

## 基于耳石微化学的长江靖江段长颌鲢与短颌鲢生境履历重建\*

陈婷婷<sup>1</sup>, 姜涛<sup>1</sup>, 卢明杰<sup>2</sup>, 刘洪波<sup>3</sup>, 杨健<sup>1,3\*\*</sup>

(1: 南京农业大学无锡渔业学院, 无锡 214081)

(2: 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

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

**摘要:** 为了解长江靖江段两种刀鲢生态型长颌鲢与短颌鲢的生境履历的不同, 利用 X 射线电子探针微区分析技术研究采集自长江靖江江段的长颌鲢和短颌鲢个体耳石的锶和钙微化学特征. 定量分析结果显示, 短颌鲢个体的耳石锶、钙比值 (即  $Sr/Ca \times 10^3$ ) 稳定在 2.00 左右, 反映了其在纯淡水生活的习性; 而长颌鲢的锶、钙比值波动显著, 不仅具有对应淡水生活的低值 ( $1.18 \pm 0.48 \sim 2.11 \pm 0.94$ ), 还具有对应半咸水生活的高值 ( $3.39 \pm 0.60 \sim 6.79 \pm 1.13$ ), 反映了其溯河洄游的生活习性. 短颌鲢因在淡水生活, 其淡水系数 ( $F_C$ ) 值均为 1.00, 2013 年和 2014 年长颌鲢的  $F_C$  值分别为  $0.36 \pm 0.06$  和  $0.50 \pm 0.11$ , 证明了长颌鲢与短颌鲢群体间存在差异, 而且长颌鲢不同年份群体间也并不相同. 长颌鲢和短颌鲢的洄游模式存在显著差异, 同时不同年份间的长颌鲢也存在生境履历差异. 靖江段长颌鲢资源群可能来自不同出生地起源及生活史背景不同的群体. 该江段是两类刀鲢的重要栖息地或洄游通道.

**关键词:** 长江; 靖江; 长颌鲢; 短颌鲢; 电子探针; 微化学; 淡水系数

## Microchemistry analysis of otoliths of *Coilia nasus* and *Coilia brachygnathus* from the Jingjiang section of the Yangtze River

CHEN Tingting<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>, LU Mingjie<sup>2</sup>, LIU Hongbo<sup>3</sup> & YANG Jian<sup>1,3\*\*</sup>

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

(2: College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R. China)

(3: Key Laboratory of Fishery Ecological Environment Assessment and Research Conservation in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Science, Wuxi 214081, P.R. China)

**Abstract:** In order to explore the different ecotypes in the life history of tapertail anchovy between its *Coilia nasus* and *C. brachygnathus* which live in Jingjiang section of the Yangtze River, an electronic probe microanalyzer was applied to analyze the microchemistry patterns of element Sr and Ca in otoliths of these two fishes collected from the Jingjiang section of the Yangtze River. Analysis results on the line transect showed that the Sr/Ca ratio (i.e.,  $Sr/Ca \times 10^3$ ) in the otolith of *C. brachygnathus* was consistently low (around 2.00), indicating that these individuals experienced in freshwater habitat during its whole life. In contrast, *C. nasus* had a fluctuation pattern of Sr/Ca ratio in the otolith from low to high, suggesting the individuals experienced not only in the freshwater, but also in the brackish water at different stages in their life history. All these differences could be well confirmed by the freshwater coefficient ( $F_C$ ). The value of  $F_C$  in the *C. brachygnathus* was 1.00, and in contrast, the values of  $F_C$  in the *C. nasus* for the individuals collected in 2013 and 2014 were  $0.36 \pm 0.06$  and  $0.50 \pm 0.11$ , respectively. It confirmed an obvious difference of life history between *C. nasus* and *C. brachygnathus*, as well as *C. nasus* collected between different years. The present study demonstrated that the migration patterns were significantly different between *C. nasus* and *C. brachygnathus*, as well as *C. nasus* collected in 2013 and 2014. The resource of *C. nasus* in Jingjiang section might originate from different stocks with different natal waters and life history background. The water ecotypes in Jingjiang section of the Yangtze River must be the important habitat or migration channel for both tapertail anchovy.

\* 国家自然科学基金项目 (31372533) 和江苏省自然科学基金项目 (BK20131089) 联合资助. 2015-02-05 收稿; 2015-04-21 收修改稿. 陈婷婷 (1990~), 女, 硕士研究生; E-mail: emily928@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: jiany@ffrc.cn.

**Keywords:** Yangtze River; Jingjiang section; *Coilia nasus*; *Coilia brachygnathus*; electronic probe microanalyzer; microchemistry; freshwater coefficient

刀鲚(*Coilia nasus*)属鲱形目、鲱科、鲚属。目前一般认为,长江刀鲚有溯河洄游型(即长颌鲚,*C. nasus*)和淡水定居型(即短颌鲚,*C. brachygnathus*)2类生态型<sup>[1]</sup>。短颌鲚主要生活在长江中下游以及太湖、巢湖等附属湖泊<sup>[2]</sup>。前者的经济价值远高于后者。与长颌鲚相比,短颌鲚上颌骨显著较短,通常用上颌骨与头长的比值是否大于1来判别两者之间的差异<sup>[1]</sup>。近年来,由于水质污染、酷渔滥捕和水利工程等原因<sup>[3-4]</sup>,刀鲚的资源量在逐年下降,目前难以形成渔汛<sup>[5-9]</sup>。迄今为止,对于长颌鲚与短颌鲚的分类学问题学术界仍有争论<sup>[1,10-11]</sup>。最新的研究发现短颌鲚中也存在像长颌鲚那样溯河洄游的个体<sup>[12]</sup>。这些都使得传统上利用上颌骨长短来判别刀鲚淡水定居或溯河洄游生境履历群体的方法显现出很大的不确定性。

江苏段是长江刀鲚的主产区,而最主要的捕捞区在靖江江段(占全省捕捞量的40%以上)<sup>[3]</sup>。调查发现,靖江江段同时分布有长颌鲚和短颌鲚<sup>[13]</sup>。迄今,涉及该江段刀鲚的绝大部分研究都没有明确地指出研究对象是否为长颌鲚或短颌鲚<sup>[2-9]</sup>。由于没有给出上颌骨长短的数据,无法判别其中是否混有短颌鲚个体;再由于上述短颌鲚中也可能存在溯河洄游个体,这使得简单地从形态去区分刀鲚群体的洄游性存在偏差。此外,由于靖江江段一直以来为刀鲚重要的洄游通道,此水域不同群体或生态型组成复杂,如何了解其动态也是目前评价、保护和合理利用刀鲚资源的重要难题之一。因此,通过较为客观的手段,把握长江靖江段长颌鲚和短颌鲚各自的洄游生态学特征无疑非常重要。然而由于刀鲚个体较小,溯河洄游的生活史复杂以及出水即死的强应激特性,无法基于一些传统的调查方法(如追踪调查、标记放流等)来解决上述难题<sup>[14]</sup>。

鱼类的耳石主要由碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )构成,一旦形成就不易被重新吸收,能够准确地记录鱼类所经历过的生境过程<sup>[15]</sup>。耳石中矿质元素(特别是Sr、Ca)沉积的变化(被称为耳石微化学)常被用来作为反演不同生境条件的标记,具有客观性且与生境良好相关的特点<sup>[16-19]</sup>,特别是耳石Sr/Ca常被用作微化学“指纹”来解决鱼类生境反演的难题。迄今,利用电子探针微区分析技术(EPMA)获取鱼类耳石的Sr/Ca,进而有效重建生境“履历”的研究已经取得了很大的突破<sup>[18-22]</sup>。其原理是运用不同盐度水体Sr/Ca所存在的显著差异(淡水低、河口居中、海水高)来客观重建生境“履历”<sup>[23-26]</sup>。Yang等<sup>[23]</sup>研究凤鲚、长江口刀鲚和太湖湖鲚的生活史后发现,长江口刀鲚耳石上对应于海、淡水生境的Sr/Ca高低差异显著,这与陆封型太湖湖鲚持续低值的现象截然不同;同时,也确定了对应淡水、半咸水、海水不同生境“履历”的蓝色、绿黄色、红色等不同颜色的可视化、图像化标准。这也得到Dou等<sup>[26]</sup>研究长江刀鲚生境变化结果的支持。另外,Jiang等<sup>[24]</sup>通过微化学结合耳石年轮的研究,还发现了洄游性刀鲚幼鱼需要在淡水生境中发育将近一年时间才入海的情况。其通过比较我国多个河口刀鲚的耳石生境“履历”还发现,不同河口刀鲚群体各自具有相对独特的生活史类型<sup>[22]</sup>。然而靖江段刀鲚的相关研究尚很少。Zhong等<sup>[17]</sup>通过耳石微化学分析,初步报道了靖江段洄游型刀鲚的生境情况。徐钢春等<sup>[12]</sup>基于长颌鲚和短颌鲚各1尾报道了靖江段短颌鲚也有洄游型个体的现象。靖江作为刀鲚的主产区和洄游通道,亟需开展更全面和更深入的研究调查;因此,本研究拟基于长江靖江段较为多量长颌鲚和短颌鲚的耳石标本,利用耳石微化学的手段,进一步较为全面地研究两种刀鲚生态型个体间生活习性的异同;评价其生境履历、资源组成的特征,以期有效保护长江靖江段洄游性刀鲚的资源及江段的洄游通道功能提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

实验所用鱼均采自长江靖江段,所用网具为流刺网。11尾的短颌鲚采样时间为2013年4月24日。长颌鲚采样时间分别为2013年4月25日和2014年5月19日,2次分别采到6尾和9尾。对鱼体进行全长、体重、上颌骨长、头长等基础数据的测量(其中上颌骨长和头长利用游标卡尺测定)。其年龄的鉴定采用鱼鳞结合耳石调查读取(表1)。所有鱼体标本经测量称重后解剖并取出耳石。耳石用去离子水清洗,自然晾干后待用。

### 1.2 分析方法

耳石先用丹麦Struers公司的EpoFix环氧树脂包埋固定,再用相同公司的Discoplan-TS碾磨机碾磨(第

1 阶段用 700 目金刚砂轮粗磨,第 2 阶段用 1200 目砂纸细磨至核心将要暴露后,换用相同公司的装有机织布抛光盘的 Roto Pol-35 磨抛机,配合抛光液将其抛光至核心完全暴露。耳石再用 Milli-Q 水超声清洗后,晾干,真空镀膜机(JEE-420,日本电子株式会社)镀膜(36 A,25 s)。

参考 Yang 等<sup>[23]</sup>的方法,使用日本电子株式会社的 JXA-8100 型 X 射线电子探针微区分析仪(EPMA)分析耳石微化学。自耳石核心沿最长径至耳石边缘的一条直线进行定量线分析。EPMA 加速电压和电子束电流分别为 15 kV 和  $2.0 \times 10^{-8}$  A,束斑直径为 5  $\mu\text{m}$ ,每点驻留时间为 15 s,以 10  $\mu\text{m}$  为间隔连续打点测定。标准样品取用  $\text{CaCO}_3$  和钛酸锶( $\text{SrTiO}_3$ )。之后,再对耳石进行面分布分析。此时 EPMA 加速电压和电子束电流分别为 15 kV 和  $5.0 \times 10^{-7}$  A,束斑直径为 5  $\mu\text{m}$ ,像素为 7  $\mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ ,每点驻留时间为 30 ms。下文中所出现的“Sr/Ca”均按惯例使用耳石中锶元素浓度与钙浓度的比乘以  $10^3$  的标准化值(即“Sr/Ca $\times 1000$ ”)。

### 1.3 数据分析

淡水系数( $F_c$ )计算参考 Jiang 等<sup>[22]</sup>的定义,即  $F_c = L_i/L_r$ 。其中  $L_i$  为基于 EPMA 测定结果的自耳石核心沿最长半径方向至对应淡水生境(低 Sr 含量或低 Sr/Ca)区域结束时的径长(亦对应于耳石 Sr 面分布分析图像中耳石中心蓝色区域的半径); $L_r$  为定量线分析时所沿耳石从核心到边缘的最长半径。

数据使用 Excel 2003 软件进行汇总处理。耳石不同区域 Sr/Ca 的趋势用平均值 $\pm$ 标准差表示,使用 SPSS 19.0 软件进行非参数检验( $P < 0.05$ , Mann-Whitney U-test)。淡水系数进行单因素方差分析( $P < 0.01$ , One-way ANOVA)判别不同群体。

## 2 结果与讨论

短颌鲢(上颌骨长:16.15 $\pm$ 3.96 mm,上颌骨长/头长:0.88 $\pm$ 0.07)的全长为 120.00 $\pm$ 2.10 mm,体重为 5.54 $\pm$ 2.70 g,年龄为 1 龄+,2013 年所采长颌鲢(上颌骨长:47.69 $\pm$ 2.91 mm,上颌骨长/头长:1.11 $\pm$ 0.02)的全长为 309.80 $\pm$ 2.23 mm,体重为 127.60 $\pm$ 34.85 g,年龄为 2 龄+,2014 年所采长颌鲢(上颌骨长:45.10 $\pm$ 3.08 mm,上颌骨长/头长:1.12 $\pm$ 0.06)的全长为 271.00 $\pm$ 2.07 mm,体重为 92.27 $\pm$ 25.58 g,年龄为 2 龄+,11 尾短颌鲢耳石的微化学分析结果显示耳石从核心到边缘的 Sr/Ca 均较低(表 1),各测定点的比值几乎不超过 3;从核心到边缘比值的平均值最大为 2.32 $\pm$ 0.93(个体 jjcb17),最小为 1.13 $\pm$ 0.58(个体 jjcb16)(表 1)。与定量分析的结果相一致,面分布分析结果显示短颌鲢的 Sr 含量的面分布图均为蓝色(图 1),说明其耳石上 Sr 元素的分布呈稳定低值,这与 Yang 等<sup>[23]</sup>所记录到的陆封于太湖、全生活史淡水生活的刀鲢耳石 Sr 类型一致,表明本研究的短颌鲢仅生活在纯淡水环境。淡水中极低的 Sr 浓度会导致耳石中的 Sr 含量极低。本实验中短颌鲢年龄为 1 龄+,其耳石 Sr/Ca 稳定在 2.00,符合淡水生活特征,不具有溯河洄游“履历”<sup>[12,28]</sup>。根据 Jiang 等<sup>[24]</sup>对黄海刀鲢的研究发现鲢属鱼类在淡水环境中孵化生长不足 1 龄时就会进行入海洄游,可以认为本研究中所采短颌鲢均为纯淡水生活个体。沈林宏等<sup>[13]</sup>发现,当幼鱼全长达到 8 cm 时,长颌鲢与短颌鲢的上颌骨已经形成,前者上颌骨达到或超过胸鳍基部(即上颌骨/头长大于 1),后者上颌骨则不到。本研究中短颌鲢全长范围为 8.6~14.9 cm,上颌骨已经发育,可以区分判定为典型的短颌鲢个体。值得注意的是,徐钢春等<sup>[12]</sup>对 2013 年 4 月同样在靖江段采集到的长颌鲢和短颌鲢进行耳石微化学分析时发现,所采 1 尾典型短颌鲢耳石 Sr/Ca 可以分为低值区(平均 1.59 $\pm$ 0.80)和高值区(平均 4.38 $\pm$ 1.33)2 个阶段,与 Yang 等<sup>[23]</sup>所记录到长江溯河洄游刀鲢耳石的 Sr 类型一致,表明短颌鲢中的一些个体也可以像长颌鲢一样参与溯河洄游。本研究中的短颌鲢未发现洄游型,这可能反映出:(1)洄游型短颌鲢并不常见,(2)短颌鲢的洄游和定居生态型资源情况只能由耳石微化学等手段来区分,传统的形态学方法容易导致误判。沈林宏等<sup>[13]</sup>在研究长江刀鲢幼鱼的采集时发现,在靖江段采集的渔获物中有不少短颌鲢,且在不同时间段刀鲢和短颌鲢的幼鱼捕捞所占比例不同,这表明靖江段短颌鲢的资源量亦不能忽视。如果不加以区分,很难做到合理地评价长江靖江段短颌鲢中较高价值的洄游型和较低价值的定居性资源量现状。鉴于目前刀鲢研究论文很少有上颌骨长数据以及刀鲢中长颌鲢、短颌鲢复杂生态型的现状,建议在今后相关论文中将提供上颌骨长等数据作为规范,以便更有效地把握所研究个体的生态型并提高结果的可比性。

表 1 长颌鲢和短颌鲢耳石中锶和钙的微化学变化

Tab.1 Fluctuation of Sr and Ca microchemistry in otoliths of *C. nasus* and *C. brachygnathus*

生态型	样品 编号	全长/ cm	体重/ g	年龄	上颌长/ 头长	Sr/Ca 变化阶段	耳石径长/ $\mu\text{m}$	元素 测定点	Sr/Ca $\times$ $10^3$ *	
短颌鲢	jjcb01	13.3	8.21	1+	0.76	1	0 ~ 1190	119	1.22 $\pm$ 0.76	
	jjcb02	10.0	3.42	1+	0.91	1	0 ~ 2440	244	1.60 $\pm$ 0.79	
	jjcb08	10.6	3.57	1+	0.93	1	0 ~ 950	95	1.20 $\pm$ 0.59	
	jjcb09	14.9	10.70	1+	0.96	1	0 ~ 1680	168	1.36 $\pm$ 0.54	
	jjcb11	10.9	3.98	1+	0.93	1	0 ~ 1120	112	1.51 $\pm$ 0.73	
	jjcb12	12.0	7.23	1+	0.84	1	0 ~ 1460	146	1.53 $\pm$ 0.73	
	jjcb13	12.1	5.79	1+	0.93	1	0 ~ 1270	127	1.18 $\pm$ 0.64	
	jjcb14	13.4	8.38	1+	0.79	1	0 ~ 1310	131	1.25 $\pm$ 0.55	
	jjcb16	8.6	2.34	1+	0.81	1	0 ~ 950	95	1.13 $\pm$ 0.58	
	jjcb17	10.6	4.17	1+	0.90	1	0 ~ 1200	120	2.32 $\pm$ 0.93	
	jjcb18	9.6	3.21	1+	0.88	1	0 ~ 1080	108	1.44 $\pm$ 0.69	
	长颌鲢 (2013 年)	jjce02	30.7	100.83	2+	1.08	1	0 ~ 970	97	1.97 $\pm$ 1.05 <sup>a</sup>
		jjce04	34.6	146.69	2+	1.11	1	0 ~ 540	54	1.58 $\pm$ 1.14 <sup>a</sup>
							2	540 ~ 1950	141	4.13 $\pm$ 1.67 <sup>b</sup>
		jjce05	33.7	183.43	2+	1.13	1	0 ~ 810	81	1.48 $\pm$ 0.64 <sup>a</sup>
							2	810 ~ 2160	135	4.20 $\pm$ 1.06 <sup>b</sup>
		jjce06	30.3	133.93	2+	1.11	1	0 ~ 700	70	2.51 $\pm$ 0.48 <sup>c</sup>
							2	700 ~ 2070	137	3.11 $\pm$ 0.90 <sup>b</sup>
jjce07		30.0	94.93	2+	1.13	1	0 ~ 920	92	1.49 $\pm$ 0.57 <sup>a</sup>	
						2	920 ~ 2070	115	4.24 $\pm$ 1.26 <sup>b</sup>	
jjce08		30.1	99.78	2+	1.11	1	0 ~ 560	56	1.24 $\pm$ 0.66 <sup>a</sup>	
						2	560 ~ 1770	121	3.53 $\pm$ 1.03 <sup>b</sup>	
长颌鲢 (2014 年)		14jjce11	27.0	82.78	2+	1.13	1	0 ~ 1400	140	1.72 $\pm$ 0.54 <sup>a</sup>
	2						1400 ~ 1610	19	3.89 $\pm$ 0.65 <sup>b</sup>	
	3						1610 ~ 1940	33	1.87 $\pm$ 0.75 <sup>a</sup>	
	14jjce12	24.6	65.83	2+	1.18	1	0 ~ 910	91	1.62 $\pm$ 0.78 <sup>a</sup>	
						2	910 ~ 1770	86	4.50 $\pm$ 0.95 <sup>b</sup>	
	14jjce13	24.3	63.05	2+	1.11	1	0 ~ 950	95	1.75 $\pm$ 0.87 <sup>a</sup>	
						2	950 ~ 2000	105	5.85 $\pm$ 1.80 <sup>b</sup>	
	14jjce15	31.3	147.04	2+	1.10	1	0 ~ 530	53	1.61 $\pm$ 0.51 <sup>a</sup>	
						2	530 ~ 870	34	3.51 $\pm$ 0.54 <sup>b</sup>	
						3	870 ~ 950	8	2.27 $\pm$ 0.63 <sup>c</sup>	
4						950 ~ 1150	20	3.39 $\pm$ 0.60 <sup>b</sup>		
5						1150 ~ 1490	34	2.41 $\pm$ 0.85 <sup>c</sup>		
14jjce16	7.7	113.61	2+	1.03	1	0 ~ 690	69	1.69 $\pm$ 1.58 <sup>a</sup>		
					2	690 ~ 1510	82	6.00 $\pm$ 2.23 <sup>b</sup>		
14jjce17	27.4	92.49	2+	1.11	1	0 ~ 1130	113	2.11 $\pm$ 0.94 <sup>a</sup>		
					2	1130 ~ 1940	81	4.63 $\pm$ 1.79 <sup>b</sup>		
14jjce18	25.1	73.91	2+	1.09	1	0 ~ 950	95	1.48 $\pm$ 1.28 <sup>a</sup>		
					2	950 ~ 1830	88	3.95 $\pm$ 1.30 <sup>b</sup>		
14jjce19	25.7	71.89	2+	1.25	1	0 ~ 910	91	1.29 $\pm$ 0.81 <sup>a</sup>		
					2	910 ~ 1860	95	3.68 $\pm$ 0.98 <sup>b</sup>		
					3	1860 ~ 2110	25	2.88 $\pm$ 0.76 <sup>c</sup>		
14jjce20	27.7	110.03	2+	1.16	1	0 ~ 920	92	1.66 $\pm$ 0.76 <sup>a</sup>		
					2	920 ~ 1730	81	6.79 $\pm$ 1.13 <sup>b</sup>		

\* 同一样本中不同字母代表差异显著,  $P < 0.05$ , Mann-Whitney  $U$ -test.

与短颌鲢耳石的 Sr/Ca 结果不同,靖江段所采长颌鲢耳石的 Sr/Ca 大致可分为 2~3 个阶段 ( $P < 0.05$ , Mann-Whitney  $U$ -test) (表 1)。个体 jjce02、jjce04、jjce06、jjce07、jjce08 与 14jjce12、14jjce13、14jjce16、14jjce17、14jjce18、14jjce20 从耳石核心到边缘的 Sr/Ca 可以分为第 1 阶段 ( $Sr/Ca < 3$ , 蓝色同心环区域, 对应于低 Sr 淡水生境) 和第 2 阶段 ( $3 < Sr/Ca < 7$ , 黄绿色同心环区域, 对应于 Sr 较高的河口半咸水生境) (图 1)。所有这些个体应该均为首次参加溯河洄游的刀鲢个体。虽然报道称刀鲢在 1 龄时即可参与溯河洄游<sup>[2]</sup>, 但是本研究中这些个体在淡水孵化发育后入海, >2 龄才进行溯河生殖洄游。进长江前, 它们主要在河口附近盐度较高的水环境中栖息, 且捕获前刚回到淡水环境。个体 jjce05、14jjce11 和 14jjce19 的生境“履历”较复杂, 从耳石核心到边缘可以分为 3 个阶段, 即 Sr/Ca 从低到高又降低, 各部分的 Sr/Ca 平均值分别为  $1.50 \pm 0.68$  (对应蓝色同心环区域)、 $3.92 \pm 5.02$  (对应蓝绿同心环区域) 和  $2.42 \pm 1.74$  (对应蓝色同心环区域) (图 1), 这显示其亦在淡水孵化并生长后入海, 被采到前已溯河回淡水生活了一段时间。个体 14jjce15 的生境履历最为复杂, 其从核心到边缘甚至可以分为 5 个 Sr/Ca 阶段, 平均值依次为  $1.61 \pm 0.51$ 、 $3.51 \pm 0.54$ 、 $2.27 \pm 0.63$ 、 $3.39 \pm 0.60$  和  $2.41 \pm 0.85$ , 对应的 Sr 面分布图中亦可明显看出蓝色、蓝绿色、蓝色、蓝绿色及蓝色 5 个变化阶段 (图 1)。虽然导致这种现象的原因尚不清楚, 但可能因为该个体在被捕获前已经经历了 1 次溯河生殖洄游, 且在第 2 次上溯过程中被捕获。袁传忠等<sup>[2]</sup>对长江中下游刀鲢研究发现, 有些刀鲢性成熟较早, 1 龄鱼即参加溯河生殖洄游。由此可见, 14jjce15 个体为 2 龄+并已依次相间地经历了淡水、河口、淡水、河口、淡水生境“履历”。结合其年轮情况, 分别对应于第 1 年轮前早期生活史阶段幼鱼的降海过程、第 1 年轮和第 2 年轮间成鱼的溯河洄游和降海过程以及第 2 年轮外的上溯过程。

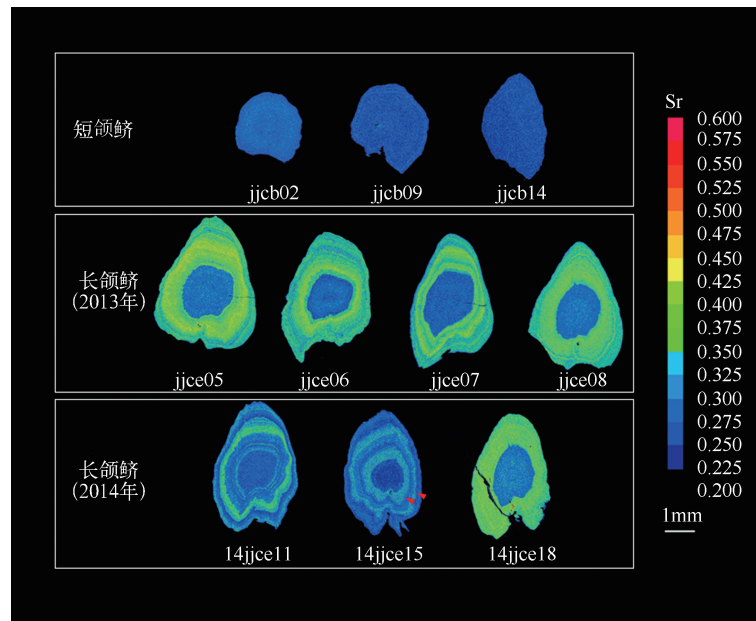


图 1 本研究中长颌鲢和短颌鲢耳石矢状面二维 Sr 含量的面分布 (样品 14jjce15 面分布结果上所标红色箭头对应年轮)

Fig.1 Two-dimensional imaging using mapping analysis of the Sr in otoliths of *C. nasus* and *C. Brachygnathus* in the present study (the red arrowheads on 14jjce15 showed the annuli)

虽然 2013 年和 2014 年所捕获的标本都有长颌鲢, 但这两批鱼耳石微化学也存在差异。2013 年刀鲢耳石的 Sr 含量区可分为两部分: 中心蓝区对应的 Sr/Ca 为  $2.12 \pm 0.83$ , 其它部分对应值为  $4.24 \pm 1.32$ ; 而 2014 年耳石的情况更复杂, 中心蓝区对应的 Sr/Ca 为  $1.71 \pm 0.93$ , 其它部分对应值为  $4.37 \pm 3.36$ 。两者耳石其它部分 Sr/Ca 差异明显 ( $P < 0.05$ ) (图 1)。这显示出 2014 年长颌鲢以及 2013 年长颌鲢有可能来自于两个生活史背景 (即溯河生境“履历”) 不同的资源群体。

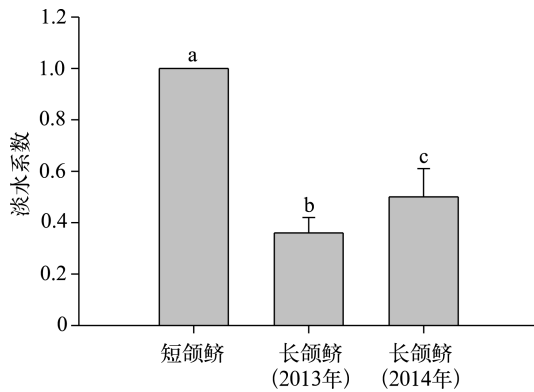


图2 短颌鲢与长颌鲢的淡水系数(不同字母代表差异极显著,  $P < 0.01$ , One-way ANOVA)

Fig.2 The freshwater coefficient of *C. nasus* and *C. brachygnathus* (those with different alphabet letters are significantly different at  $P < 0.01$ , One-way ANOVA)

为进一步探讨这个观点的合理性及讨论该水域不同刀鲚群体的洄游模式、早期淡水生境履历特征,笔者引入了淡水系数法来进行分析。Jiang等<sup>[22]</sup>基于对中国沿海刀鲚生活史的研究,提出了刀鲚耳石淡水系数( $F_c$ )的概念,对应于受精卵孵化到幼鱼入海过程淡水栖息时间的长短或早期生活史阶段中淡水生活史在整个生活史过程中所占的比例。本研究结果显示(图2),2014年长颌鲢( $0.50 \pm 0.11$ )与2013年长颌鲢( $0.36 \pm 0.06$ )的 $F_c$ 间存在极显著差异( $P < 0.01$ ),这反映出前者相关过程的持续时间要长于后者,可能与长江中前者所起源的出生地(亦对应于其亲鱼的产卵场)距长江江口的距离要远于后者有关。短颌鲢的 $F_c$ 均为1.00,这与其全生活史都在淡水环境中完成相符。本研究中长颌鲢与短颌鲢间 $F_c$ 的差异极显著( $P < 0.01$ ),这可充分对应于两者自然选择的溯河洄游、淡水定居的不同生活习性。

长颌鲢具有溯河洄游的习性,每年2—5月从海洋溯河洄游到长江<sup>[2]</sup>,有的甚至会洄游到距长江口约800 km<sup>[27]</sup>的鄱阳湖。本研究结果中Sr/Ca的显著变化正是这种溯河洄游的反映。然而,近年来靖江段长颌鲢的资源却在不断衰退,小型化和低龄化明显,繁殖群体中补充群体和低龄剩余群体比例增加<sup>[28]</sup>,再加上环境污染、水利工程等原因,上游的产卵场遭到破坏,洄游通道的功能也在丧失<sup>[4]</sup>。由此可见,加大保护靖江段作为刀鲚(长颌鲢)洄游通道的功能对整个长江刀鲚资源量将具有十分重要的意义。同时,由于刀鲚的长颌鲢、短颌鲢两种生态类型的经济价值截然不同,加强该江段刀鲚资源群中溯河洄游型、淡水定居型个体组成演替的监测,客观评价前者的可捕捞量,也将对有效管理和可持续利用江苏靖江江段宝贵的刀鲚资源起到极大的促进作用。

### 3 结论

- 1) 基于耳石微化学手段证实长江靖江段同时存在有淡水定居和溯河洄游的刀鲚个体。
- 2) 靖江段所研究刀鲚的长颌鲢个体表现为溯河洄游型,而短颌鲢个体表现为淡水定居型。此外,前者资源可能存在来自长江中不同产卵场个体起源的可能性。
- 3) 基于耳石微化学技术能够突破传统上利用上颌骨长短来判断淡水定居或溯河洄游刀鲚的局限,对采自靖江江段的长颌鲢和短颌鲢客观地进行生境履历重建。其结果对准确把握该江段淡水定居和溯河洄游刀鲚的资源组成,更好地保护靖江水域作为刀鲚的重要洄游通道的生态功能提供很好的理论支撑。

### 4 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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:自然科学版, 1980, 3: 67-77.
- [3] 陈卫境,顾树信. 长江靖江段刀鲚资源调查报告. 水产养殖, 2012, 33(7): 10-13.
- [4] 施炜纲,张敏莹,刘凯等. 水利工程对长江下游渔业的胁迫与补偿. 湖泊科学, 2009, 21(1): 10-20. DOI 10.18307/2009.0102.
- [5] 戴玉红,顾树信,郭弘艺等. 长江靖江段鱼类资源调查与开发. 水产养殖, 2013, 34(7): 28-33.
- [6] 陈校辉,边文冀,赵钦等. 长江江苏段鱼类种类组成和优势种研究. 长江流域资源与环境, 2007, 16(5): 571-577.
- [7] 孙莎莎. 最近10年长江靖江沿岸鱼类群聚特征的时间格局研究[学位论文]. 上海:上海海洋大学, 2013.

- [ 8 ] 刘 凯, 段金荣, 徐东坡等. 长江口刀鲢渔汛特征及捕捞量现状. 生态学杂志, 2012, **31**(12): 3138-3143.
- [ 9 ] 张敏莹, 徐东坡, 刘 凯等. 长江下游刀鲢生物学鲢最大持续产量研究. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(6): 694-699.
- [ 10 ] 周宗汉, 林金榜. 刀鲢和短颌鲢血清蛋白聚丙烯酰胺凝胶电泳的比较研究. 南京大学学报, 1985, **21**(1): 107-110.
- [ 11 ] 程起群. 中国鲢鱼的形态变异、遗传多样性及系统发育研究[学位论文]. 上海: 复旦大学, 2005.
- [ 12 ] 徐钢春, 顾若波, 刘洪波等. 长江短颌鲢耳石 Sr/Ca 值变化特征及其江海洄游履历. 水产学报, 2014, **38**(7): 37-41.
- [ 13 ] 沈林宏, 戴玉红, 顾树信等. 长江刀鲢幼鱼的采集与运输技术研究. 水产养殖, 2011, **32**(5): 4-6.
- [ 14 ] 陈锦涛, 戴小杰. 鱼类标记放流技术的研究现状. 上海水产大学学报, 2005, **14**(4): 451-456.
- [ 15 ] Campana S, Thorrold S. Otoliths, increments and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, **58**: 30-38.
- [ 16 ] 姜 涛, 周昕期, 刘洪波等. 鄱阳湖刀鲢耳石的两种微化学特征. 水产学报, 2013, **37**(2): 239-244.
- [ 17 ] Zhong L, Guo H, Shen H *et al.* Preliminary results of Sr: Ca ratios of *Coilia nasus* in otoliths by micro-PIXE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2007, **260**: 349-352
- [ 18 ] Liu H, Jiang T, Huang H *et al.* Estuarine dependency in *Collichthys lucidus* of the Yangtze River estuary as revealed by the environmental signature of otolith strontium and calcium. *Environment Biology of Fishes*, 2014, **98**(1): 165-172.
- [ 19 ] Katsumi T, Shun W, Mari K *et al.* Freshwater habitat use by a moray eel species, *Gymnothorax polyuranodon*, in Fiji shown by otolith microchemistry. *Environment Biology of Fishes*, 2014, **97**(12): 1377-1385.
- [ 20 ] 熊 瑛, 刘洪波, 刘培廷等. 基于耳石微化学的江苏吕泗近岸小黄鱼生境履历重建. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 836-842.
- [ 21 ] Tsukamoto K, Nakai I, Tesch W. Do all freshwater eels migrate? *Nature*, 1998, **12**: 635-636.
- [ 22 ] Jiang T, Liu H, Shen X *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.
- [ 23 ] Yang J, Arai T, Liu H *et al.* Reconstructing habitat use of *Coilia mystus* and *Coilia nasus* of the Yangtze River estuary, and of *Coilia nasus* of Taihu Lake, based on otolith strontium and calcium. *Journal of Fish Biology*, 2006, **69**(4): 1120-1135.
- [ 24 ] Jiang T, Yang J, Liu H *et al.* Life history of *Coilia nasus* from the Yellow Sea inferred from otolith Sr:Ca ration. *Environment Biology of Fishes*, 2012, **95**: 503-508.
- [ 25 ] Yang J, Jiang T, Liu H. Are there habitat salinity markers of Sr:Ca ratio in otolith of wild diadromous fishes? A literature survey. *Ichthyological Research*, 2011, **58**(3): 291-294.
- [ 26 ] Dou S, Yokouchi K, Yu X *et al.* The migratory history of anadromous and non-anadromous tapertail anchovy *Coilia nasus* in the Yangtze River Estuary revealed by the otolith Sr: Ca ratio. *Environmental Biology of Fishes*, 2012, **95**(4): 481-490.
- [ 27 ] 朱栋良. 长江刀鱼的天然繁殖胚胎发育观察. 水产科技情报, 1992, **19**(2): 49-51.
- [ 28 ] 董文霞, 唐文乔, 王 磊. 长江刀鲢繁殖群体的生长特性. 上海海洋大学学报, 2014, **9**(5): 669-675.