^b	1 800~1 970	18	4.88 $\pm$ 0.79	
22AQCE09	1 ^a	0~900	91	1.86 $\pm$ 0.82	0.43
	2 ^b	910~1 260	36	6.65 $\pm$ 0.87	
	3 ^c	1 270~1 460	20	8.77 $\pm$ 0.93	
	4 ^b	1 470~2 060	60	5.44 $\pm$ 0.62	
	5 ^a	2 070~2 110	5	2.29 $\pm$ 1.52	

续表

样本编号 Sampling code	耳石 Sr/Ca 值变化阶段 Variation phases of otolith Sr/Ca ratio	耳石径长 Distance from otolith core/ μm	元素测定点数量 Number of detected points	Sr/Ca $\times 10^3$ (Mean $\pm$ SD)	淡水系数 F_C
22AQCE10	1 ^a	0~1 070	108	1.51 $\pm$ 0.44	0.56
	2 ^b	1 080~1 810	74	6.16 $\pm$ 0.47	
	3 ^c	1 820~1 910	91	7.21 $\pm$ 0.33	
22AQCE11	1 ^a	0~570	58	1.91 $\pm$ 0.35	0.27
	2 ^b	580~660	9	4.13 $\pm$ 0.89	
	3 ^a	670~840	18	2.21 $\pm$ 0.23	
	4 ^b	850~2 170	133	4.13 $\pm$ 0.89	
22AQCE12	1 ^a	0~590	60	1.48 $\pm$ 0.52	0.29
	2 ^b	600~680	9	4.03 $\pm$ 0.32	
	3 ^a	690~1 030	35	2.93 $\pm$ 0.44	
	4 ^b	1 040~1 930	90	4.03 $\pm$ 0.32	
	5 ^a	1 940~2 030	10	2.93 $\pm$ 0.44	
22AQCE13	1 ^a	0~930	94	1.37 $\pm$ 0.41	0.44
	2 ^b	940~2 100	117	4.33 $\pm$ 0.88	
	3 ^a	2 110~2 150	5	2.16 $\pm$ 1.15	
22AQCE14	1 ^a	0~1 100	111	2.90 $\pm$ 0.53	0.53
	2 ^b	1 110~1 390	29	5.10 $\pm$ 0.27	
	3 ^c	1 400~1 850	46	8.11 $\pm$ 1.21	
	4 ^b	1 860~2 080	23	3.62 $\pm$ 1.42	
22AQCE15	1 ^a	0~1 030	104	1.37 $\pm$ 0.41	0.52
	2 ^b	1 040~1 640	61	6.02 $\pm$ 1.27	
	3 ^c	1 650~1 730	9	8.40 $\pm$ 1.07	
	4 ^b	1 740~1 920	19	3.61 $\pm$ 0.25	
	5 ^a	1 930~1 980	6	1.78 $\pm$ 0.55	

还有大于 3.0 (甚至大于 7.0) 的高值。个体 22AQCE01、22AQCE03、22AQCE11、22AQCE12 和 22AQCE13 的 Sr/Ca 值在核心至距核心 290~980 μm 的耳石径长上均处于 3.0 以下, 此为第 1 阶段(低值区)。Sr/Ca 值升高至 3.0 以上并保持稳定, 此为第 2 阶段(高值区)。随后, 它们的 Sr/Ca 值开始降低至 3.0 以下。个体 22AQCE11 的 Sr/Ca 值又再次升高至 3.0 以上; 22AQCE12 的 Sr/Ca 值又升至 3.0 以上而后降至 3.0 以下。个体 22AQCE04、22AQCE05、22AQCE08、22AQCE09、22AQCE10、22AQCE14 和 22AQCE15 的 Sr/Ca 值变化则呈现多样, 它们的 Sr/Ca 值从核心至距核心 290~1 290 μm 的耳石径长上均在 3.0 以下, 此为第 1 阶段(低值区)。Sr/Ca 值升高至 3.0 以上并保持稳定, 此为第 2 阶段(高值区), 随后在高值区的 Sr/Ca 值开始上升至 7.0 以上。个体 22AQCE05、22AQCE08 和 22AQCE14 之后又降至 3.0 以上。个体 22AQCE04、22AQCE09 和 22AQCE15 的 Sr/Ca 值在经历了 7.0 以上而后降至 3.0 以上并稳定一段时间后

降至 3.0 以下。各水平间差异显著($P<0.05$) (表 5)。从 F_C 值来看, 第 1 类和第 2 类耳石样品对淡水生境依赖程度的 F_C 值分别为 0.56 和 0.40。

2.2 刀鲚耳石 Sr 含量的面分布分析

刀鲚耳石矢状面二维 Sr 含量的面分布图谱(图 4)可以有效地反映出刀鲚的生境履历特征。结果显示, 短颌刀鲚中一类是从耳石核心到边缘均为单一的蓝色圆环(低 Sr 浓度), 表明该类刀鲚样本仅在淡水生境中生活(21AQCB08); 另一类是从耳石核心至边缘有黄绿色圆环(高 Sr 浓度), 外周还有蓝色的圆环(低 Sr 浓度) (21AQCB07), 表明其既在河口半咸水又在淡水生境中生活。长颌刀鲚中个体 19AQCE04 和 19AQCE08 是从核心至边缘依次有蓝色圆环(低 Sr 浓度)、黄绿色圆环(高 Sr 浓度)、蓝色圆环(低 Sr 浓度), 但个体 19AQCE04 的蓝色核心内环较个体 19AQCE08 更大, 表明该类刀鲚样本均依次经历淡水、河口半咸水和淡水生境, 且个体 19AQCE04 较 19AQCE08 对淡水依赖

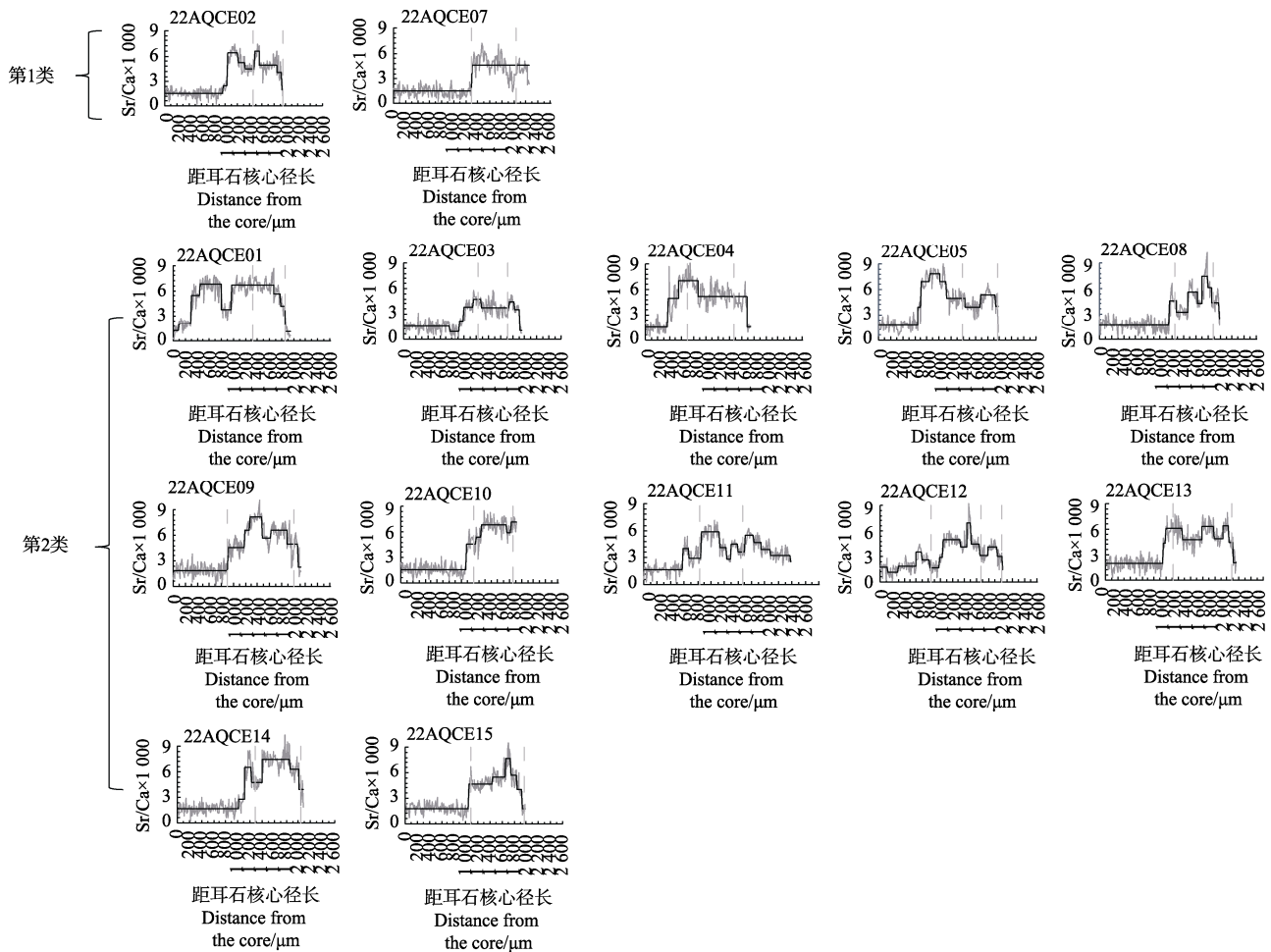


图3 长江安徽安庆江段14尾长颌刀鲚(2022)耳石从核心(0 μm)到边缘定量线分析的 Sr/Ca 值变化

Fig.3 Variation of Sr/Ca values of otoliths along line transects from the core (0 μm) to the edge of 14 long maxillary *C. nasus* (2022) from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

程度更强。个体 22AQCE01 是从核心至边缘依次有蓝色圆环(低 Sr 浓度)、黄绿色圆环(高 Sr 浓度)、蓝色圆环(低 Sr 浓度)、黄绿色圆环(高 Sr 浓度)和蓝色圆环(低 Sr 浓度),表明其先后多次经历淡水和河口半咸水生境。个体 22AQCE08 是从核心至边缘依次有蓝色圆环(低 Sr 浓度)、黄绿色、红色和黄绿色圆环(高 Sr 浓度),表明其依次经历淡水、河口半咸水、海水和河口半咸水生境“履历”。其耳石 Sr 面分析结果与线分析结果相印证。

3 讨论

在传统研究中,区分长颌刀鲚和短颌刀鲚的重要依据是其上颌骨的长短与头长的关系(袁传宓等, 1980),即上颌骨长>头长为长颌刀鲚,上颌骨长<头长为短颌刀鲚。曾有学者根据长颌刀鲚和短颌刀鲚的遗传距离阈值推断其应为同一个物种的 2 种不同生态表型(周晓犊等, 2010)。但最新基于耳石微化学和

遗传学联合研究的结果认为,长颌刀鲚和短颌刀鲚应分别为鲚属鱼类中 2 个独立的物种(Xuan *et al.*, 2021)。短颌刀鲚之前被认为只有淡水定居型,而长颌刀鲚均为溯河洄游型(袁传宓等, 1980)。近些年,随着耳石微化学技术的不断应用,溯河洄游型的短颌刀鲚(徐钢春等, 2014)和淡水定居型的长颌刀鲚(陈婷婷等, 2016b)相继被发现,这不仅推翻了传统观念,也再次否定了单纯根据上颌骨的长短来区分长颌刀鲚和短颌刀鲚的判别方法,进而证明了利用耳石微化学技术的确能更加客观而准确地判断不同生态表型刀鲚的生境履历。

本研究中,采自安庆江段的刀鲚有上颌骨长>头长和上颌骨长<头长的 2 种形态特征,分别属于传统观念上典型的长颌刀鲚和短颌刀鲚(表 1)。通过电子探针微区分析技术对刀鲚耳石进行线分析和面分析后发现,长江安庆江段刀鲚的生活史较为复杂,类型并不单一。结果显示,短颌刀鲚的生态表型复杂多样,

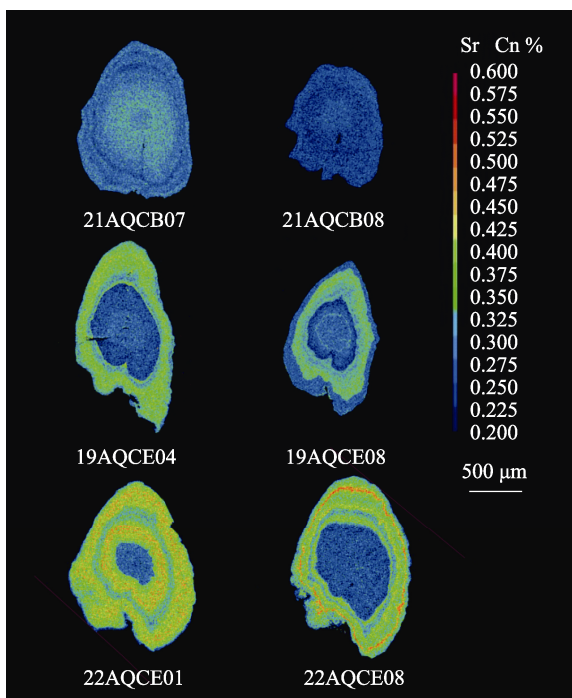


图 4 长江安徽安庆江段长颌刀鲚和短颌刀鲚耳石矢状面二维 Sr 含量的面分布

Fig.4 Two-dimensional imaging using mapping analysis of the Sr in otoliths of long maxillary and short maxillary *C. nasus* from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

其既存在耳石 Sr/Ca 值持续低值(<3.0)的个体, 表明其未曾离开淡水水域, 为淡水定居型(图 5A); 又存在耳石 Sr/Ca 值既有低值(<3.0), 又有高值(大于 3.0 且小于 7.0)的个体, 表明其经历了淡水和河口半咸水 2 种水域生境, 但未曾进入海水水域, 为溯河洄游型(图 5B)。而不同年份安庆江段长颌刀鲚耳石的 Sr/Ca 值不仅有低值(<3.0), 还有高值(>3.0), 表明这些个体不仅有淡水生境履历, 还有河口半咸水甚至海水生境履历。根据其经历的水域环境进一步可划分为 2 类: 一类是其耳石的 Sr/Ca 值既有小于 3.0 的低值, 也有大于 3.0 且小于 7.0 的高值, 表明其经历了淡水和河口半咸水 2 种水域生境(图 5B); 另一类是其耳石的 Sr/Ca 值有小于 3.0 的低值, 也有大于 3.0 且大于 7.0 的高值, 表明其经历了淡水、河口半咸水及海水 3 种水域环境(图 5C)。李孟孟等(2017a)曾对采自 2008 年安庆江段的长颌刀鲚进行探究发现, 刀鲚样本均为溯河洄游型, 与本研究结果相似。但相比之下, 本研究中 2019 年长颌刀鲚样本的洄游模式较 2008 年样本更复杂; 2022 年长颌刀鲚样本的洄游模式较 2019 年样本更复杂。相比于 2019 年的长颌刀鲚, 2022 年的长颌刀鲚对淡水依赖程度更小, 生境履历更多元化。而短颌刀鲚存有溯河洄游的个体早在长江靖江段(徐钢春等,

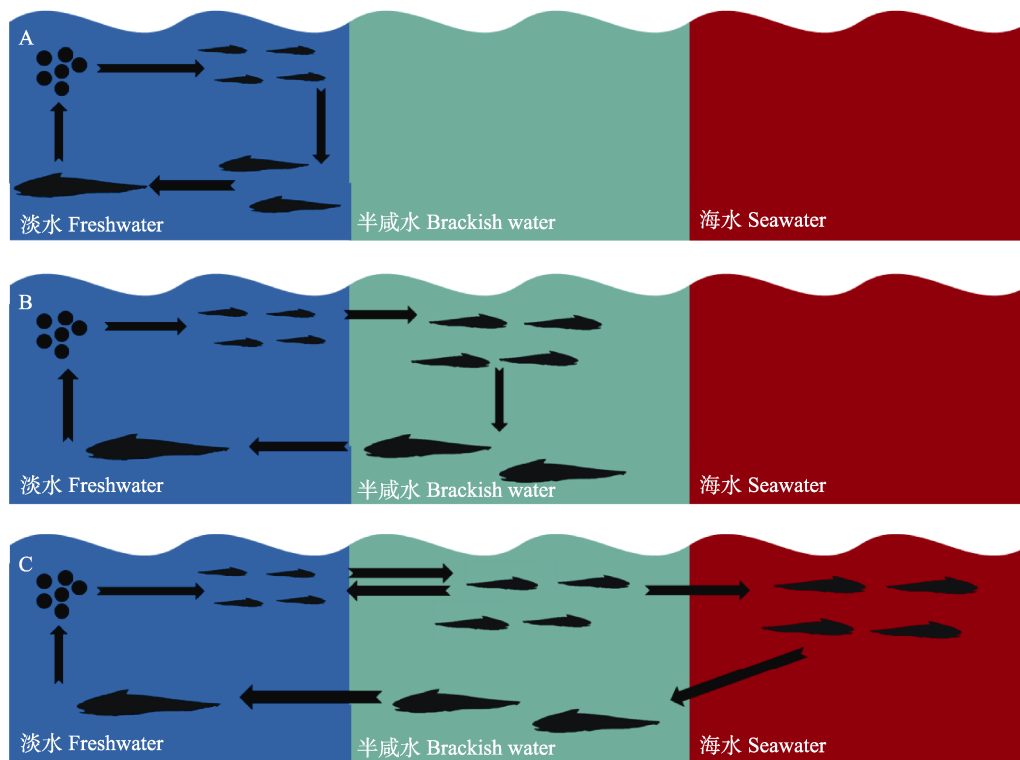


图 5 长江安徽安庆江段刀鲚生活史模式

Fig.5 Life history models for *C. nasus* from Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province

2014)、安徽和县江段(李孟孟等, 2017b)和鄱阳湖湖口(卢明杰, 2015)等水域被发现, 但值得注意的是, 本研究中, 溯河洄游的短颌刀鲚早期在河口半咸水生境中, 之后又进入淡水生境中, 与李孟孟等(2017b)发现的淡水-河口半咸水-淡水生境的短颌刀鲚的生境履历有所不同。出现此现象可能是由于在河口半咸水生境出现了新的产卵场, 由此导致短颌刀鲚早期生活在河口半咸水中, 说明长江十年禁渔效果显著, 仅几年时间便可能出现新的产卵场。上述结果表明, 长江十年禁渔后, 安庆江段刀鲚的生境履历逐年复杂与多样, 群体组成也更加复杂。进一步表明, 该江段刀鲚的群体组成具有多样性, 洄游模式具有复杂性。

4 结论

本研究运用耳石微化学技术对长江安庆江段长颌刀鲚和短颌刀鲚进行了探究。结果显示, 长江安庆江段同时存在溯河洄游型及淡水定居型短颌刀鲚和溯河洄游型长颌刀鲚 3 种生态表型个体。这可能也反映出, 随着长江十年禁渔政策的实施, 长江干流及一些主要通江湖泊等重点水域的水生生物资源包括刀鲚等经济鱼类的不同生态群体的多样性得到了一定的恢复。因此, 在日后的研究工作中, 应该持续跟踪对比长江不同江段“旗舰种”刀鲚资源的变化情况, 从而在能够更好的对其进行保护的同时, 更有效地把握长江生态大保护和十年禁渔的效果。

参 考 文 献

- CAMPANA S E, THORROLD S R. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(1): 30–38
- CHEN T T, JIANG T, LI M M, *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*, 2016b, 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*, 2016b, 40(6): 882–892]
- CHEN T T, JIANG T, LU M J, *et al.* Microchemistry analysis of otoliths of *Coilia nasus* and *Coilia brachygnathus* from the Jingjiang section of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 2016a, 28(1): 149–155 [陈婷婷, 姜涛, 卢明杰, 等. 基于耳石微化学的长江靖江江段长颌鲚与短颌鲚生境履历重建. *湖泊科学*, 2016a, 28(1): 149–155]
- CHEN W D, SHENG N, ZHU F M. Lake Taihu fishery resource status and industrial development countermeasures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(7): 226–228 [陈卫东, 生楠, 朱法明. 太湖渔业资源现状及产业发展对策. *安徽农业科学*, 2017, 45(7): 226–228]
- CHENG W X, TANG W Q. Some phenotypic varieties between different ecotypes of *Coilia nasus* in Yangtze River. *Chinese Journal of Zoology*, 2011, 46(5): 33–40 [程万秀, 唐文乔. 长江刀鲚不同生态型间的某些形态差异. *动物学杂志*, 2011, 46(5): 33–40]
- JIANG T, LIU H B, HUANG H H, *et al.* Otolith microchemistry of *Coilia grayii* from the Pearl River Estuary, China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(4): 816–821 [姜涛, 刘洪波, 黄洪辉, 等. 珠江口七丝鲚耳石微化学初报. *水生生物学报*, 2015, 39(4): 816–821]
- JIANG T, LIU H B, LU M J, *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 [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]
- JIANG T, LIU H B, SHEN X Q, *et al.* Life history variations among different population of *Coilia nasus* along the Chinese coast inferred from otolith microchemistry. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 2014, 59(2): 383–389
- JIANG T, LIU H B, XUAN Z Y, *et al.* Classification of ecomorphotypes of *Coilia nasus* from the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(2): 518–527 [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]
- JIANG T, LIU H B, XUAN Z Y, *et al.* Similarity of microchemical “fingerprints” between the pectoral fin ray and otolith of *Coilia nasus*. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(1): 100–107 [姜涛, 刘洪波, 轩中亚, 等. 刀鲚胸鳍条和耳石微化学“指纹”相似性研究. *渔业科学进展*, 2021, 42(1): 100–107]
- JIANG T, YANG J, LIU H B, *et al.* Life history of *Coilia nasus* from the Yellow Sea inferred from otolith Sr:Ca ratios. *Environmental Biology of Fishes*, 2012, 95: 503–508
- JIANG T, YANG J, LU M J, *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
- JIANG T, YANG J, XUAN Z Y, *et al.* Preliminary report on the effects of resource recovery on anadromous *Coilia nasus* in Poyang Lake under the national 10-year fishing ban. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(1): 24–30 [姜涛, 杨健, 轩中亚, 等. 长江禁渔对鄱阳湖溯河洄游型刀鲚资源恢复效果初报. *渔业科学进展*, 2022, 43(1): 24–30]
- JIANG T, ZHOU X Q, LIU H B, *et al.* Two microchemistry patterns in otoliths of *Coilia nasus* from Poyang Lake, China. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(2): 239–244 [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]
- LI M M, JIANG T, CHEN T T, *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*, 2017b, 37(8): 2788–2795 [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, 2017b, 37(8): 2788–2795]
- LI M M, JIANG T, KHUMBANYIWA D D, *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*, 2017a, 41(5): 1054–1061 [李孟孟, 姜涛, Khumbanyiwa Davison Daniel, 等. 基于耳石微化学的长江安徽和县江段刀鲚生活环境履历重建. 水生生物学报, 2017a, 41(5): 1054–1061]
- LI Y X, XIE S G, LI Z J, *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
- LIU D, LI Y Y, TANG W Q, *et al.* Population structure of *Coilia nasus* in the Yangtze River revealed by insertion of short interspersed elements. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2014, 54: 103–112
- LU M J, LIU H B, JIANG T, *et al.* Preliminary investigations on otolith microchemistry of *Odontamblyopus rubicundus* in the Daliao River Estuary, China. *Marine Fisheries*, 2015, 37(4): 310–317 [卢明杰, 刘洪波, 姜涛, 等. 大辽河口红狼牙鰕虎鱼耳石微化学的初步研究. 海洋渔业, 2015, 37(4): 310–317]
- LU M J. Studies on otolith morphometry and microchemistry of *Coilia nasus* collected from the Poyang Lake. Master's Thesis of 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. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2015]
- SHI W G, ZHANG M Y, LIU K, *et al.* Stress of hydraulic engineering on fisheries in the lower reaches of the Yangtze River and compensation. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(1): 10–20 [施炜纲, 张敏莹, 刘凯, 等. 水工工程对长江下游渔业的胁迫与补偿. 湖泊科学, 2009, 21(1): 10–20]
- SI F, WANG Q L, YU Q H, *et al.* Use of strontium chloride in otolith marking of Japanese flounder. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(4): 65–72 [司飞, 王青林, 于清海, 等. 基于投喂法的牙鲆耳石锶标记. 渔业科学进展, 2019, 40(4): 65–72]
- WAN Q, LAI N Y, LI F, *et al.* Analysis on the change of reproductive population composition of *Coilia ectenes* in Wuwei section of Anhui in Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2009, 30(4): 60–65 [万全, 赖年悦, 李飞, 等. 安徽无为长江段刀鲚生殖洄游群体年龄结构的变化分析. 水生态学杂志, 2009, 30(4): 60–65]
- WU B, FANG C L, FU P F, *et al.* Growth characteristics of *Coilia brachygnathus* in the Poyang Lake-Yangtze River waterway. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(3): 51–55 [吴斌, 方春林, 傅培峰, 等. 鄱阳湖通江水道短颌鲚生长特性初探. 水生态学杂志, 2015, 36(3): 51–55]
- XU G C, GU R B, LIU H B, *et al.* Fluctuation of Sr/Ca in otoliths of *Coilia nasus* in the Yangtze River and the validation for the anadromous migratory history. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(7): 939–945 [徐钢春, 顾若波, 刘洪波, 等. 长江短颌鲚耳石 Sr/Ca 值变化特征及其江海洄游履历. 水产学报, 2014, 38(7): 939–945]
- XUAN Z Y, JIANG T, LIU H B, *et al.* Mitochondrial DNA and microsatellite analyses reveal strong genetic differentiation between two types of estuarine tapertail anchovies (*Coilia*) in Yangtze River Basin, China. *Hydrobiologia*, 2021, 848: 1409–1431
- YANG J, ARAI T, LIU H B, *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
- YUAN C M, QIN A L, LIU R H, *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(3): 67–82 [袁传宓, 秦安黔, 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(自然科学), 1980(3): 67–82]
- YUAN C M. Spawning migration of *Coilia nasus*. *Bulletin of Biology*, 1987(12): 1–3 [袁传宓. 刀鲚的生殖洄游. 生物学通报, 1987(12): 1–3]
- ZHOU X D, YANG J Q, TANG W Q, *et al.* Species validities analyses of Chinese *Coilia* fishes based on mtDNA CO I barcoding. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2010, 35(4): 819–826 [周晓轶, 杨金权, 唐文乔, 等. 基于线粒体 CO I 基因 DNA 条形码的中国鲚属物种有效性分析. 动物分类学报, 2010, 35(4): 819–826]
- ZHU X F, GAO C H, YAO C Y, *et al.* Saury resource protection in Yangtze River. *Chinese Fisheries Economics*, 2009, 27(3): 41–44 [朱孝锋, 高成洪, 姚彩媛, 等. 长江刀鱼资源的危机和保护对策. 中国渔业经济, 2009, 27(3): 41–44]

Coexistence of Freshwater Resident and Anadromous *Coilia nasus* in the Anqing Section of the Yangtze River in Anhui Province, China

XU Ying¹, JIANG Tao², YANG Jian^{1,2①}, LIU Hongbo², CHEN Xiubao²

(1. Wuxi Fishery College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China; 2. Fishery Microchemistry Laboratory, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract The Anqing section of the Yangtze (Changjiang) River in Anhui Province, China, is one of the most important migratory routes and distribution of the highly valued diadromous estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus*. In the past, this section has suffered a severe loss of *C. nasus* resources caused by human activities, especially overfishing and water pollution. Since 2019, a fishing ban policy for the species in the Yangtze River has been introduced in China for resource restoration. Otoliths are calcium carbonate structures, and otolith microchemistry can provide detailed life history information that can be used to compare habitat use between different saline water bodies. To study the habitat history of *C. nasus* in the Anqing section of the Yangtze River after the implementation of the fishing ban, we examined the microchemical characteristics (Sr and Ca) of otoliths from the long (previously named *C. ectenes*) and short maxillary (previously named *C. brachygnathus*) types of anchovy using electron probe X-ray microanalysis (EPMA). Line-transect analysis of Sr/Ca ratios suggested that the short maxillary type of *C. nasus* could be divided into two groups. The otolith Sr/Ca ratios (calculated and expressed as Sr/Ca $\times 1,000$) of one group were always < 3.0 , indicating their freshwater residency. Those of the other group had phases of low (< 3.0 , believed to be indicative of a freshwater habitat) and high values (> 3.0 , believed to be indicative of a brackish or seawater habitat), indicating that anchovies not only have a freshwater habitat history with low salinity but also a brackish habitat history with high salinity. The latter group of anchovies were typically anadromous *C. nasus*, as the Sr/Ca ratio of the otoliths of *C. nasus* fluctuated significantly and coincided with variations between freshwater and estuarine brackish or seawater (i.e., anchovies experienced not only freshwater habitats but also brackish water habitats at different stages of their life history). The Sr content mapping of EPMA with different color patterns for freshwater (blue), brackish water (green-yellow) and seawater (red) habitats also confirmed the results obtained from the line-transect analysis. Our results demonstrated that the population composition of *C. nasus* in the Anqing section of the Yangtze river became complex, and there was coexistence of freshwater resident and anadromous *C. nasus* in the Anqing section of the Yangtze River in Anhui Province, China (i.e., freshwater resident and anadromous short maxillary and anadromous long maxillary type *C. nasus*). This phenomenon may suggest a restoration of *C. nasus* resource diversity after the implementation of the fishing ban in the Anqing section of the Yangtze River.

Key words Yangtze River; Anqing River section; Long maxillary *Coilia nasus*; Short maxillary *C. nasus*; Electron probe X-ray microanalysis; Habitat history

① Corresponding author: YANG Jian, E-mail: jiany@ffrc.cn