

基于耳石 Sr 同位素反演鄱阳湖刀鲚出生起源及早期发育阶段生境履历的初步研究

轩中亚¹, 杨彦平¹, 华忠¹, 马凤娇², 王银平¹, 刘凯^{1,2}

1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081;

2. 南京农业大学, 无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081

摘要: 目前通过耳石 Sr/Ca 比值可以确定刀鲚(*Coilia nasus*)经历淡水、河口及海洋的洄游生活史, 然而在追溯刀鲚个体的出生起源及早期发育阶段淡水生境履历转变方面仍存在困难。为探索新的追溯鄱阳湖中刀鲚的孵化场来源及早期生活史中不同淡水栖息地转变的方法, 利用激光剥蚀连接多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)技术, 分析了 2023 年 7—8 月采自鄱阳湖都昌水域的 10 尾刀鲚(*Coilia nasus*)成鱼个体以及 3 尾短颌鲚(*Coilia brachygnathus*)成鱼矢耳石的锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)组成特征。从耳石核心到边缘的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 线分析结果显示, 3 尾短颌鲚的耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化不大, 在 0.71448 附近波动, 反映了其鄱阳湖定居生活史; 9 尾刀鲚核心附近 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值接近 0.71448, 显示其孵化自鄱阳湖, 并“回归”至出生栖息地鄱阳湖, 其中 4 尾个体在仔稚鱼阶段迁出鄱阳湖, 5 尾个体在幼鱼阶段迁出; 1 尾刀鲚耳石核心附近 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值平均值为 0.71078, 显示为长江干流出生, 在上溯洄游的过程中没有回到出生栖息地, 而是进入了非出生栖息地鄱阳湖。这些结果反映了耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值作为鄱阳湖刀鲚产卵场地理标志和区分鄱阳湖与长江干流生活史方面的客观性、准确性和稳定性, 初步显示了其作为刀鲚出生起源和生境自然标签的潜力, 也初步表明了鄱阳湖刀鲚早期个体迁出鄱阳湖时机的多样性。

关键词: 刀鲚; 耳石; Sr 同位素; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; 鄱阳湖

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)10-1218-12

刀鲚(*Coilia nasus*)又称长颌鲚, 是我国传统的名贵鱼类, 是“长江三鲜”之一, 曾经也是长江中最重要的经济鱼类之一。作为一种溯河洄游型鱼类, 每年的春、夏季, 刀鲚亲鱼进入鄱阳湖等沿江湖泊或在干流的缓流、回水湾等处繁殖, 仔幼鱼在淡水中生长一段时间后进入河口或海区越冬、生长^[1-2]。由于高强度的捕捞以及洄游通道受阻、产卵场和育幼场等栖息地被破坏等原因, 刀鲚资源急剧下降。历史上, 长江中下游的鄱阳湖以及其他许多附属湖泊(如洞庭湖)均有刀鲚的产卵场分布。目前, 洞庭湖仅有零星的洄游型刀鲚监测记录^[3-4], 仅鄱阳湖内仍有确证的刀鲚产卵

场^[5]。长江禁渔战略实施后, 对刀鲚上溯繁殖成鱼的捕捞压力消失, 鄱阳湖刀鲚资源量呈现明显的恢复趋势^[6-7], 鄱阳湖已成为通江湖泊中最重要的刀鲚繁殖栖息地。

在长江十年禁渔的新形势下, 刀鲚作为长江流域代表性物种, 成为反映禁捕成效的指示性物种。由于洄游性鱼类在其生活史中会穿越广阔的地理区域, 在不同的生命阶段利用不同的栖息地以满足其特定阶段的需求, 因此有效保护刀鲚这类高度流动的洄游性物种存在较大困难。通过在个体和种群的层面追踪洄游鱼类栖息地利用, 以实现识别不同产卵场、育幼场等栖息地, 评估不

收稿日期: 2024-05-10; 修订日期: 2024-06-22.

基金项目: 江西省重点水域长颌鲚重要栖息地调查项目(NY2022-C0901); 鄱阳湖水生生物资源监测项目.

作者简介: 轩中亚(1990-), 男, 博士, 研究方向为渔业资源保护. E-mail: 2017213002@njau.edu.cn

通信作者: 刘凯, 研究员, 研究方向为鱼类生态学与物种保护研究. E-mail: liuk@ffrc.cn

同栖息地在种群补充中的贡献率、反演鱼类在不同栖息地之间迁移活动等目标, 将促进对于物种生态需求和行为模式的了解, 从而制定更有效的管理和保护策略, 有效增强对于洄游物种关键栖息地及其连通性的保护^[8-10]。鱼类在不同生境间转换的“履历”很难用传统的标记、寄生虫等方法准确、可靠地破译。由于鱼体内的耳石持续生长、基本不发生重吸收^[11], 并且耳石沉积过程中掺入的元素和同位素来自周围的环境, 提供了有关个体生活史的信息^[12-13], 目前, 许多研究使用耳石 Sr/Ca 比值作为刀鲚经历淡水、河口、海洋等不同盐度栖息地的证据^[1,14]。

鄱阳湖距离长江口约 800 km, 在鄱阳湖中孵化的刀鲚, 在进入河口、海区前的淡水生活史包含了鄱阳湖和长江干流两个阶段的“履历”, 刀鲚仔稚鱼、幼鱼在何时从鄱阳湖迁出、在长江干流中生活的时间等生态学问题对于全方位破解刀鲚生活史, 理清刀鲚栖息地变化具有重要意义。然而, 目前基于刀鲚耳石 Sr/Ca 比值的研究主要集中在淡水、河口、海洋等具有明显盐度梯度的生境的区分, 破解刀鲚的江海洄游生活史, 对于刀鲚淡水阶段的主要关注点在于淡水生活史占总生活史的比例(即淡水系数), 而整个淡水阶段内的 Sr/Ca 比值波动不大, 对于鄱阳湖、长江干流等不同的栖息地缺乏区分的手段。

Sr 同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)为解决这一难题提供了契机。根据前人的研究, 鄱阳湖具有独特的 Sr 同位素特征, 其湖区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.71390~0.71514(平均值 0.71448), 远高于长江中下游干流该比值(0.71005~0.71114)(基于全年样品的特征值约 0.71063), 也高于洞庭湖的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值特征(主要支流为 0.71154~0.71243, 城陵矶 0.7119)^[15-18], 因此 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 有潜力作为鄱阳湖独特地理标签, 将其与长江中下游干流以及另一个大的通江湖泊洞庭湖区分开。同时, 研究证明在生物材料形成的过程中, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 几乎不发生质量相关分馏, 可以认为其直接反映了来源的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ^[19], 鱼类耳石中的 Sr 主要来自水环境^[20], 因此, 耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 代表了鱼类经历的水环境中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ^[8,21]。并且, 淡水环境中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的分布主要取决于流域内的

地质条件(岩石类型和地层年龄), 在不同年份具有相当的稳定性, 以上特点使得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 成为直接且可重复的地理标记, 其空间分辨率主要取决于研究区域的地质异质性^[22-23]。耳石中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 已成为多个淡水生态系统中重建鱼类生活史的天然标签^[24-25]。基于此, 本研究对鄱阳湖中捕获的刀鲚开展耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 研究, 评估使用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 作为天然标签追溯鄱阳湖刀鲚的出生起源、重建刀鲚生活史尤其是其早期发育阶段在不同淡水生境中迁移“履历”的潜力, 同时也对鄱阳湖中定居的短颌鲚耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 进行了分析, 用以评估鄱阳湖 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 特征的时间稳定性。

1 材料与方法

1.1 Sr 同位素背景调查及鱼类样品采集

根据 Zhang 等^[26]整理的已经公开发表的中国生物可利用 Sr 同位素数据, 长江中下游及鄱阳湖、洞庭湖流域水样的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 数据绘制在采样地图上。综合之前的公开报道, 本研究绘制了长江中下游及附属通江湖泊的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分布图(图 1), 可以看出鄱阳湖的水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在不同的研究中(不同的时间和采样位置)有一些差异, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的范围为 0.71390~0.71514, 并且 2011 年冬季和夏季分别测得比值为 0.714391 和 0.713901, 存在季节差异, 因此选取目前测定值的平均值 0.71448 为鄱阳湖的代表 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。长江中下游干流的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值处于 0.71005~0.71114 之间, 洞庭湖的主要入江通道城陵矶附近测得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.7119, 其主要支流沅江、资水、湘江等的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.71154~0.71243, 而通过松滋河、虎渡河等通道进入洞庭湖的长江水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值则较低(0.71997~0.7102)。长江口 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 从 0.710514 逐渐下降到海洋水平的 0.709212^[27]。总体而言, 鄱阳湖 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高于长江中下游干流及洞庭湖, 具有独特性。

鱼类样本为利用中国水产科学研究院淡水渔业研究中心自有科研监测船, 并经江西省农业农村厅许可, 于 2023 年 6—7 月采集于鄱阳湖都昌水域, 根据其形态特征(上颌骨长与头长之比是否大于 1), 鉴定为刀鲚或短颌鲚。将采集到的样品打

好标签，放到塑料自封袋中，冷藏保存尽快运回实验室冷冻保存，记录其基本生物学信息(表1)。

1.2 耳石前处理

从鱼类样本头部提取耳石并进行清洗以去除

耳石表面黏附的组织。为了获得更高的分辨率，使用耳石直径最大的矢状面进行分析^[1]。将耳石使用树脂进行包埋，待硬化后，先后选用1200 grit、2400 grit和4000 grit的防水耐磨砂纸研磨耳石的

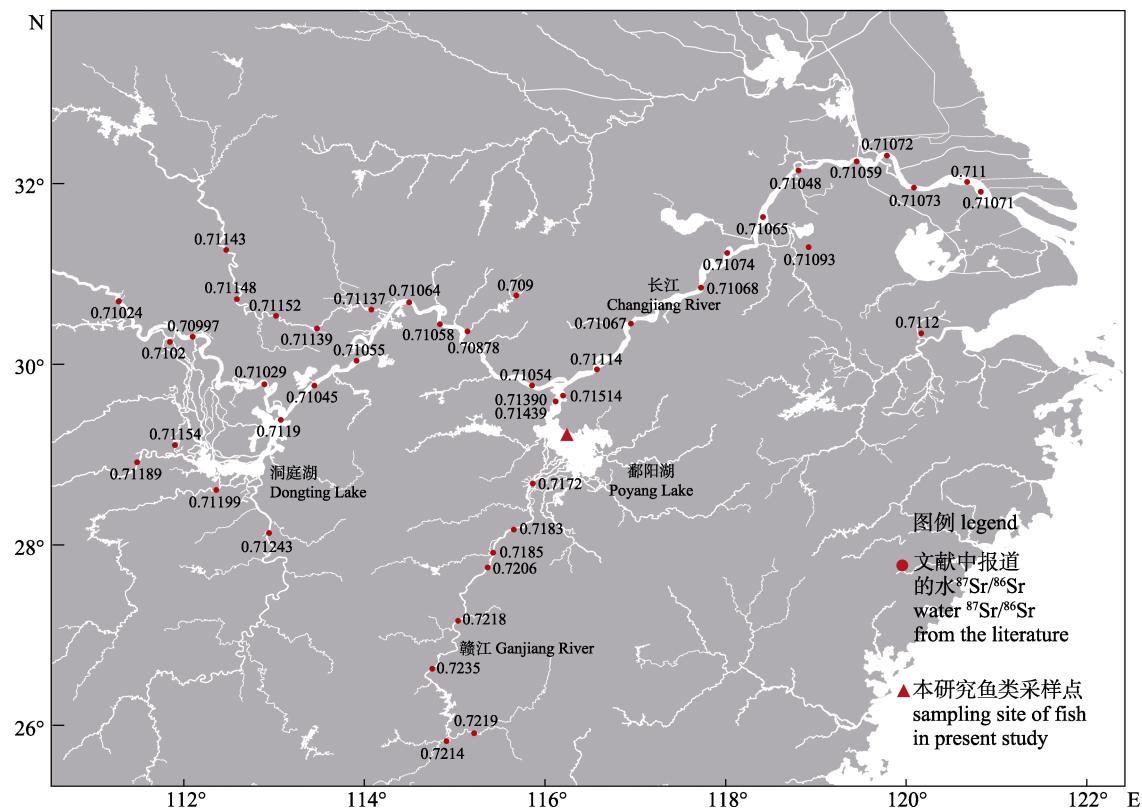


图1 长江中下游干流、鄱阳湖流域、洞庭湖流域水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值^[15–18,26]及本研究鄱阳湖刀鲚和短颌鲚个体采样地点

Fig. 1 Water $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of the mainstream of the middle and lower Yangtze River, Poyang Lake Basin, and Dongting Lake Basin reported^[15–18,26], and sampling location of *Coilia nasus* and *C. brachygynathus* individuals in the Poyang Lake in this study

表1 鄱阳湖刀鲚和短颌鲚样本信息

Tab. 1 Information of *Coilia nasus* and *C. brachygynathus* specimen collected from the Poyang Lake

类型 type	样本号 sample	全长/mm total length	体重/g body weight	上颌骨长/头长 supermaxilla/head length ratio	性别 sex	年龄 age	性腺发育阶段 gonadal maturity stage
短颌鲚 <i>Coilia brachygynathus</i>	23DCCB01	309.14	113.09	0.95	♀	2+	II
	23DCCB02	336.23	151.12	0.94	♀	3+	II
	23DCCB03	304.17	104.08	0.95	♂	2+	II
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	23DCCN01	370.94	115.00	1.22	♂	3+	IV
	23DCCN02	356.91	132.6	1.31	♀	3+	V
	23DCCN03	385.85	148.96	1.25	♀	3+	IV
	23DCCN04	344.84	122.23	1.15	♀	3+	IV
	23DCCN05	283.14	71.19	1.34	♂	2+	IV
	23DCCN06	353.90	116.42	1.26	♂	3+	II
	23DCCN07	303.23	126.22	1.27	♀	3+	IV
	23DCCN08	278.56	90.67	1.19	♀	2+	II
	23DCCN09	279.77	58.69	1.24	♂	2+	II
	23DCCN10	305.26	98.13	1.23	♀	3+	IV

矢状面, 在核心暴露后停止研磨, 使用二氧化硅抛光液在抛光布上抛光。抛光后, 超声清洗耳石 5 min, 再使用去离子水冲洗, 晾干后待分析。

1.3 耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分析

耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值利用激光剥蚀连接多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS, RESolution SE 193 nm 激光剥蚀系统连接 Neptune plus 多接收器电感耦合等离子体质谱仪)获得。实验中激光能量密度约为 6 J/cm², 剥蚀斑束直径为 50 μm, 频率为 6 Hz, 剥蚀速度为 10 μm/s, 采用线扫方式从核心到边缘进行激光烧蚀耳石微区取样。在每次消融样品之前, 测量每种同位素的背景强度 160 个周期, 并将背景强度平均值用作样品分析期间的空白校正。分析中使用海洋鱼类四指马鲅 (*Eleutheronema tetradactylum*) 的耳石作为海洋碳酸钙样本 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的参考样, 每分析 5 个样品检测一次。使用 Lugli 等^[28]描述的数据简化方法进行数据处理和校正。同位素数据在低分辨静态模式下获得。在分析期间测得的海洋碳酸钙 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.70918±0.00008, 2S.D.)与现代全球海洋海水值 0.70918 相符^[28]。剥蚀分析过的耳石, 参照前人的方法^[29], 使用 5% EDTA 进行酸蚀, 在显微镜下拍照, 读取年轮。

1.4 数据处理

耳石从核心到边缘的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值按照十个

检测值平滑处理。在 R 4.13 中使用“changepoint”包, 采用 pruned exact linear time (PELT) 算法进行时间序列变化点分析来评估耳石从核心到边缘 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值数据的主要变化, 其目标是找到最佳的分段方式, 使得每个段内部数据的统计特性尽可能一致, 而不同段之间有明显的差异, 片段长度取决于数据变化特征, 从而将 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 序列划定为多个内部相对稳定的片段。同时, 采用了赤池信息准则(AIC)来平衡数据分段模型的复杂度与拟合度, 在有效捕捉数据中的关键特征的同时保持简洁性。

根据淡水系数的概念^[30](freshwater coefficient, F_c)计算 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变换到河口或近海水平的第一个转变点的径长与整个耳石的分析径长的比值以区分刀鲚早期生活史阶段对淡水生境的依存程度, 并比较不同组个体淡水系数的差异是否显著(*t* 检验)。

2 结果与分析

LA-MC-ICP-MS 线分析的结果反映了鄱阳湖刀鲚和短颌鲚个体耳石上 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的波动情况。根据变点分析, 刀鲚和短颌鲚个体均有 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的突变。在短颌鲚个体中, 从耳石核心到边缘的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在接近 0.71448 的范围内波动(表 2, $P<0.05$, Mann-Whitney *U*-test; 图 2)。

表 2 鄱阳湖短颌鲚样本耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 曲线变化点分段结果

Tab. 2 Changepoint analysis results of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ profiles in otolith of *Coilia brachygynathus* from the Poyang Lake

样本号 sample	数据类型 data type	片段 1 segment 1	片段 2 segment 2	片段 3 segment 3	片段 4 segment 4	片段 5 segment 5	片段 6 segment 6	片段 7 segment 7	片段 8 segment 8	片段 9 segment 9
23DCCB01	耳石径长 ORL	0–112	112–834	834–1219	1219–1878	1878–1995	1995–2083			
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71422 ^a	0.71488 ^b	0.71448 ^c	0.71471 ^d	0.71402 ^a	0.71448 ^{bc}			
23DCCB02	耳石径长 ORL	0–568	568–1036	1036–1447	1447–1875	1875–1944	1944–2348	2348–2460	2460–2468	2468–2584
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71448 ^a	0.71485 ^b	0.71448 ^{ac}	0.71467 ^d	0.71495 ^{abcd}	0.71462 ^d	0.71496 ^{bde}	0.71387 ^e	0.71485 ^{bd}
23DCCB03	耳石径长 ORL	0–255	255–526	526–928	928–1474	1474–1714	1714–1791	1791–1848	1848–2168	
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71448 ^a	0.71470 ^b	0.71467 ^b	0.71448 ^c	0.71448 ^{ae}	0.71618 ^f	0.71448 ^e	0.71492 ^d	

注: 不同的片段代表 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 曲线上由变化点划分的区间, 耳石径长表示不同片段的起点和终点距耳石核心的半径长度(μm), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值是片段内 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的平均值, 不同小写字母表示不同距离片段内的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值差异显著($P<0.05$)。

Note: Different segments indicate the stable signatures of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ profiles identified by change point analysis. Otolith radial length (ORL) refers to the radius length (μm) from the core to the start and end points of different segments. The average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ is the mean ratio of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ within each segment. Different lowercase letters indicate significant difference in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios among different segments at 0.05.

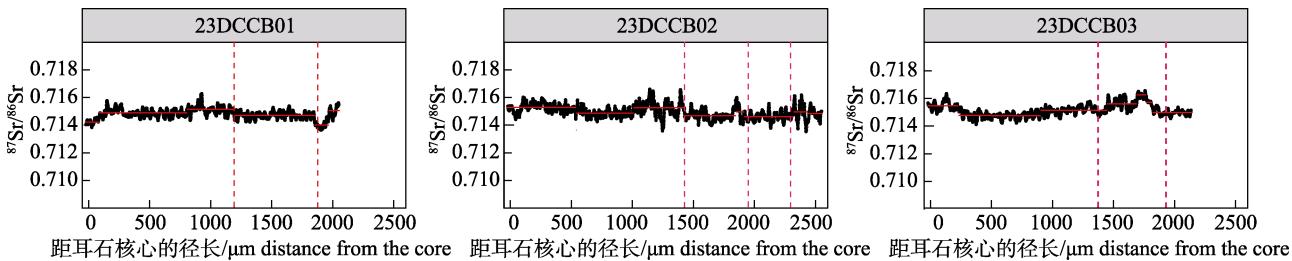


图 2 鄱阳湖短颌鲚耳石从核心(0 μm)到边缘记录到的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化
竖直虚线表示年轮。

Fig. 2 Variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from the core (0 μm) to the edge in otoliths of *Coilia brachygnathus* from the Poyang Lake
Vertical red dotted lines indicate otolith annuli (age).

在刀鲚中,每一个个体均包含了多个具有显著差异的阶段(表 3, $P<0.05$, Mann-Whitney U-test; 图 3)。刀鲚个体 23DCCN01-09 的核心区域 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值都接近 0.71448, 之后 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值发生突变, 根据 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值突变的时间和第一年轮的距离, 可以将刀鲚分为两种不同的类型: 早出湖型(图 3a), 晚出湖型(图 3b)以及一个独特的个体(图 4)。

早出湖型包含 23DCCN01、04、05、09, 这一类型内部个体变化模式也具有多样性, 23DCCN01 和 23DCCN05 的第 1 个 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较高的阶段为 0 μm 径长(即核心)至 434 μm 径长和 519 μm 径长, 而 23DCCN04 和 23DCCN09 为 0~43 μm 和 0~91 μm, 该阶段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的平均值接近 0.71448 附近, 对应鄱阳湖; 之后逐步下降到 0.7106 附近, 对应长江干流, 23DCCN01 和 23DCCN05 在这一阶段的范围分别为 600 μm 径长至 605 μm 径长, 23DCCN04 和 23DCCN09 分别 452 μm 和 281 μm; 之后阶段其平均值在 0.7095 附近, 对应长江口及近海; 最后一个阶段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值开始上升, 大多数平均值仍未达到鄱阳湖环境水平的 0.71448。

晚出湖型包含 23DCCN02、03、06、07、08, 这一类型内部个体变化模式较为一致。第 1 阶段的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值一直在接近 0.71448 的范围内, 对应鄱阳湖, 该阶段的范围为 0 μm 径长(即核心)至 806~1076 μm 径长; 之后 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值突降到 0.71063 附近, 对应长江干流, 突降的变化点距离第一年轮较近; 之后降到 0.7095 附近, 对应长江口及近海; 回升阶段有所不同, 23DCCN02 和

23DCCN03 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值尚低, 23DCCN07 已经上升到接近 0.71448, 23DCCN06 和 23DCCN08 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值已经上升到 0.71448。

刀鲚个体 23DCCN10 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化与其他个体都不同, 其耳石核心 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值接近 0.71063, 直到在 596 μm 转变成 0.7095 附近, 在 2401 μm 后上升, 直到 2426 μm 后上升到 0.7140 左右(图 4)。

同样孵化于鄱阳湖, 早出湖型刀鲚孵化后第一次进入半咸水环境远在第一年轮形成之前, 晚出湖型刀鲚孵化后第一次进入半咸水环境在接近第一年轮形成之前, t 检验分析表明晚出湖刀鲚的淡水系数显著高于早出湖型($P<0.05$, 图 5)。

3 讨论

3.1 个体孵化场起源

耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在鱼类生境“履历”研究中已经得到了广泛应用, 尤其是淡水生活史阶段研究^[9,10,28,31]。在不同的栖息地具有 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值异质性的前提下, 耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值可以识别鱼类的孵化场起源^[8,22,28], 解析鱼类经历过的不同栖息地^[32-34], 以及反算不同栖息地的停留时间^[10]。鄱阳湖的水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值一直显著高于长江中下游干流及洞庭湖, 并且不存在数值的重叠(图 1), 这显示了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值可以作为鄱阳湖独特的地理标志。有研究表明, 鄱阳湖主要支流赣江流域广泛分布硅酸岩石, 尽管流域内水体的化学组成来源于硅酸岩和碳酸盐岩混合的岩石和土壤的风化或溶解, 但硅酸岩风化是赣江流域可溶性 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成的主要来源, 其较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值

表3 鄱阳湖刀鲚样本耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 曲线变化点分析结果
Tab. 3 Change point analysis results of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ profiles in otolith of *Colia nasus* from the Poyang Lake

样本 sample	数据类型 data type	片段1 segment1	片段2 segment2	片段3 segment3	片段4 segment4	片段5 segment5	片段6 segment6	片段7 segment7	片段8 segment8	片段9 segment9	片段10 segment10	片段11 segment11	片段12 segment12
23DCCN01	耳石径长 ORL	0–362	362–434	434–468	468–600	600–677	677–1075	1075–1436	1436–1617	1617–2488	2488–2523	2523–2543	
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71448 ^a	0.71407 ^b	0.71258 ^c	0.71121 ^d	0.70977 ^e	0.70955 ^f	0.70959 ^f	0.70931 ^h	0.70950 ^g	0.71011 ⁱ	0.71271 ^e	
23DCCN02	耳石径长 ORL	0–104	104–881	881–1076	1076–1093	1093–1139	1139–2159	2159–2223	2223–2254	2254–2278			
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71448 ^a	0.71469 ^b	0.71461 ^b	0.71154 ^c	0.70981 ^d	0.70934 ^e	0.70981 ^d	0.71122 ^e	0.71380 ^f			
23DCCN03	耳石径长 ORL	0–1067	1067–1079	1079–1143	1143–1384	1384–1751	1751–2304	2304–2347	2347–2479	2479–2518			
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71463 ^a	0.71239 ^b	0.70998 ^c	0.70959 ^d	0.70938 ^e	0.70952 ^f	0.70986 ^e	0.70946 ^f	0.71018 ^e			
23DCCN04	耳石径长 ORL	0–43	43–69	69–452	452–504	504–795	795–927	927–1614	1614–2113	2113–2316	2316–2326		
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71448 ^a	0.71224 ^b	0.71083 ^c	0.70985 ^d	0.70938 ^e	0.70956 ^g	0.70936 ^e	0.70943 ^f	0.70965 ^g	0.71103 ^{ch}		
23DCCN05	耳石径长 ORL	0–519	519–574	574–605	605–788	788–1030	1030–1443	1443–2018	2018–2040	2040–2091			
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71448 ^a	0.71298 ^b	0.71158 ^c	0.71092 ^d	0.70977 ^e	0.70949 ^f	0.70939 ^h	0.7103 ^g	0.71318 ^b			
23DCCN06	耳石径长 ORL	0–319	319–334	334–810	810–839	839–1108	1108–1572	1572–2052	2052–2055	2055–2163	2163–2184	2184–2253	2253–2292
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71448 ^a	0.71448 ^{ab}	0.71448 ^b	0.71295 ^c	0.70957 ^{de}	0.70944 ^f	0.70949 ^d	0.71039 ^{eg}	0.70981 ^g	0.71328 ^{ch}	0.71448 ^a	0.71411 ^h
23DCCN07	耳石径长 ORL	0–892	892–1018	1018–1048	1048–1092	1092–2234	2234–2237	2237–2404	2404–2433	2433–2510			
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71437 ^a	0.71448 ^b	0.71253 ^c	0.71019 ^d	0.70938 ^e	0.70934 ^{def}	0.70953 ^f	0.71112 ^g	0.71357 ^h			
23DCCN08	耳石径长 ORL	0–145	145–604	604–806	806–823	823–889	889–1603	1603–1681	1681–1701	1701–1796	1796–1930		
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71448 ^a	0.71483 ^b	0.71488 ^b	0.71249 ^c	0.71003 ^e	0.70935 ^f	0.70958 ^g	0.71153 ^h	0.71346 ^d	0.71448 ^a		
23DCCN09	耳石径长 ORL	0–91	91–116	116–281	281–321	321–402	402–850	850–937	937–1213	1213–2091	2091–2105	2105–2213	2213–2312
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71461 ^a	0.71211 ^b	0.71108 ^c	0.70939 ^d	0.70967 ^f	0.70944 ^d	0.70969 ^f	0.70946 ^d	0.70935 ^e	0.71124 ^c	0.71336 ^g	0.71432 ^a
23DCCN10	耳石径长 ORL	0–596	596–652	652–660	660–666	666–1071	1071–1194	1194–1650	1650–1762	1762–1925	1925–2401	2401–2426	2426–2488
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71078 ^a	0.70956 ^{bc}	0.70992 ^d	0.70965 ^{bcdef}	0.7097 ^e	0.70962 ^{bde}	0.70946 ^e	0.70967 ^{bce}	0.70935 ^f	0.70963 ^b	0.71095 ^a	0.71400 ^g

注: 不同的片段代表 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 曲线上由变化点划分的区间, 耳石径长表示不同片段的起点和终点距耳石核心的半径长度(μm), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值是片段内 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的平均值, 不同小写字母表示不同距离区间的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值差异显著($P<0.05$)。

Note: Different segments indicate the stable signatures of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ profiles identified by change point analysis. Otolith radial length (ORL) refers to the radius length (μm) from the core to the start and end points of different segments. The average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ is the mean ratio of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ within each segment. Different lowercase letters indicate significant difference in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios among different segments at 0.05.

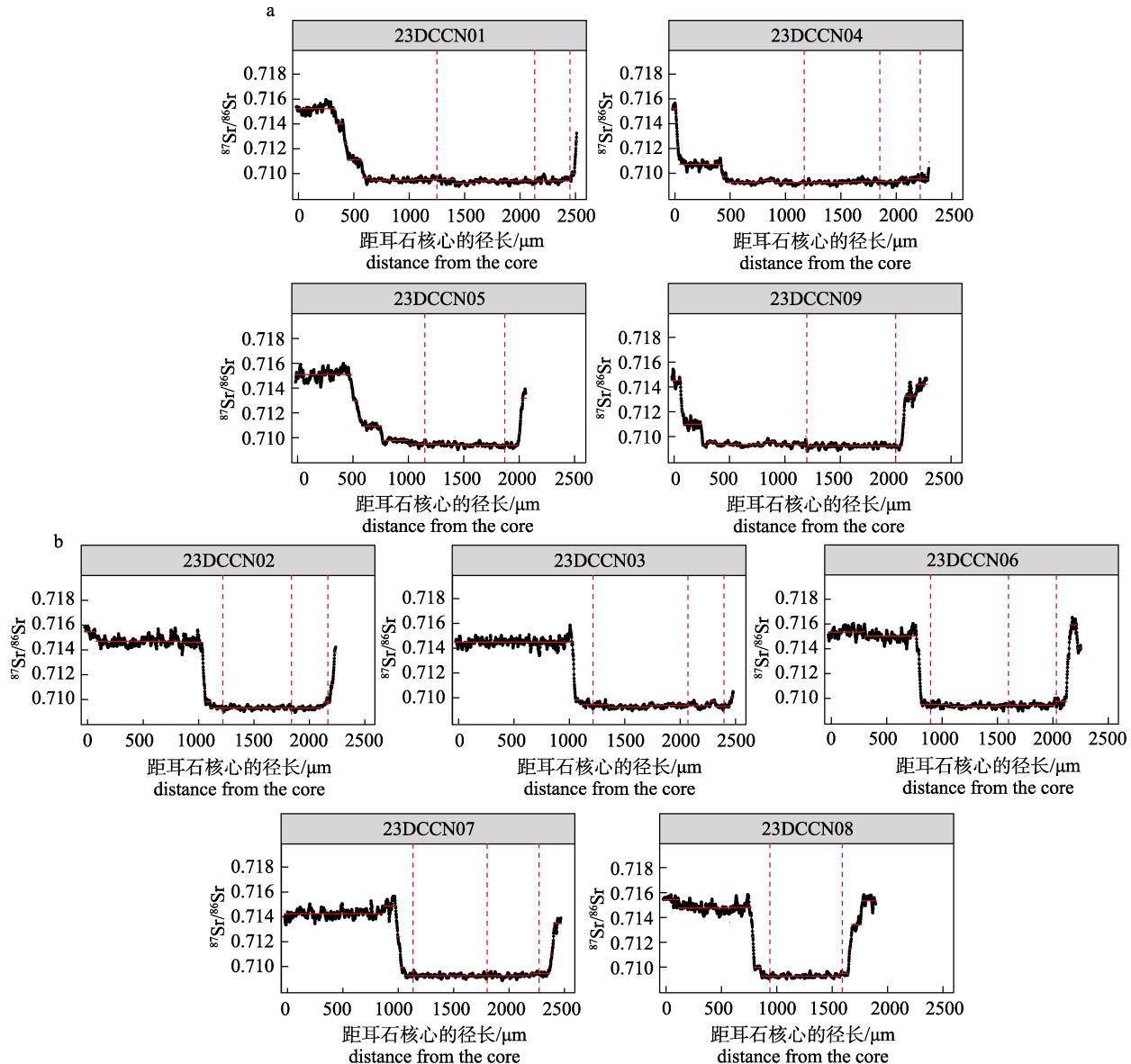


图 3 鄱阳湖早出湖刀鲚(a)和晚出湖型刀鲚(b)耳石从核心(0 μm)到边缘记录到的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化
竖直虚线表示年轮。

Fig. 3 Variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from the core (0 μm) to the edge in otoliths of early leaving lake type (a) and late leaving lake type (b) *Coilia nasus* from the Poyang Lake
Vertical red dotted lines indicate otolith annuli (age).

代表了典型的硅酸岩地区河流的化学组成, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成的来源也决定了其在不同年份间的稳定性^[34-35]。

基于鄱阳湖与长江中下游干流 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的差异,本研究探索了使用耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 区分刀鲚鄱阳湖与长江干流生活史的潜力,结果显示,在鄱阳湖中采集到的短颌鲚和9个刀鲚耳石核心附近的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在0.71448上下波动,表明这

些个体孵化于鄱阳湖。最后,这9个刀鲚个体上溯“回归”到其出生地鄱阳湖繁殖,这更直观地证实了之前研究认为的鄱阳湖刀鲚具有“回归”能力(natal homing)^[36]。此外,还存在一个刀鲚个体23DCCN10的核心部分与长江干流的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值接近,边缘部分与鄱阳湖的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值接近,这显示这一个体早期并不在鄱阳湖中生活,在海洋生活阶段后上溯繁殖时来到了鄱阳湖,表明其

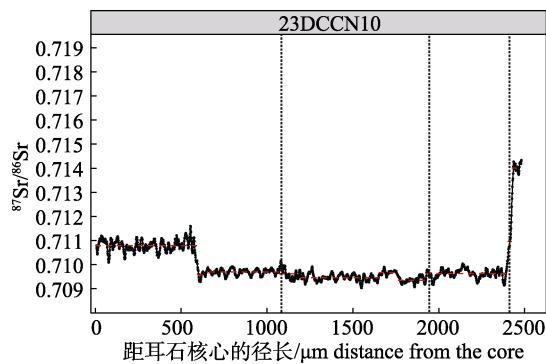


图4 采集自鄱阳湖的刀鲚个体23DCCN10耳石从核心(0 μm)到边缘记录到的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化
竖直虚线表示年轮。

Fig. 4 Variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from the core (0 μm) to the edge in the otolith of *Coilia nasus* individual 23DCCN10 collected from the Poyang Lake
Vertical black dotted lines indicate otolith annuli (age).

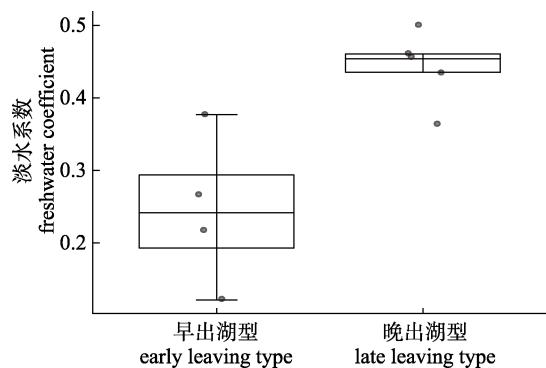


图5 鄱阳湖孵化的两种不同类型刀鲚的淡水系数
Fig. 5 The freshwater coefficient of two types of *Coilia nasus* from the Poyang Lake

为迷航个体。23DCCN10更有可能是起源于长江干流,上溯时“迷航”到其非出生地,由于其较高的性腺发育程度及在鄱阳湖湖区内的位置,推测其可能会在鄱阳湖繁殖。

鄱阳湖短颌鲚耳石核心的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在0.71448附近波动,在同一个体的不同年龄段,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值都在0.7136~0.7160之间,但是 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在不同个体间并非完全相同,在不同年份间也不是一直稳定不变的。这可能与鄱阳湖的湖区面积较大有关,鄱阳湖接纳五河来水,虽然赣江占鄱阳湖来水量的比例较高^[37],但其他支流也有影响,可能会导致不同湖区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的时空差异,这种不同来源的混合导致的时空差异在其他使用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值进行的鱼类生态学

研究中也有出现^[21,38]。因此有必要对各支流和湖区进行全面的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值调查,以理清鄱阳湖 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成是否具有更精细的差异,建立整个湖区的空间和时间 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值背景,从而为进一步了解湖区内不同的刀鲚产卵场和育幼场打下基础。

3.2 刀鲚淡水生境履历

本研究中的鄱阳湖刀鲚早出湖型个体初期 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值接近0.7146的耳石长度较短,表明其在湖内生活较短的一段时间后即迁出了鄱阳湖,尤其是23DCCN04和23DCCN09两个体,湖内特征的耳石径长仅分别为43 μm和93 μm,根据Huang等^[39]拟合的刀鲚仔鱼耳石半径与日龄的分段线性回归方程,这两个体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值突变发生在其孵化后第8天和第16天。早出湖个体在仔稚鱼阶段迁出鄱阳湖,与刘熠等^[40]在湖口江段发现刀鲚仔稚鱼高峰的记录相吻合;早出湖个体离开鄱阳湖的时间距离第一年轮形成时间较远,表明其离开鄱阳湖较早,并且其耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值接近0.71063的耳石径长较长,表明这些个体在长江干流生活了较长时间。5个晚出湖个体的生活史模式则比较接近,这些个体在鄱阳湖中生活的时间都较长,直到第一年轮形成之前不久才离开鄱阳湖。王生等^[41]在湖口监测到刀鲚幼鱼在10月下旬及11月初集中出湖,本研究晚出湖个体离开鄱阳湖的时间也应是在这一时间段。这一时间鄱阳湖水位已经下降,进入枯水期,栖息地大幅萎缩,这可能是促使刀鲚幼鱼开始集中出湖的环境因子。并且,晚出湖个体耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值从代表鄱阳湖环境的高值很快突降到代表长江口的0.7100(突降区域的耳石长度3~30 μm),表明这些个体在长江干流停留的时间较短。

本研究中孵化于鄱阳湖的刀鲚,展现出了截然不同的早期生活史,早出湖个体的淡水系数较低,而晚出湖个体的淡水系数较高。淡水系数反映了早期的淡水生活在整个生活史中的比例,对于在没有通江湖泊的河流中繁殖的洄游鱼类而言(或者在长江下游干流产卵的刀鲚),早期个体的淡水栖息时间与繁殖栖息地到海洋的距离可能呈正相关^[30]。然而鄱阳湖等大型通江湖泊的存在,

为洄游鱼类早期个体提供了良好的育幼场所, 这种静水漫滩湖泊温和且生产力高的栖息地非常适合它们的孵化和发育^[42], 尽管洪水脉冲可能迫使一些个体提前进入干流, 但是仍有相当的早期个体停留在湖泊中发育成为幼鱼, 直到冬季枯水期之前离开鄱阳湖进入海洋^[41], 这就导致同为鄱阳湖繁殖的刀鲚在淡水系数上具有显著差异(图 5), 因此在长江中用淡水系数推测刀鲚繁殖场与河口的距离时需要谨慎。

本研究的 9 个起源于鄱阳湖的刀鲚个体中有 3 个为 2 龄, 并在出生后第 3 年上溯到鄱阳湖来繁殖(出生年为第 1 年); 另外 6 个为 3 龄, 在出生后第 4 年上溯到鄱阳湖来繁殖。23DCCN10 个体为 3 龄。本研究不论是繁殖后的个体(23DCCN05、06、07、08、09), 还是尚未繁殖的个体, 耳石边缘 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值均有上升, 也就是说上溯到鄱阳湖繁殖的长距离迁移会记录在耳石中, 由此可见本研究中的 3 龄鱼在此次之前应无上溯到鄱阳湖的经历, 但由于本研究涉及的样本较少, 仍需更丰富的研究以解析鄱阳湖刀鲚的年龄结构及上溯洄游频率。

4 结论

本研究初步应用刀鲚耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分析, 揭示了刀鲚在鄱阳湖、长江、海洋等不同栖息地截然不同的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值特征, 以及鄱阳湖出生的刀鲚早期阶段耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与鄱阳湖水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的相似性, 表明利用耳石核心及附近的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值判断个体是否来源于鄱阳湖, 以及判断刀鲚早期发育阶段在鄱阳湖和长江间的生境转换的潜力。同时, 根据刀鲚在不同栖息地时形成的耳石的径长, 可以推测其在鄱阳湖和长江干流生活的时间, 这就为刀鲚的淡水生活史解析提供了有力的工具。在接下来的研究中, 将耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化和耳石微结构结合起来, 量化不同栖息地的使用时间, 将会为刀鲚生活史研究提供更高的分辨率。

参考文献:

[1] Cong X R, Dong G C, Li X Q, et al. Estimation of biological

parameters, yield per recruitment, and spawning stock biomass per recruitment of *Coilia nasus* in Dongping Lake[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(10): 1236-1245. [丛旭日, 董贵仓, 李秀启, 等. 东平湖刀鲚生物学参数、单位补充量渔获量及产卵亲体量评估[J]. 中国水产科学, 2023, 30(10): 1236-1245.]

- [2] Yuan C M. Changes in resources and population composition of *Coilia nasus* in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Zoology, 1988, 23(3): 12-15. [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[J]. 动物学杂志, 1988, 23(3): 12-15.]
- [3] Xuan Z Y, Jiang T, Liu H B, et al. Are there still anadromous the estuarine tapetail anchovies *Coilia nasus* in Dongting Lake?[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(4): 838-843. [轩中亚, 姜涛, 刘洪波, 等. 洞庭湖中是否存在溯河洄游型刀鲚[J]. 水生生物学报, 2020, 44(4): 838-843.]
- [4] Jiang T, Li H, Yang J, et al. Reappearance of anadromous *Coilia nasus* in the Xiangjiang river, Hunan Province[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(12): 1409-1416. [姜涛, 李鸿, 杨健, 等. 湖南湘江重现溯河洄游型刀鲚[J]. 中国水产科学, 2023, 30(12): 1409-1416.]
- [5] 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[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2017, 33(2): 189-192.
- [6] 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[J]. 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[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(1): 24-30.]
- [7] Wu J M, Li L K, Cheng P L, et al. Species identification and resource dynamics of *Coilia nasus* in the Poyang Lake[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(6): 743-750. [吴金明, 李乐康, 程佩琳, 等. 鄱阳湖刀鲚的鉴定与资源动态研究[J]. 中国水产科学, 2021, 28(6): 743-750.]
- [8] Brennan S R, Zimmerman C E, Fernandez D P, et al. Strontium isotopes delineate fine-scale natal origins and migration histories of Pacific salmon[J]. Science Advances, 2015, 1(4): e1400124.
- [9] Brennan S R, Schindler D E, Cline T J, et al. Shifting habitat mosaics and fish production across river basins[J]. Science, 2019, 364(6442): 783-786.
- [10] Phillis C C, Sturrock A M, Johnson R C, et al. Endangered winter-Run Chinook salmon rely on diverse rearing habitats

- in a highly altered landscape[J]. Biological Conservation, 2018, 217: 358-362.
- [11] Zhu G P, Wei L. Age and growth of Antarctic fish species: A review[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(10): 1638-1647. [朱国平, 魏联. 南极鱼类年龄与生长研究进展[J]. 水产学报, 2017, 41(10): 1638-1647.]
- [12] Thomas O R B, Ganio K, Roberts B R, et al. Trace element-protein interactions in endolymph from the inner ear of fish: Implications for environmental reconstructions using fish otolith chemistry[J]. Metallomics, 2017, 9(3): 239-249.
- [13] Izzo C, Reis-Santos P, Gillanders B M. Otolith chemistry does not just reflect environmental conditions: A meta-analytic evaluation[J]. Fish and Fisheries, 2018, 19(3): 441-454.
- [14] Xuan Z Y, Jiang T, Liu H B, et al. Otolith microchemical evidence revealing multiple spawning site origination of the anadromous tapetail anchovy (*Coilia nasus*) in the Changjiang (Yangtze) River Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2023, 42(1): 120-130.
- [15] Wang Z L, Zhang J, Liu C Q. Strontium isotopic compositions of dissolved and suspended loads from the main channel of the Yangtze River[J]. Chemosphere, 2007, 69(7): 1081-1088.
- [16] Luo C, Zheng H B, Tada R, et al. Tracing Sr isotopic composition in space and time across the Yangtze River basin[J]. Chemical Geology, 2014, 388: 59-70.
- [17] Ding T P, Gao J F, Tian S H, et al. Chemical and isotopic characteristics of the water and suspended particulate materials in the Yangtze River and their geological and environmental implications[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2014, 88(1): 276-360.
- [18] Luo C, Zheng H B, Wu W H, et al. Temporal variation in Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Yangtze River: An example from Datong hydrological station[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(7): 835-843. [罗超, 郑洪波, 吴卫华, 等. 长江河水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的季节性变化及其指示意义: 以长江大通站为例[J]. 地球科学进展, 2014, 29(7): 835-843.]
- [19] Capo R C, Stewart B W, Chadwick O A. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods[J]. Geoderma, 1998, 82(1-3): 197-225.
- [20] Doubleday Z A, Izzo C, Woodcock S H, et al. Relative contribution of water and diet to otolith chemistry in freshwater fish[J]. Aquatic Biology, 2013, 18(3): 271-280.
- [21] Brennan S R, Fernandez D P, Zimmerman C E, et al. Strontium isotopes in otoliths of a non-migratory fish (slimy sculpin): Implications for provenance studies[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2015, 149: 32-45.
- [22] Rachel B J, Pearson T E, Ramos F C, et al. Tracking natal origins of salmon using isotopes, otoliths, and landscape geology [J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(4): 1633-1642.
- [23] Brennan S R, Fernandez D P, MacKey G, et al. Strontium isotope variation and carbonate versus silicate weathering in rivers from across Alaska: Implications for provenance studies[J]. Chemical Geology, 2014, 389: 167-181.
- [24] Cordoleani F, Phillis C C, Sturrock A M, et al. Threatened salmon rely on a rare life history strategy in a warming landscape[J]. Nature Climate Change, 2021, 11: 982-988.
- [25] Cordoleani F, Phillis C C, Sturrock A M, et al. Restoring freshwater habitat mosaics to promote resilience of vulnerable salmon populations[J]. Ecosphere, 2024, 15(3): e4803.
- [26] Zhang X Y, Ma X, Wang X Y. Using the geographic detector model to identify factors controlling the bioavailability of Sr isotopes in China[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1032578.
- [27] Wang Z L, Liu C Q, Han G L, et al. Strontium isotopic geochemistry of the Changjiang estuarine waters: Implications for water-sediment interaction[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2001, 44(1): 129-133.
- [28] Lugli F, Weber M, Giovanardi T, et al. Fast offline data reduction of laser ablation MC-ICP-MS Sr isotope measurements via an interactive Excel-based spreadsheet ‘SrDR’[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2020, 35(5): 852-862.
- [29] Jiang T, Liu H B, Lu M J, et al. The comparison of different pre-treatment methods for acquiring otolith annuli of *Coilia nasus*[J]. 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[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(2): 62-67.]
- [30] Jiang T, Liu H B, Shen X Q, et al. Life history variations among different populations of *Coilia nasus* along the Chinese coast inferred from otolith microchemistry[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, 2014, 59(2): 383-389.
- [31] Brennan S R, Cline T J, Schindler D E. Quantifying habitat use of migratory fish across riverscapes using space-time isotope models[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2019, 10(7): 1036-1047.
- [32] Chase N M, Caldwell C A, Carleton S A, et al. Movement patterns and dispersal potential of Pecos bluntnose shiner (*Notropis simus pecosensis*) revealed using otolith microchemistry [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2015, 72(10): 1575-1583.

- [33] Hauser M, Doria C R C, Santos R V, et al. Shedding light on the migratory patterns of the Amazonian Goliath catfish, *Brachyplatystoma platynemum*, using otolith $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ analyses [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2019, 29(3): 397-408.
- [34] Zhou L, Jin Z D, Williams I, et al. Oxygen and strontium isotope markers of Lake Qinghai naked carp otoliths and their implication for fish migratory pattern[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(6): 668-675. [周玲, 金章东, Williams I, 等. 青海湖裸鲤耳石轮纹 O-Sr 同位素组成及对其洄游行为的指示[J]. 科学通报, 2016, 61(6): 668-675.]
- [35] Liu J, Ji H B. The characteristics of end member of the main element Sr and sr isotope in the upriver tributaries of Ganjiang river[J]. Environmental Chemistry, 2008, 27(2): 235-241. [刘静, 季宏兵. 赣江上游河水中主元素、锶和锶同位素端元组分的探讨[J]. 环境化学, 2008, 27(2): 235-241.]
- [36] Jiang T, Liu H B, Lu M J, et al. A possible connectivity among estuarine tapetail anchovy (*Coilia nasus*) populations in the Yangtze River, Yellow Sea, and Poyang Lake[J]. Estuaries and Coasts, 2016, 39(6): 1762-1768.
- [37] Wang H F, Wang Z L. Geochemical studies on the main ions and strontium isotopes in the Ganjiang River water[J]. Earth and Environment, 2009, 37(4): 326-332. [王海峰, 王中良. 赣江河水主成分及锶同位素地球化学研究[J]. 地球与环境, 2009, 37(4): 326-332.]
- [38] Ciepiela L R, Walters A W. Quantifying $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ temporal stability and spatial heterogeneity for use in tracking fish movement[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2019, 76(6): 928-936.
- [39] Huang Y F, Cheng F, Murphy B R, et al. Sagittal otolith microstructure, early growth and development of *Coilia ectenes* in the Yangtze Estuary, China[J]. Fisheries Science, 2014, 80(3): 435-443.
- [40] Liu Y, Ren P, Yang X W, et al. Spatial and temporal distribution of larvae and juvenile *Coilia nasus* in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(2): 506-517. [刘熠, 任鹏, 杨习文, 等. 长江下游刀鲚(*Coilia nasus*)仔稚鱼的时空分布[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 506-517.]
- [41] Wang S, Fang C L, Zhou H M, et al. Occurrence time and catch of young *Coilia nasus* at the mouth of Poyang Lake [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(10): 122-124. [王生, 方春林, 周辉明, 等. 鄱阳湖湖口刀鲚幼鱼出现的时间及渔获量[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(10): 122-124.]
- [42] Huang Y F, Rypel A L, Murphy B R, et al. Declined fitness in larvae born from long-distance migrants of anadromous *Coilia nasus* in the lower reaches of the Yangtze River, China[J]. Zoological Research, 2022, 43(3): 404-408.

Preliminary study for using otolith $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ to track the natal origin and reconstructing the early life history habitats of *Coilia nasus* from the Poyang Lake

XUAN Zhongya¹, YANG Yanping¹, HUA Zhong¹, MA Fengjiao², WANG Yiping¹, LIU Kai^{1,2}

1. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;

2. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China

Abstract: *Coilia nasus*, a historically significant fish species in the Yangtze River, has experienced a significant decline because of overfishing and habitat degradation. As an anadromous fish, *C. nasus* traverses different habitats over large geographic areas, making effective conservation difficult. Tracing their natal origin and lifelong habitat usage at the individual and population levels will enhance our ability to protect critical habitats of this anadromous fish. The migratory life history of *C. nasus* across freshwater, estuarine, and marine environments can be determined by analyzing otolith Sr/Ca ratios. However, difficulties remain in tracking their natal origins and identifying transitions between freshwater habitats during the early stages of their development. The use of otolith $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratios offers a robust approach for tracing the natal origins and migration patterns of *C. nasus*. The Sr isotope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) composition of the otoliths was analyzed using laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS) to confirm the hatching grounds and life histories of *C. nasus* in the Poyang Lake. In July and August 2023, a total of ten adult *C. nasus* and three adult *C. brachygnathus* were collected from the Duchang area of the Poyang Lake, Jiangxi Province, China. The otolith $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ profiles from the core to the edge displayed minor fluctuations of approximately 0.71448, indicating that the three *C. brachygnathus* individuals reside in the Poyang Lake. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of the otolith core region of nine *C. nasus* was close to 0.71448, indicating that they hatched in the Poyang Lake and subsequently returned to the lake (because they were caught in the Poyang Lake). Among these individuals, four migrated out of the Poyang Lake during their larval stage and five migrated during their juvenile stage. One individual exhibited an average $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.71078 in its first segment, suggesting that it was born in the main channel of the Yangtze River and then strayed into Poyang Lake after its sea life history. The results demonstrated the objectivity, accuracy, and stability of otolith $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio as a reliable geographical indicator for identifying the natal origin of *C. nasus* in the Poyang Lake. Furthermore, these findings shed light on habitat shifts between the Poyang Lake and the main Yangtze River channel, emphasizing the diverse timing of early life migration from the Poyang Lake. Consequently, despite being a preliminary study, this study demonstrates the potential of using Sr isotopes to distinguish between natal origins and freshwater habitats. This approach is significant within the context of a decade-long fishing prohibition in the Yangtze River, as it facilitates the assessment of species recovery and management while contributing to broader ecological and conservation insights.

Key words: *Coilia nasus*; otolith; Sr isotopes; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; the Poyang Lake

Corresponding author: LIU Kai. E-mail: liuk@ffrc.cn.