DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190910004 http://www.yykxjz.cn/

姜涛, 刘洪波, 轩中亚, 杨健. 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, Liu HB, Xuan ZY, Yang J. Similarity of microchemical “fingerprints” between the pectoral fin ray and otolith of *Coilia nasus*. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(1): 100–107

刀鲚胸鳍条和耳石微化学“指纹”相似性研究*

姜 涛[1] 刘洪波[1] 轩中亚[2] 杨 健[1,2①]

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心 长江中下游渔业生态环境评价与资源养护重点实验室 无锡 214081；2. 南京农业大学无锡渔业学院 无锡 214081)

摘要 耳石微化学被广泛应用于鱼类洄游生态学研究，但耳石的摘取难免会造成鱼的死亡和损伤，故寻找可以快捷、非致死地替代耳石进行微化学分析的材料很有意义。为此，本研究比较了刀鲚(*Coilia nasus*)胸鳍条和耳石微化学的相似性特征。耳石的锶钙比值(Sr/Ca)和 Sr 含量图谱分型结果分别很好地对应了所研究的洄游型、淡水定居型和陆封型的典型个体。胸鳍条微化学结果显示，湖鲚和短颌鲚 2 类个体呈现出稳定的低 Sr/Ca 值[(1.38±0.52)~(2.04±0.74)和(1.40±0.32)~(1.81±0.66)]与刀鲚胸鳍条生活史第一阶段的特征相吻合[(2.06±0.64)~(2.26±0.29)]，这些均反映了淡水生境“指纹”的特征。刀鲚胸鳍条 Sr 含量图谱和耳石相似，自核心至边缘可分为明显的 3 个阶段，分别对应于面分布图上自核心至边缘的蓝色、绿色、蓝色之间微化学“指纹”的变化。由此可见，刀鲚胸鳍条可以作为耳石的非致死、低损伤的代替材料，用于刀鲚洄游习性、生境履历等研究。同时，由于胸鳍条具有取样和前处理的优势，在其他鱼类资源或标志放流评价研究时，可以考虑以胸鳍条代替耳石来开展研究。

关键词 胸鳍条；耳石；刀鲚；湖鲚；短颌鲚；微化学

中图分类号 Q176; S917.4 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)01-0100-08

刀鲚(*Coilia nasus*)作为我国名贵鱼类代表之一，其资源正面临着岌岌可危的现状，相关保护刻不容缓。农业农村部2018年第5号通告决定停止发放刀鲚(长江刀鱼)等的专项捕捞许可证，禁止其天然资源的生产性捕捞。我国刀鲚的生态型组成非常复杂，既有溯河洄游型的刀鲚，又有淡水定居型的短颌鲚(*C. brachygnathus*)和陆封型的湖鲚(*C. nasus taihuensis*)。其中，以第1类种群价值最高，亟待有效保护，而其余2类则广泛分布于长江沿江的湖泊及江段中，部分水域甚至形成了优势种群。值得注意的是，以上3类刀鲚种群间常会发生混栖现象(姜涛等, 2013; 陈婷婷等, 2016)，加之外形相似，一些研究报道(徐钢春等, 2014; 李孟孟等, 2017; Chen *et al*, 2017)甚至推翻了利用上颌骨长短来区别刀鲚洄游与否的传统经验，使得准确评价上述洄游型刀鲚的资源现状及精确定位洄游型种群重要生境(“三场一通道”)的工作较难开

* 国家自然科学基金青年基金项目(31602159)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20160204)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2017JBFR02; 2018GH14)共同资助 [This work was supported by Youth Program of National Natural Science Foundation of China (31602159), Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (BK20160204), and Central Public-Interest Scientific Institution Based Research Fund, Freshwater Fisheries Research Center, CAFS (2017JBFR02; 2018GH14)]. 姜 涛，E-mail: jiangt@ffrc.cn

① 通讯作者：杨 健，研究员，E-mail: jiany@ffrc.cn

收稿日期: 2019-09-10, 收修改稿日期: 2019-12-09

展。因此，探寻更快捷地获取刀鲚的洄游履历、有效区别野生刀鲚所属3类生态型状况的手段已成为目前亟需解决的关键问题。

随着交叉学科的发展，耳石微化学“指纹”技术已被越来越多的研究证实为重建鲚属鱼类洄游习性、生境履历、群体关联性的有效方法(Yang *et al*, 2006; Jiang *et al*, 2012、2016、2019; *Khumbanyiwa et al*, 2018)。然而需要注意的是，由于耳石位于鱼类内耳迷路内，取样会导致个体死亡，并破坏其头部组织。寻找一个可快捷(甚至非致死)获取、可有效替代耳石的材料进行相关研究无疑具有十分重要的意义。由于耳石结构的特殊性，软骨鱼类较难通过耳石来进行微化学研究，取而代之的是利用鳍条微化学特征来进行洄游履历、群体组成特征等研究(Allen *et al*, 2009、2018; Phelps *et al*, 2012、2017)。与之相对应，虽然硬骨鱼类的相关研究常以耳石作为研究对象，但越来越多的报道证实，鳍条等硬组织也可用于鱼类洄游生态学研究。Rude 等(2014)利用鳍条微化学特征成功鉴别了野生和人工孵化北美狗鱼(*Esox masquinongy*)群体，同时，还发现鳍条内与水体中的锶钙比值(Sr/Ca)十分吻合且呈正相关关系，并且鳍条核心处(对应于孵化场)Sr/Ca 特征可保留至少 7 年以上。Tzadik 等(2017a)比较了 9 种鱼类耳石和鳍条微化学，发现二者间碱土族元素(Sr、Ba 等)和过渡元素(Fe、Co 等)高度一致。由此可见，鳍条是伴随鱼体一生的硬组织之一，且与耳石同为刀鲚年龄鉴定的重要材料(袁传宓等, 1978)，很有可能具有与耳石相似的微化学特征。

因此，本研究拟基于采自上述刀鲚、湖鲚和短颌鲚 3 类生态型典型个体的胸鳍条和耳石组织，同步开展微化学“指纹“的比较研究。一方面，验证胸鳍条与耳石微化学特征的相似性，从而可作为后者替代材料用于研究刀鲚洄游习性和生境履历；另一方面，为今后开展其他经济、珍稀鱼类的研究提供更经济、快捷的技术方法。

1　材料与方法

1.1　样品采集和前处理

分别于 2018 年 5、7 和 9 月于长江口南支、鄱阳湖庐山市、太湖三山岛水域采集刀鲚、短颌鲚和湖鲚各 5 尾。标本采集后冷冻运回实验室。解剖前，量取标本生物学信息(表 1)后，摘取左侧第 1 胸鳍条和左矢耳石进行微化学特征比较(表 1)。

表 1　样品信息
Tab.1　Sample details

生态型 Ecotype	样品号 Sample code	全长 Total length (mm)	体重 Body weight (g)
刀鲚 *C. nasus*	CE01	357	135.1
	CE02	285	68.7
	CE03	291	63.4
	CE04	303	69.7
	CE05	298	72.8
湖鲚 *C. nasus taihuensis*	CET01	203	18.5
	CET02	208	20.1
	CET03	199	16.8
	CET04	203	19.9
	CET05	202	18.2
短颌鲚 *C. brachygnathus*	CB01	234	33.2
	CB02	222	29.1
	CB03	223	26.0
	CB04	231	31.1
	CB05	240	28.2

耳石处理参考姜涛等(2016)的方法，统一选取矢状面作为碾磨面。具体处理过程参考 Liu 等(2018)的方法：首先，将耳石使用环氧树脂包埋；然后，使用配备有金刚石砂轮的碾磨机(Discoplan-TS, 司特尔公司, 丹麦)打磨至耳石核心暴露；最后，使用配备有绒布抛光盘的抛光机(LaboPol-35, 司特尔公司, 丹麦)进行抛光，至样品表面无明显划痕。

统一摘取左侧第 1 胸鳍条，使用环氧树脂进行包埋。待树脂凝固后切取靠近基部的 500 μm 薄片，并使用 AB 胶将其粘贴于载薄片上，进行打磨和抛光。待样品表面无明显划痕后，对所有样品进行超声清洗。样品清洗后，于 38℃烘箱内过夜烘干。

1.2　微化学分析

使用电子探针微区分析仪(JXA-8100, 日本电子株式会社, 日本)分析胸鳍条和耳石上的锶(Sr)、钙(Ca)元素指纹特征。以碳酸钙和钛酸锶分别作为 Ca 和 Sr 元素分析的标准样品。耳石分析参数参考Jiang等(2017)的方法：耳石定量线分析加速电压为15 kV，电子束电流为2×10^{-8} A，束斑直径为5 μm，分析间隔为10 μm；面分布分析加速电压为15 kV，电子束电流为5×10^{-7} A，束斑直径为5 μm。胸鳍条分析条件参考耳石条件进行优化。其中，定量分析参考耳石分析条件选择加速电压15 kV、电子束电流2×10^{-8} A。但考虑到胸鳍条较耳石剖面小，束斑直径选用2 μm；面分布分析选择加速电压15 kV，同时，为了降低胸鳍条表面

的损伤，在确保能够检测到样品内Sr元素的同时，电子束电流选择降低到3.6×10^{-7} A，束斑直径选用2 μm。

1.3 统计学分析

为便于分析比较，按惯例，本研究所述“Sr/Ca比值”为同时检测到的 Sr 和 Ca 元素含量的比值乘以1000 后的数值，即“Sr/Ca×1000”。

此外，为了更好地比较耳石定量线分析结果中不同阶段 Sr/Ca 特征的转变，参考李孟孟等(2017)引入STARS 分析(Sequential *t*-test analysis of regime shifts) (Rodionov, 2004; Rodionov *et al*, 2005)。其中，Huber权重、置信度分别设置为 1 和 0.1。同时，使用 SPSS 20.0 软件分析不同阶段 Sr/Ca 是否具有显著性差异($P<0.05$, Mann-Whitney *U*-test)。

2 结果

胸鳍条经打磨后可见到类似耳石的年轮与核心结构(图 1)。定量线分析结果显示(图 2)，湖鲚和短颌鲚的胸鳍条和耳石 Sr/Ca 都很稳定。其胸鳍条 Sr/Ca 值分别为(1.38±0.52)~(2.04±0.74)和(1.40±0.32)~(1.81±0.66)，其耳石Sr/Ca值分别为(1.46±0.82)~(2.00±0.63)和(1.37±0.51)~(2.35±0.87)。而刀鲚胸鳍条和耳石则可观察到较为明显的3个阶段，其中，胸鳍条第1阶段为从核心0 μm至48~212 μm，其Sr/Ca值为(2.06±0.64)~(2.26±0.29)；第2阶段为自核心48~212 μm至152~428 μm，Sr/Ca值为(3.17±0.38)~(4.20±0.85)；第3阶段的边缘处Sr/Ca值为(2.15±0.82)~(2.48±0.53) ($P<0.05$)。同时，耳石对应的3个阶段分别为第1阶段从核心0 μm至630~830 μm，Sr/Ca值为(1.34±0.70)~(1.80±0.91)；第2阶段从630~830 μm至1420~2080 μm，Sr/Ca值为(4.01±0.98)~(5.17±1.45)；第3阶段的边缘处Sr/Ca值为(1.51±1.31)~(2.88±0.81)(表2)。

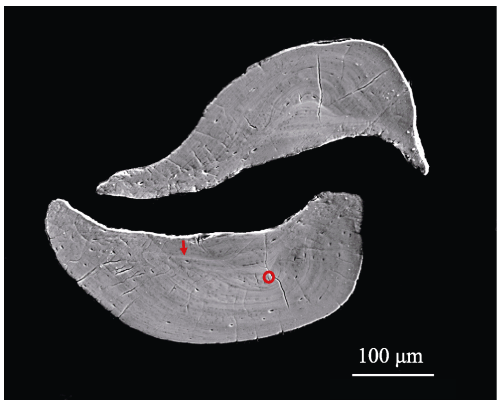

图 1 刀鲚胸鳍条剖面

Fig.1 Section of pectoral fin ray of *C. nasus*

箭头所示为第一年轮，红色圈为核心位置

The arrow showed the first annulus, and the red circle showed the core

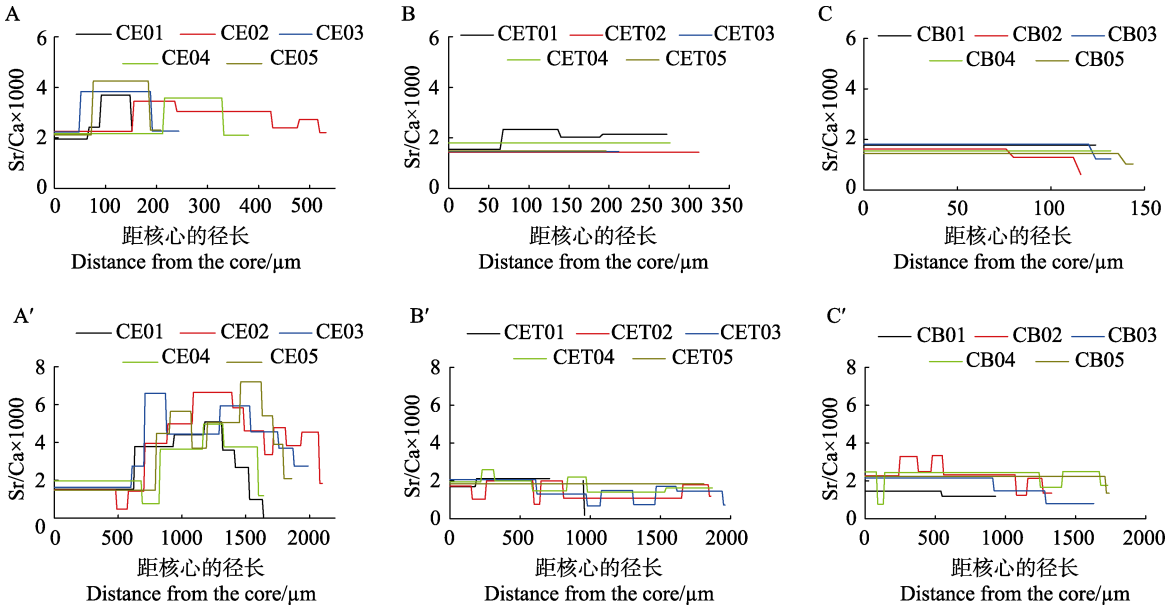

图 2 刀鲚、湖鲚和短颌鲚胸鳍条和耳石自核心至边缘锶钙比特征

Fig.2 Fluctuation of Sr/Ca ratio from the core to the edge in the sagittal plane of pectoral fin ray and otolith of *C. nasus*, *C. nasus taihuensis* and *C. brachygnathus*

A：刀鲚胸鳍条；A′：刀鲚耳石；B：湖鲚胸鳍条；B′：湖鲚耳石；C：短颌鲚胸鳍条；C′：短颌鲚耳石

A: Pectoral fin ray of *C. nasus*; A′: Otolith of *C. nasus*; B: Pectoral fin ray of *C. nasus taihuensis*; B′: Otolith of *C. nasus taihuensis*; C: Pectoral fin ray of *C. brachygnathus*; C′: Otolith of *C. brachygnathus*

表 2　刀鲚、湖鲚、短颌鲚胸鳍条和耳石 Sr/Ca 变化

Tab.2　Fluctuation of Sr/Ca ratio along line transects from the core (0 μm) to the edge in the pectoral fin ray and otolith of *C. nasus*, *C. nasus taihuensis* and *C. brachygnathus*

生态型 Ecotype	样品号 Sample code	Sr/Ca 值变化阶段 Sr/Ca ratio variation	胸鳍条 Pectoral fin ray		耳石 Otolith	
			径长 Distance from the core(μm)	Sr/Ca×10^3	径长 Distance from the core(μm)	Sr/Ca×10^3
刀鲚 *C. nasus*	CE01	1^a	0~92	2.07±0.27	0~630	1.51±0.74
		2^b	92~152	3.71±0.32	630~1420	4.17±0.93
		3^a	152	2.27±0.00	1420~1640	1.76±1.25
	CE02	1^a	0~156	2.26±0.29	0~710	1.34±0.70
		2^b	156~428	3.17±0.38	710~2080	5.00±1.29
		3^a	428~532	2.48±0.53	2080~2100	1.55±1.39
	CE03	1^a	0~52	2.23±0.43	0~710	1.80±0.91
		2^b	52~192	3.80±1.29	710~1880	4.99±1.28
		3^a	192~244	2.28±0.79	1880~1990	2.88±0.81
	CE04	1^a	0~216	2.13±0.85	0~830	1.77±0.83
		2^b	216~332	3.58±0.95	830~1600	4.01±0.98
		3^a	332~380	2.15±0.82	1600~1640	1.51±1.31
	CE05	1^a	0~76	2.06±0.64	0~800	1.49±0.73
		2^b	76~188	4.20±0.85	800~1800	5.17±1.45
		3^a	188~208	2.30±0.29	1800~1860	2.08±0.47
湖鲚 *C. nasus taihuensis*	CET01	1	0~272	2.04±0.74	0~710	2.00±0.63
	CET02	1	0~312	1.38±0.52	0~1860	1.46±0.82
	CET03	1	0~212	1.51±0.73	0~1960	1.56±0.80
	CET04	1	0~276	1.75±0.62	0~1870	1.73±0.65
	CET05	1	0~196	1.49±0.51	0~1810	1.80±0.79
短颌鲚 *C. brachygnathus*	CB01	1	0~124	1.72±0.72	0~930	1.37±0.51
	CB02	1	0~116	1.49±0.36	0~1330	2.35±0.87
	CB03	1	0~132	1.81±0.66	0~1630	1.71±0.88
	CB04	1	0~132	1.50±0.59	0~1730	2.35±0.74
	CB05	1	0~144	1.40±0.32	0~1740	2.22±0.76

注：同一样品中不同字母代表差异显著(P<0.05)

Note: Different letters indicate significant difference (P<0.05) in one sample

图 3 显示了刀鲚、湖鲚和短颌鲚胸鳍条和耳石上 Sr 元素面分布特征，分析认为，其与胸鳍条和耳石的 Sr/Ca 特征相匹配。值得注意的是，胸鳍条和耳石 Sr 含量的面分布特征也可明显区分出洄游的刀鲚个体(胸鳍条和耳石核心区为 Sr 含量较低的蓝色，外周为 Sr 含量较高的绿色环带，边缘部分为蓝色的环带)和淡水陆封型/定居型的湖鲚/短颌鲚个体(胸鳍条和耳石均表现为较均一的 Sr 含量低的蓝色)。

3　讨论

3.1　刀鲚胸鳍条和耳石微化学“指纹”特征比较

相较于耳石微化学“指纹”研究，胸鳍条“指纹”研究起步较晚，且以软骨鱼研究为多。由于软骨鱼类，如鲟鱼(*Acipenser gueldenstaedtii*)，耳砂结构的特殊性(Arai *et al*, 2002)，相关微化学工作多集中于胸鳍条上(Phelps *et al*, 2012、2017; Willmes *et al*, 2016; Sellheim *et al*, 2017; Allen *et al*, 2018)。与之相比，硬骨鱼类相关报道相对较少。Smith 等(2010)则证实了小口黑鲈(*Micropterus dolomieu*)胸鳍条中 Sr/Ca 特征与其环境相符；Rude 等(2014)研究发现，采自不同湖区北美狗鱼(*Esox masquinongy*)鳍条中的 Sr/Ca 与捕获地水样十分吻合；Tzadik 等(2017b)利用胸鳍条相关微化学“指纹”特征，成功识别了来自不同孵化场的伊氏石斑鱼(*Epinephelus itajara*)群体。然而，迄今对于洄游型鱼类的鳍条微化学研究尚很缺乏。

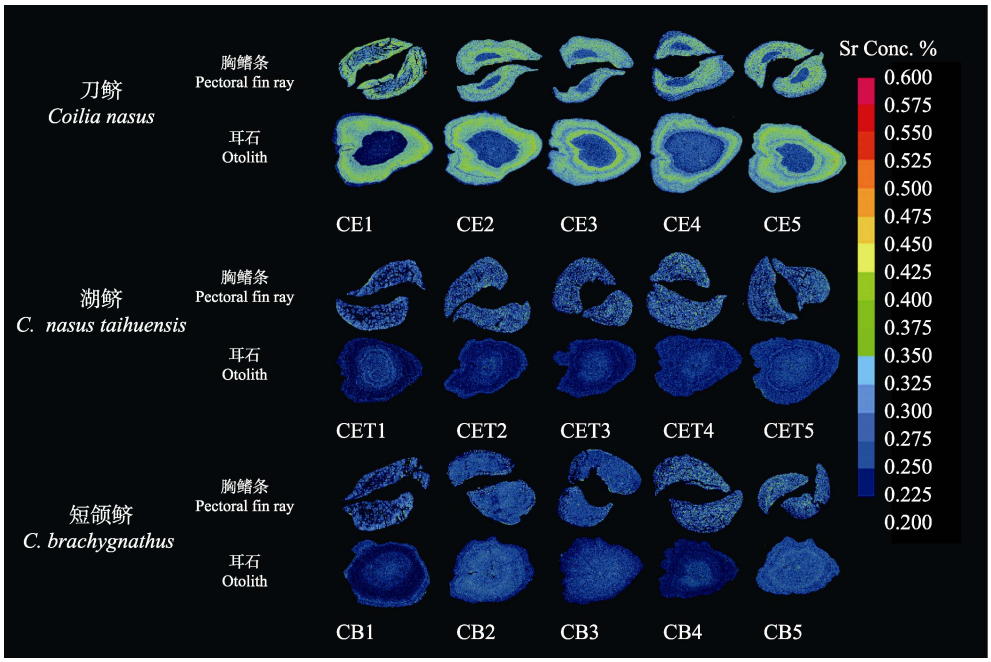

图 3 刀鲚、湖鲚和短颌鲚胸鳍条和耳石上 Sr 元素面分布

Fig.3 Sr concentrations in the sagittal otolith and pectoral fin ray plane of *Coilia nasus*, *C. nasus taihuensis* and *C. brachygnathus*

本研究结果显示，刀鲚、湖鲚和短颌鲚个体耳石呈现出不同的“指纹”特征，分别为典型的洄游型、淡水定居型和陆封型个体(Yang *et al*, 2006; 姜涛等, 2013)。单从它们的胸鳍条“指纹”特征的对比可以准确反演出它们之间的洄游习性和生境履历的差异。其中，湖鲚和短颌鲚呈现稳定的低 Sr/Ca 值，且与刀鲚胸鳍条第 1 阶段特征相吻合。这些 Sr/Ca 值均反映了淡水生境履历的特征(图 2)。此外，本研究中刀鲚胸鳍条和耳石一样，自核心至边缘可分为明显的 3 个阶段，对应于面分布图上自核心至边缘的蓝色、绿色、蓝色之间图谱的变化。可见，二者均反映了该鱼个体淡水孵化、半咸水栖息以及最终回到淡水生境的溯河洄游生活史 3 个阶段的过程。

对比胸鳍条和耳石 Sr/Ca 不难发现，洄游个体在半咸水生境履历中胸鳍条 Sr/Ca 要略低于耳石；而淡水生境履历中胸鳍条 Sr/Ca 要略高于耳石。对于湖鲚和短颌鲚而言，其胸鳍条和耳石 Sr/Ca，部分个体前者高于后者(如 CET01、CET04、CB01 和 CB03)，其他个体前者低于后者(如 CET02、CET03、CET05，CB02、CB04 和 CB05)。由此可见，刀鲚、湖鲚和短颌鲚的胸鳍条和耳石间 Sr/Ca 值并不是简单的线性关系。而这可能是其元素积累的方式不同所致(Gillanders, 2001)。但这显然不会影响胸鳍条代替耳石作为刀鲚洄游生态学研究的重要材料。总之，刀鲚胸鳍条和耳石的微化学“指纹”特征相匹配，均能清晰准确地反映洄游/淡水定居的生境履历。

3.2 刀鲚胸鳍条微化学“指纹”研究优势

相对于耳石而言，胸鳍条分析显然拥有对实验鱼低损伤和非致死等优势。除此之外，通过本研究发现，二者在很多方面也存在不同。首先，从样品的收集来看，鱼类耳石分析常用矢耳石，但其数量仅有 2 个；而对鱼类而言，其胸鳍条有许多(如刀鲚每侧有 6 根，共计 12 根)。因此，就样品收集而言，胸鳍条可采样本要远多于耳石。其次，从样品的前处理来看，无论是胸鳍条还是耳石，均需要进行包埋、打磨和抛光处理。所不同的是，耳石以原基为球心，包裹生长。因此，需要精确打磨到核心充分暴露，未打磨至核心或核心磨损、缺失均无法进行后续的微化学分析。因此，耳石需要逐一处理。与之相比，胸鳍条不存在这样的问题。从胸鳍条的发育来看，更类似于骨骼的柱状结构向外生长(张宗锋等, 2015)，这点从袁传宓等(1978)所总结的胸鳍条轮纹模式也可以看出。因此，胸鳍条分析通常仅需打磨出靠近基部的样品(Rude *et al*, 2014; Tzadik *et al*, 2017b)至表面无明显划痕的平面即可。所以，胸鳍条一方面可以批量处理，另一方面在经过损伤较大的微化学分析(如 LA-ICPMS)后，其只需打磨去除被烧蚀部分便可以获得新的、具有核心的表面，从而进行其他分析研究。而耳石在核心部分损伤后，因没有其他可以替代的部分，几乎无法开展其

他研究。

当然，胸鳍条指纹研究也有其不足，如其虽然可以观察年轮，但无法像耳石一样观察到非常清晰的日轮特征，从而在一定程度上限制了其在鱼类洄游生态学上开展时间和空间综合分析。图 2 显示，经过面分布分析后，胸鳍条表面已有裂痕，而耳石表面却没有明显裂痕。究其原因，鳍条质地和结构更类似于鱼类骨骼(Gillanders, 2001)，因此，不同于文石结构的耳石能够耐受更苛刻的分析电压和电流条件。总之，刀鲚胸鳍条和耳石微化学“指纹”具有很强的相似性，凭借其取样(非致死、低损伤、样品数量多)和处理(易处理、可批量、反复处理)上的优势，可代替“耳石”广泛应用于各种洄游生态学的研究。

在今后的研究中，有必要就刀鲚胸鳍条核心多元素组成等进行深入分析，以验证其是否可以与耳石一样作为鱼类群体识别的重要材料。除此之外，基于本研究刀鲚胸鳍条微化学“指纹”的结果不难看出，外界 Sr/Ca 的变化会同时在胸鳍条和耳石上留下印记。因此，在进行鱼类微化学标志放流时，除了大力开展耳石微化学天然标记(袁威等, 2019)和人工标记(司飞等, 2019)，更可以考虑以胸鳍条代替耳石来评价效果。一方面可显著节约制样时间和成本，另一方面也可避免实验材料收集过程造成的鱼体死亡或组织严重受损。

参　考　文　献

Allen PJ, DeVries RJ, Fox DA, *et al*. Trace element and strontium isotopic analysis of Gulf sturgeon fin rays to assess habitat use. Environmental Biology of Fishes, 2018, 101(3): 469–488

Allen PJ, Hobbs JA, Cech Jr JJ, *et al*. Using trace elements in pectoral fin rays to assess life history movements in sturgeon: Estimating age at initial seawater entry in Klamath River green sturgeon. Transactions of the American Fisheries Society, 2009, 138(2): 240–250

Arai T, Miyazaki N. Microstructural growth in otoliths of the Russian sturgeon, *Acipenser gueldenstaedtii*. Journal of Applied Ichthyology, 2002, 18(4–6): 365–367

Chen TT, Jiang T, Liu HB, *et al*. Do all long supermaxilla-type estuarine tapertail anchovies (*Coilia nasus* Temminck et Schlegel, 1846) migrate anadromously? Journal of Applied Ichthyology, 2017, 33(2): 270–273

Chen TT, Jiang T, Lu MJ, *et al*. Microchemistry analysis of otoliths of *Coilia nasus* and *Coilia brachygnathus* from the Jingjiang section of the Yangtze River. Journal of Lake Sciences, 2016, 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, 2016, 28(1): 149–155]

Gillanders BM. Trace metals in four structures of fish and their use for estimates of stock structure. Fishery Bulletin-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2001, 99(3): 410–419

Jiang T, Liu HB, Huang HH, *et al*. Migration patterns and habitat use of the tapertail anchovy *Coilia mystus* in the Oujiang River Estuary and the Zhujiang River Estuary, China. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(8): 35–40

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

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 [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, Yang J, Liu HB, *et al*. Life history of *Coilia nasus* from the Yellow Sea inferred from otolith Sr:Ca ratios. Environmental Biology of Fishes, 2012, 95(4): 503–508

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

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 [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]

Khumbanyiwa DD, Li MM, Jiang T, *et al*. Unraveling habitat use of *Coilia nasus* from Qiantang River of China by otolith microchemistry. Regional Studies in Marine Science, 2018, 18: 122–128

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 Hydrobioloica Sinica, 2017, 41(5): 1054–1061 [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]

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

Phelps QE, Hupfeld RN, Whitledge GW. Lake sturgeon *Acipenser fulvescens* and shovelnose sturgeon *Scaphirhynchus platorynchus* environmental life history revealed using pectoral fin-ray microchemistry: Implications for interjurisdictional conservation through fishery closure zones. Journal of Fish Biology, 2017, 90(2): 626–639

Phelps QE, Whitledge GW, Tripp SJ, *et al*. Identifying river of origin for age-0 *Scaphirhynchus* sturgeons in the Missouri and Mississippi rivers using fin ray microchemistry. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2012, 69(5): 930–941

Rodionov SN, Overland JE. Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(3): 328–332

Rodionov SN. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. Geophysical Research Letters, 2004, 31(9): L09204

Rude NP, Smith KT, Whitledge GW. Identification of stocked muskellunge and potential for distinguishing hatchery-origin and wild fish using pelvic fin ray microchemistry. Fisheries Management and Ecology, 2014, 21(4): 312–321

Sellheim K, Willmes M, Hobbs JA, *et al*. Validating fin ray microchemistry as a tool to reconstruct the migratory history of white sturgeon. Transactions of the American Fisheries Society, 2017, 146(5): 844–857

Si F, Wang QL, Yu QH, *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]

Smith KT, Whitledge GW. Fin ray chemistry as a potential natural tag for smallmouth bass in Northern Illinois Rivers. Journal of Freshwater Ecology, 2010, 25(4): 627–635

Tzadik OE, Peebles EB, Stallings CD. Life-history studies by non-lethal sampling: Using microchemical constituents of fin rays as chronological recorders. Journal of Fish Biology, 2017a, 90(2): 611–625

Tzadik OE, Jones DL, Peebles EB, *et al*. The effects of spatial scale on assigning nursery habitats in Atlantic goliath groupers (*Epinephelus itajara*) using non-lethal analyses of fin rays. Estuaries and Coasts, 2017b, 40(6): 1785–1794

Willmes M, Glessner JJG, Carleton SA, *et al*. $^{87}Sr/^{86}Sr$ isotope ratio analysis by laser ablation MC-ICP-MS in scales, spines, and fin rays as a non-lethal alternative to otoliths for reconstructing fish life history. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2016, 73(12): 1852–1860

Xu GC, Gu RB, Liu HB, *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]

Yang J, Arai T, Liu HB, *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 CF, Lin JP, Liu RH, *et al*. On the age and growth of the Chinese anchovy, *Coilia ectenes*, from the Yangtze River. Acta Hydrobiologica Sinica, 1978, 2(3): 285–298 [袁传宓, 林金榜, 刘仁华, 等. 刀鲚的年龄和生长. 水生生物学集刊, 1978, 2(3): 285–298]

Yuan W, Wang YK, Zhang TT, *et al*. Investigating the population structure of *Larimichthys polyactis* from the Yellow Sea and Bohai Sea using stable isotope mass spectrometry. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(5): 11–18 [袁威, 王玉堃, 张廷廷, 等. 基于耳石 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 的黄、渤海秋季小黄鱼补充群体的种群划分. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 11–18]

Zhang ZF, Shi YH, Zhang GY, *et al*. Early development of the vertebral column and the appendicular skeleton in the *Coilia nasus*. Fisheries Science and Technology Information, 2015, 42(4): 175–178 [张宗锋, 施永海, 张根玉, 等. 刀鲚脊柱及附肢骨骼早期发育研究. 水产科技情报, 2015, 42(4): 175–178]

(编辑 马璀艳)

Similarity of Microchemical “Fingerprints” Between the Pectoral Fin Ray and Otolith of *Coilia nasus*

JIANG Tao[1], LIU Hongbo[1], XUAN Zhongya[2], YANG Jian[1,2①]

(1. *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 Sciences, Wuxi* 214081;
2. *Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi* 214081)

Abstract　Otolith microchemistry are widely applied in the field of fish migration ecology. However, the extraction of otoliths always results in damage to tissue and the death of the fish. Therefore, it is of great importance to discover an alternative material as a nonlethal substitute for otoliths for effective microchemical “fingerprint” analysis. Consequently, the similarities of microchemical characteristics between the pectoral fin ray and otolith of *Coilia nasus* were compared in this study. The ratio of Sr/Ca and classification of Sr concentration mapping results in the otolith matched the typical patterns of anadromous, freshwater, and land-locked ecotypes well. Of note, the results of the pectoral fin rays showed that *C. nasus taihuensis* and *C. brachygnathus* had consistently low Sr/Ca ratios [(1.38±0.52)~(2.04±0.74) and (1.40±0.32)~(1.81±0.66), respectively], which coincided with the first stage of *C. nasus* [(2.06±0.64)~(2.26±0.29), i.e., freshwater phase], which reflected the characteristics of the freshwater habitat “fingerprints.” Furthermore, the *C. nasus* pectoral fin ray, like the otolith, could be divided into three distinct phases from the core to the edge, corresponding to the bluish, greenish, and bluish “fingerprint” changes in the results of mapping analysis. The present study strongly suggested that pectoral fin rays are a nonlethal and low-damage substitute for otoliths to investigate the migratory habit and conduct life history research using microchemical “fingerprint” analysis. In addition, considering the advantages of sample collection and pre-treatment, pectoral fin rays could play a role in the future as an alternative material for accurate assessment of *Coilia* resources and the effectiveness of artificial fish release using microchemical marking approaches.

Key words　Pectoral fin ray; Otolith; *Coilia nasus*; *C. nasus taihuensis*; *C. brachygnathus*; Microchemistry

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