文章编号:1000-0615(2016)06-0882-11

DOI: 10.11964/jfc.20151010127

长江南京江段长颌鲚生境履历的反演

陈婷婷1, 姜 涛2, 李孟孟1, 刘洪波2, 杨 健1,2*

(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,中国水产科学研究院长江中下游渔业生态环境评价和资源养护重点实验室,江苏无锡 214081)

摘要:利用电子探针显微分析技术(EPMA),对2009年和2014年采自长江南京段的长颌鲚 耳石微化学进行了研究,反演了其生境履历。结果显示,这些长颌鲚耳石上元素Sr/Ca值 的动态可分为两类。一类Sr/Ca值出现显著波动,不仅具有对应淡水生境的低值 (1.87±0.36),而且有对应于河口半咸水生境的较高值(4.80±0.80),甚至出现了外海高盐度 生境的高值(7.85±0.57),反映了溯河洄游的生境履历特征。另一类Sr/Ca值稳定3.0以下 (14NJC09和14NJCE10),仅反映出在淡水生境中生活的履历。上述结果均得到了耳石 Sr面分布的验证。上述"反演"的结果首次发现,传统上认为的一定是溯河洄游的长颌 鲚,也可能存在有淡水定居个体。单纯利用上颌骨的长短并不能作为有效判别长江刀鲚 资源群体中溯河洄游个体和淡水定居个体的标准。

关键词:长颌鲚;微化学;生境履历;洄游

中图分类号: S 931; S 917.4

近些年来,由于长江水质污染、生境退化等 原因,一些鱼类资源量急剧下降,有些甚至濒 于灭绝^[1-2],比如到20世纪90年代,长江鲥鱼 (Tenualosa reevesii)已不再形成渔汛,而且一些个 体体内的重金属严重超标¹³。目前,刀鲚(Coilia nasus) 也面临与鲥鱼相似的困境。作为曾经长江流域 重要的渔获物之一,20世纪60年代刀鲚的最高产 量可达390t; 而进入90年代, 资源开始出现急剧 衰退^[4]。2001—2009年刀鲚的汛期捕捞产量均值 仅为86.2 t, 而随后的2011年和2012年的产量更是 持续下滑^[5]。这对长江的刀鲚资源保护和可持续 利用提出了很大的挑战。更需注意的是,刀鲚 作为一种溯河洄游性鱼类,由于其复杂的生境 履历和多种生态类型群体混栖的现象,又使相 关的调查和保护工作很难有效开展。传统上认 为长江刀鲚具有2个生态类型,一类为淡水定居 型,包括短颌鲚(曾被命名为C. brachygnathus) 和湖鲚(曾被命名为C. nasus taihuensis),前者上

文献标志码:A

颌骨长度短于头长;另一类为溯河洄游型,即 长颌鲚(使用刀鲚学名C. nasus)^[6-7],其上颌骨长度 长于头长。然而,近年来随着耳石微化学的应 用,已经在靖江段发现了溯河洄游型的短颌 鲚,否定了短颌鲚不洄游的传统观点^[8]。因此, 基于传统研究形态学经验(如上颌骨长度)来判断 刀鲚是否洄游存在着很大的局限性,而利用耳 石微化学等新的方法应该可以更客观地揭示刀 鲚(包括长颌鲚、短颌鲚、湖鲚)的生境履历、洄 游规律和群体组成等科学问题。

鱼类耳石微化学分析是一种能通过分析鱼类 特定生活史阶段生境中的元素指纹特征,从而 "反演"洄游性鱼类生境履历的重要研究手段;尤 其是可以根据耳石中的Sr、Ca元素沉积情况有效 重建不同盐度水体的生境状况^[9-13]。由于耳石元 素指纹具有与生境盐度相关的特点,所以在仅 有1尾鱼样本的情况下也能有效了解其生活履历^[11]。 耳石中的Sr、Ca元素之所以可以用作研究手段,

收稿日期: 2015-10-22 修回日期: 2016-03-23

资助项目:国家自然科学基金(31372533);江苏省科技项目(自然科学基金)(BK20131089) 通信作者:杨健,E-mail:jiany@ffrc.cn

是因为自然界水体中Sr、Ca的含量与分布方式通 常存在显著差异(含量在淡水区低、河口区中 等、海水区高)^[14]。沉积在耳石中的Sr含量水平 可以标记鱼类生活迁移过程中所经历的不同盐 度水体特征。因此,耳石Sr/Ca值及Sr含量通常 被作为用于洄游鱼类生态学研究的重要微化学 "指纹"。在众多Sr/Ca值的测定方法中(如PIXE^[15], LA-ICPMS^[16]和 EPMA^[14]分析), 基于EPMA的耳 石微化学分析,由于其既可连续、精确地进行Sr/Ca 值定量线分析,又可直观、可视地进行Sr含量的 面分布分析,因此在重建洄游性鱼类或河口性 鱼类生活史和环境史方面具有较为广泛的应用^[17-19]。 Yang等^[14]研究凤鲚、长江口刀鲚和太湖湖鲚的生 活史发现,长江口刀鲚耳石对应淡水、咸水生 境的Sr/Ca值高低差异显著,这与陆封型太湖湖 鲚持续低值的现象不同;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。另外, Jiang等^[18]通过微化学结合耳石年轮的 研究,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,还发现不 同地区捕获的刀鲚的生境履历分析存在差异。 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[20]。

基于上述工作基础,本实验对采自长江南京 江段长颌鲚个体进行了耳石微化学测定,对经 过该水域不同年际间长颌鲚群体的洄游模式和 生境履历进行比较分析,以期在了解长江南京 江段长颌鲚是否一定是溯河洄游个体的基础上, 准确把握其洄游规律、生境需求的同时,进一 步验证通过上颌骨长度来判别刀鲚洄游与否的 有效性,从而为客观评价南京江段刀鲚资源的 组成和经济价值提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用长颌鲚分别于2009年5月4日(共8尾) 和2014年5月9日(共10尾)捕自南京长江大桥附近 水域。所有样本的上颌骨长大于头长。对鱼体 进行了全长、体质量、上颌骨长、头长(从吻端 到鳃盖裂边缘的长度)等数据的测量(表1)。所有 鱼体标本经测量称重后取出矢耳石(以下简称耳 石),耳石用去离子水清洗,晾干,备用。

1.2 研究方法

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Discoplane-TS碾磨机 碾磨(第一阶段用700目金刚砂轮粗磨,第二阶段 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¹¹²¹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,2.0×10⁻⁸ A,束斑 直径为5 μm,每点驻留时间为15 s,以10 μm为间 隔连续打点测定。标准样品取用碳酸钙(CaCO₃) 和钛酸锶(SrTiO₃)。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,5.0×10⁻⁷ A,束斑直径为5 μm,像素为7× 7 μm,每点驻留时间为30 ms。下文中所出现的 "Sr/Ca值"均按惯例使用耳石中锶元素浓度与钙 浓度的比乘以10³的标准化值(即"Sr/Ca×1000")。

所有耳石样品在EPMA分析结束后重新抛光 去除表面的碳膜,并使用5% EDTA酸蚀10 s,至 耳石年轮清晰后读取年龄。

1.3 数据分析

数据使用Excel 2010进行数据计算和分析。 引入基于顺序F检验的循环算法,按照截断长度 为10依据,Huber权重为1依据,置信度P为0.1绘 制耳石Sr/Ca值格局转变曲线^[21]。使用SPSS 19.0 进行非参数检验(Mann-Whitney U-test)。

2 结果

2.1 耳石定量线分析

2009年长领鲚的耳石 通过读取耳石上的 年轮可知,2009年所捕获的8尾样本年龄均为2龄。 根据定量线分析的耳石锶钙比值结果(图2),可 以将所有样品分为两类。第一类耳石样品Sr/Ca 值波动分为2个阶段,包括09NJCE02、09NJCE03、 09NJCE05、09NJCE08和09NJCE11。其在核心至 表1 刀鲚的采样资料

Tab. 1 Sampling details of C. nasus							
标本	采样时间	采样地点	全长/cm	体质量/g	年龄*	上颌骨长/mm	上颌骨长/头长
sample	date	sampling site	total length	body weight	age	upper jaw length	upperjaw length/ head length
09NJCE01	2009/5/4	南京江段	24.90	47.30	2	42.49	1.22
09NJCE02	2009/5/4	南京江段	25.20	37.71	2	38.95	1.09
09NJCE03	2009/5/4	南京江段	24.00	35.84	2	37.78	1.13
09NJCE05	2009/5/4	南京江段	20.90	23.66	2	36.43	1.23
09NJCE07	2009/5/4	南京江段	22.40	28.04	2	37.57	1.14
09NJCE08	2009/5/4	南京江段	27.20	47.88	2	45.53	1.17
09NJCE11	2009/5/4	南京江段	17.60	10.29	2	31.31	1.17
09NJCE13	2009/5/4	南京江段	22.00	22.80	2	36.66	1.20
14NJCE01	2014/5/9	南京江段	23.00	36.14	2	38.77	1.17
14NJCE02	2014/5/9	南京江段	24.70	36.11	2	37.11	1.09
14NJCE03	2014/5/9	南京江段	25.50	35.84	2	43.27	1.21
14NJCE04	2014/5/9	南京江段	21.60	25.84	2	34.19	1.15
14NJCE05	2014/5/9	南京江段	23.10	31.18	2	35.63	1.17
14NJCE06	2014/5/9	南京江段	22.60	32.85	2	37.00	1.18
14NJCE07	2014/5/9	南京江段	21.70	24.77	1	36.25	1.21
14NJCE08	2014/5/9	南京江段	14.10	6.03	1	22.53	1.11
14NJCE09	2014/5/9	南京江段	14.50	7.04	1	20.20	1.01
14NJCE10	2014/5/9	南京江段	12.20	5.24	1	21.23	1.08

注:*年龄根据耳石年轮来判定

Notes: The age determined by otolith annuli



Fig. 1 The long-jaw ecotype *C. nasus* in the present study (the length of upper jaw is longer than that of the head)

第1年轮形成之前(距核心740~1080 μm)的一段耳 石径上的Sr/Ca值均在3.0以下(最小值1.43±0.51,

最大值2.23±0.83),此低值区为第一阶段(表2)。 随后,所有样品Sr/Ca值在第1年龄快结束时开始 升高并超过3.0, 其平均值稳定在某一高值(分别 为3.99±1.52、4.11±0.97、4.12±0.79、4.40±0.81、 4.81±1.39)至第2年龄结束,此高值区为第二阶段 (图2)。在第2年龄阶段Sr/Ca值变化呈现多样, 09NJCE02、09NJCE03和09NJCE11其Sr/Ca值先升 高后降低,09NJCE05和09NJCE08的Sr/Ca值变化 较为平稳(图2)。从第1年龄快结束至第2年龄为 高值区(4.29±0.33)。另一类样品其Sr/Ca值在高值 (第2年龄)阶段较前者复杂,虽均高于3.0,但是 又可以进一步分为若干个不同水平阶段,包括 09NJCE01、09NJCE07和09NJCE13。从表2可 知,09NJCE01耳石Sr/Ca值可分为3个阶段 $(1.91\pm0.99、3.74\pm1.85和6.05\pm0.92)$, 而 09NJCE07(1.66±0.53、4.86±1.28、7.85±0.54和 5.76±1.01)和09NJE13(1.92±1.02、4.17±1.07、



图 2 本研究长颌鲚耳石矢面Sr/Ca值变化分析

Fig. 2 Fluctuation of otolith Sr/Ca concentration ratios along line transects from the core (0 μm) to the edge in the sagittal plane of the otolith of the long-jaw ecotype *C. nasus* in the present study

The grey lines present the changes of the Sr/Ca ratios the otolith from core to the edge, and black lines represent the regime shifts of Sr/Ca ratio. The red dotted line sillustrate the position of annuli

样品编号	锶钙含量比显著变化阶段"	耳石径长/µm	元素测定点	Sr/Ca×1000
sample	fluctuation phases of otolith Sr/Ca concentration	distance from the core	detected points for element	
09NJCE01	1 ^a	0~1200	120	1.91±0.99
	2 ^b	1200~1480	28	3.74±1.58
	3 °	1480~1770	29	6.05±1.42
09NJCE02	1 ª	0~830	83	1.91±0.92
	2 ^b	830~1550	72	3.99±1.52
09NJCE03	1 ª	0~820	82	1.71±0.58
	2 ^b	820~1560	74	4.11±0.97
09NJCE05	1 ª	0~870	87	1.43±0.51
	2 ^b	870~1650	78	4.12±0.79

表 2	太研究刀鲚耳石中锶和钙的微化学变化
~~ <u></u>	

				・续表2・	
样品编号	锶钙含量比显著变化阶段 ¹⁾	耳石径长/µm	元素测定点		
sample	fluctuation phases of otolith Sr/Ca concentration	distance from the core	detected points for element	Sr/Ca×1000	
	1 ª	0~1080	108	1.66±0.53	
	2 ^b	1080~1450	37	4.86±1.28	
09NJCE07	3 °	1450~1520	7	7.85±0.54	
	4 ^b	1520~1850	33	5.76±1.01	
	1 ^a	0~1080	108	1.83±0.72	
09NJCE08	2 ^b	1080~2260	118	4.40±0.81	
	1 ^a	0~910	91	2.23±0.83	
09NJCE11	2 ^b	910~1550	64	4.81±1.39	
	1 ^a	0~700	70	1.92±1.02	
	2 ^b	700~1000	30	4.17±1.07	
09NJCE13	3 °	1000~1180	18	6.33±1.32	
	4 ^b	1180~1500	32	3.42±1.36	
	1 ^a	0~870	87	1.34±0.54	
14NJCE01	2 ^b	870~1560	69	4.59±0.89	
	1 ^a	0~860	86	1.50±0.43	
14NJCE02	2 ^b	860~1570	71	4.86±0.75	
	3 °	1570~1630	6	2.26±0.48	
	1 ^a	0~760	76	1.33±0.55	
14NJCE03	2 ^b	760~1830	107	4.64±0.85	
	1 ^a	0~730	73	2.20±0.87	
14NJCE04	2 ^b	730~1530	80	4.36±1.21	
	1 ^a	0~910	91	1.98±0.89	
14NJCE05	2 ^b	910~1640	73	5.03±1.21	
	1 ^a	0~890	89	1.93±0.90	
14NJCE06	2 ^b	890~1710	82	5.54±1.14	
	3 °	1710~1730	2	1.88±0.90	
	1 ^a	0~770	77	1.84±0.76	
14NJCE07	2 ^b	770~1460	69	4.72±1.53	
	1 ^a	0~600	60	1.86±0.59	
	2 ^b	600~810	21	5.37±1.06	
14NJCE08	3 °	810~900	9	4.39±0.44	
	4 ^b	900~1360	46	5.52±1.13	
	5 ^a	1360~1400	4	2.79±0.87	
14NJCE09	1	0~1500	150	1.54±1.12	
14NJCE10	1	0~1270	127	0.61±1.04	

注: 1)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)

Notes: 1)Phases in one otolith sample having the same letter indicate not significant differences (P>0.05); whereas different letters indicate significant differences (P<0.05)

6.33±1.32和3.42±1.36)Sr/Ca值有4个阶段。

2014年长颌鲚的耳石 同样通过读取耳石 上的年轮可知, 2014年所捕获的长颌鲚标本中 2龄6尾、1龄4尾。根据定量线分析结果, 2014年 共捕获的10尾长颌鲚耳石Sr/Ca值波动类型除了 与2009年长颌鲚样品一样有明显高值区的2种类 型外,还存在另一种全低值的类型。其中,第 一类除14NJCE07为1龄外,14NJCE01、 14NJCE03、14NJCE04和14NJCE05均为2龄(图 2), 所有这些个体的Sr/Ca值波动分为2个阶段, 即第一阶段的稳定低值(1.74±0.39)和第二阶段的 稳定高值(4.67±0.24)(表2)。第1年龄期间,所有 个体经过一段长度的低Sr/Ca值(1.74±0.39),并在 快结束时突然升高至3.0以上。在随后的第2年龄 期间,14NJCE01和14NJCE05处于缓慢升高态 势:与之相比14NJCE03和14NJCE04的Sr/Ca值先 升高后降低(图2)。第二类Sr/Ca值波动复杂。 14NJCE02 (1.93±0.90、5.54±1.14和1.88±0.90)和 14NJCE06 (1.50±0.43、4.86±0.75和2.26±0.48)在第 1年龄阶段维持一段时间的低Sr/Ca值,靠近第 1年轮时值升高。第2年龄阶段,二者的Sr/Ca值 平稳很长一段后下降至低Sr/Ca值。14NJCE08分 为5个阶段,即1.86±0.59、5.57±1.06、4.39±1.02、 5.52±1.13和2.79±0.87,反映其在第1年龄阶段从 低到高降低又升高。以上2类除了有区分明显的 低值区(Sr/Ca值<3)和高值区(Sr/Ca值>3)外,所有 样品与2009年长颌鲚样品一样均在第1年龄快结 束时Sr/Ca值突然上升并超过3.0。与以上2类相比,2014年中还存在Sr/Ca值直至第1年龄结束始 终稳定在3.0以下(14NJCE09和14NJCE10)的第三 类全低值样品(表2)。

2.2 耳石Sr含量的面分析

个体09NJCE03面分析图可分为两部分,一 部分为中心蓝区(1.71±0.58),另一部分为外围的 蓝绿色区域(4.11±0.97),与定量分析中第一阶段 低Sr/Ca、第二阶段高Sr/Ca值相一致(图3)。样本 14NJCE08对应的Sr面分布图中可明显看出蓝色 (1.86±0.59)、绿色(5.37±1.06)、蓝绿色 (4.39±0.44)、绿色(5.52±1.13)及蓝绿色 (2.79±0.87)5个变化阶段(见图3),与多个阶段的 定量分析结果一致(表2)。14NJCE10整个耳石横 截面为蓝色区域,定量分析(0.61±1.04)也验证了 这一结果。

2.3 淡水系数F_C

Jiang等^[20]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的概念,便于分析不同刀鲚群体的洄游模式、早期淡水生境履历,即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(即淡水生境的依存程度)。本研究结果显示,2009年长颌鲚(0.54±0.07)与2014年溯河洄游型长颌鲚(0.49±



图 3 本研究溯河洄游型和淡水定居型长颌鲚耳石的典型Sr含量面分布图

Fig. 3 Typical maps of the Sr content in otoliths for the anadromous and freshwater resident long-jaw ecotype *C. nasus* in the present study

0.07)的*F*_C间差异不显著(*P*>0.05)。但是在2014年 采集到的样品中,14NJCE9和14NJCE102个样品 的*F*_C值为1.00,即整个生活史均在淡水环境中度 过,这与前面两者的值不同(*P*<0.05)。

3 讨论

在长江南京江段所捕获的18尾长颌鲚,其年 龄均达到1龄,有的甚至达到2龄。所有捕获的长 颌鲚耳石都有一个明显的蓝色核心区域,说明 所有这些个体都是在淡水中出生,并且早期淡 水生活史持续了相对较长的时间。在重建长江 靖江段长颌鲚的生境履历中发现,该江段的长 颌鲚耳石核心Sr/Ca值具有明显淡水生活的特征 (Sr/Ca值<3.0)^[22]。卢明杰等^[23]报道指出,在距离 长江口1000 km的鄱阳湖发现溯河洄游型长颌 鲚。这也说明长江长颌鲚在早期发育中需要淡 水环境。本实验中,除了2尾纯低值样品,其余 样品均在第一年轮形成前便进入了高值区,这 与在黄海河口发现鲚属鱼类在淡水环境中孵化 生长不足1龄时就会离开淡水进入高盐度水体生 活的结果相一致^[18]。有关鄱阳湖刀鲚的研究也发 现,多尾1龄长颌鲚的耳石Sr/Ca值存在明显的波 动,即出现低值(淡水生活特征)和高值(河口生活 的特征),从而证实鄱阳湖刀鲚参与江海洄游^[21]。 这也在一定程度上证实了刀鲚(长颌鲚)不足1龄 即参与洄游。此外需要注意的是,不同个体进 入高值区的时间也不一样,如09NJCE05在临近 第1年轮结束的时候才进入了高值区,而09NJCE02 则明显早得多。这一方面可能是刀鲚在仔稚鱼 阶段即进入河口碎波带(碎波带是波浪在海岸附 近发生破碎的区带[24])生长[25],容易受到河口半 咸水的影响;另一方面说明长颌鲚幼鱼在孵化 后离开孵化场并分批降河入海,这与袁传宓等^[26] 对调查长江中下游刀鲚的研究结果相一致,同 时也暗示了近些年在多种人类活动(水体污染, 生境破坏等)的影响下,长江流域内依旧幸存有 多个刀鲚产卵场的可能。耳石Sr/Ca高值区从第 1年轮近结束段一直到结束,变化类型主要有 2类:一类如09NJCE05和09NJCE08波动较为平 缓,说明其在降河后选择了盐度等因素相当稳 定的环境,形成一类群体;另一类如09NJCE07和 14NJCE07则波动明显,这与其活跃于不同盐度 的水体有关,进而形成与前者生活史不同的群体。

虽然本实验中长颌鲚溯河洄游个体表现出了多种生境履历。但根据淡水系数可知,两年间南京江段所捕获的长颌鲚淡水系数并没有显著性差异,说明其可能还是属同一个种群。对黄河、长江、舟山、瓯江水系刀鲚种群的研究发现,长江刀鲚的Fc值为0.48±0.16,而相邻的钱塘江刀鲚的Fc值仅为0.22±0.13^[20]。由此可见,本实验中南京江段长颌鲚个体更符合长江刀鲚群体的生活史特征,说明其应该是属于长江孵化起源的群体而非起源自钱塘江的群体。据此也可以推知,长颌鲚的洄游很有可能具有"母河回归性",即不同河流的刀鲚群体,其繁殖洄游时有可能会回到其孵化的河流。

以上分析表明,长江南京江段长颌鲚洄游履 历较为复杂,可以分为多种洄游类型。此外长 江中除了有溯河洄游型的长颌鲚外,还存在有 淡水定居型的短颌鲚群体,二者间十分相似, 对于其分类学上的关系仍有争议。传统研究中, 两者间以上颌骨的长度作为一个重要的判别指 标,即刀鲚的上颌骨长度长于头长,短颌鲚的 上颌骨长度一般短于头长;因此,溯河洄游型 刀鲚传统上被称为长颌鲚^[26-27]。本实验中的所采 样本的上颌骨长均长于头长,即传统意义上的 溯河洄游型刀鲚(即长颌鲚)。但是近年来,根据 耳石微化学的研究结果显示, 仅从上颌骨的特 征来鉴别所研究的是否为溯河洄游型还是淡水 定居型个体并不准确,所谓淡水定居型的短颌 鲚中已经被证实存在有溯河洄游型的个体^[8]。因 此,与之相对的在长江中传统认为的溯河洄游 型刀鲚(长颌鲚)中也可能存在有不洄游的淡水定 居型个体。本实验首次证实,南京江段所捕获 的长颌鲚中除了有典型的溯河洄游性个体,还 很有可能存在有生境履历为全淡水的个体(14NJCE09 和14NJCE10),其定量分析Sr/Ca值稳定在3.0以下, 相对应的面分析结果也表现为蓝色(14NJCE10), 这都显示了其为典型淡水定居型的特点。根据 以往的研究报道,长江刀鲚群体产卵时间在5月 下旬至10月上旬^[27],而溯河洄游的刀鲚个体被 发现会在不到1龄时降河入海[18]。本实验中其他 个体也表现出了在第1年龄结束前已经离开淡水 生境入海的特征。此外,与上述2尾纯淡水生境 履历个体在体长、体质量规格及上颌长/头长等 指标相似的个体14NJCE08已经表现出了十分明 显的洄游履历,因此可以基本排除以上2尾个体

尚未进行洄游的可能;故基于其纯淡水的生境 履历,该2尾个体极有可能不是还未入海的洄游 个体,而是纯淡水的个体。当然,对于该2尾长 颌鲚在1龄后是否仍有可能洄游至海水中生活, 还需要在今后的研究中于更多的江段,采集到 更大年龄的个体来进行确认。再有,由于尚未 有报道显示长江干流中存在有来自淡水湖泊(如 太湖)陆封型的湖鲚,根据姜涛等^[28]对刀鲚、凤 鲚和湖鲚耳石形态的比较研究结果可以发现, 该2尾个体耳石形态与湖鲚的不同,应属于淡水 定居型长颌鲚,而非湖鲚。这种淡水定居型长 颌鲚的现象表明,单纯利用上颌骨的长短并不 能作为有效判别长江中溯河洄游和淡水定居生 态型刀鲚的标准。

由于环境污染、酷渔滥捕等原因,导致刀鲚 的资源量不断减少,出现了小型化和低龄化。 1993—2002年长江下游刀鲚进行资源量调查发 现,所捕获的群体主要以2龄为主。3龄、4龄的 个体较少[29]。汛期刀鲚个体优势组体长明显下 降,趋于小型化;生殖群体年龄结构单一,低 龄化趋势明显,对其生物学产生了不利影响。 近几年,长江实行禁渔政策,在一定程度上改 善了刀鲚的资源补充。但是长江刀鲚的低龄 化、小型化的趋势依然明显。如本研究中的南 京江段两年标本情况,均为全长在25.5 cm以下 的1至2龄个体。同时2010—2012年长江口刀鲚 渔汛期及捕捞量的调查结果显示,长江口刀鲚 汛期捕捞量总体呈波动下滑趋势,且有加剧的 趋势^[5]。因此,对长江刀鲚资源的保护已经刻不 容缓。除此之外,本研究发现长江南京江段刀 鲚群体是由各自有着不同洄游履历的个体组 成,显示出群体组成(特别是溯河洄游和淡水定 居共栖群)的多样性。这也为长江刀鲚资源的合 理评估提供了新的借鉴并提出了新的要求。在 今后的相关研究中,除了在理论上进一步深入 探索长颌鲚两种生态型分化种群适应性(fitness) 机理的同时,在应用实践上既需要持续关注长 江刀鲚资源的总量变动趋势,也不能忽视对其 中经济价值截然不同的溯河洄游和淡水定居资 源量动态的合理调查和评估。

参考文献:

[1] 李宁,林红.长江南京江段水环境现状及其保护对策[J].长江工程技术职业技术学院学报,2005,22(3):7-8.

Li N, Lin H. Water environment status quo and protecting measures of Yangtze River Nanjing branch[J]. Journal of Changjiang Engineering Vocational College, 2005, 22(3): 7-8 (in Chinese).

 [2] 陈家长, 孙正中, 瞿建宏, 等. 长江下游重点江段水质 污染及对鱼类的毒性影响[J]. 水生生物学报, 2002, 26(6): 635-640.

Chen J C, Sun Z Z, Qu J H, *et al.* Water pollution and its toxicity to fishes in the major areas of the lower researches of the Yangtze River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, 26(6): 635-640 (in Chinese).

- [3] 邱顺林, 黄木桂, 陈大庆. 长江鲥鱼资源现状和衰退原因的研究[J]. 淡水渔业, 1998, 28(1): 18-21.
 Qiu S L, Huang M G, Chen D Q. Resource situation and failing reasons of Reeves shad (*Macrura reevesii*) in the Changjiang River[J]. Freshwater Fisheries, 1998, 28(1): 18-21 (in Chinese).
- [4] 田思泉,田芝清,高春霞,等.长江口刀鲚汛期特征及 其资源状况的年际变化分析[J].上海海洋大学学报, 2014,23(2):245-250.

Tian S Q, Tian Z Q, Gao C X, *et al*. Analyzing of annual changes for the stock status of *Coilia nasus* in fishing season in Yangtze River estuary[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(2): 245-250 (in Chinese).

- [5] 刘凯,段金荣,徐东坡,等.长江口刀鲚渔汛特征及捕捞量现状[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3138-3143.
 Liu K, Duan J R, Xu D P, *et al.* Present situation of *Coilia nasus* population features and yield in Yangtze River estuary waters in fishing season[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3138-3143 (in Chinese).
- [6] 许志强, 葛家春, 黄成, 等. 基于领骨长度和线粒体Cyt b序列变异探讨短颌鲚的分类地位[J]. 大连水产学院 学报, 2009, 24(3): 242-246.
 Xu Z Q, Ge J C, Huang C, et al. Taxonomy of short jaw tapertail anchovy Coilia brachygnathus by jaw length and mitochondrial Cytochrome b gene analysis[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(3): 242-246 (in Chinese).
- [7] 周晓犊. 中国鲚属鱼类物种有效性及刀鲚种群遗传结构研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
 Zhou X D. Study on species validities of Chinese Coilia and population genetic structure of Coilia nasus
 [D].Shanghai:Shanghai Ocean University, 2011 (in

Chinese).

[8] 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[J].水产学报,2014, 38(7):939-945.

> 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[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(7): 939-945 (in Chinese).

[9] 李辉华, 郭弘艺, 唐文乔, 等. 两种耳石分析法在鲚属
 种间和种群间识别效果的比较研究[J]. 淡水渔业,
 2013, 43(1): 14-18.

Li HH, Guo H Y, Tang W Q, *et al.* Comparative study of two otolith shape analysis for genus *Coilia* species and stocks identification[J]. Freshwater Fisheries, 2013, 43(1): 14-18 (in Chinese).

[10] 熊瑛,刘洪波,刘培廷,等.基于耳石元素微化学的江苏吕泗近岸小黄鱼生境履历重建[J].应用生态学报, 2014,25(3):836-842.

> Xiong Y, Liu H B, Liu PT, *et al.* Reconstructing habitat history of *Larimichthys polyactis* in Lüsi coastal waters of Jiangsu Province, China based on otolith microchemistry[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 836-842 (in Chinese).

- [11] 姜涛,周昕期,刘洪波,等. 鄱阳湖刀鲚耳石的两种微 化学特征[J]. 水产学报, 2013, 37(2): 239-244.
 Jiang T, Zhou X Q, Liu H B, *et al.* Two microchemistry patterns in otoliths of *Coilia nasus* from Poyang Lake, China[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(2): 239-244 (in Chinese).
- [12] Campana S E. Otolith science entering the 21stcentury[J]. Marine and Freshwater Research, 2005, 56(5): 485-495.
- [13] Secor D H. Is otolith science transformative? New views on fish migration[J]. Environmental Biology of Fishes, 2010, 89(3-4): 209-220.
- [14] Yang J, Arai T, Liu H, et al. Reconstructing habitat use of Coilia mystus and Coilia ectenes of the Yangtze River estuary, and of Coilia ectenes of Taihu Lake, based on otolith strontium and calcium[J]. Journal of Fish Biology, 2006, 69(4): 1120-1135.
- [15] Zhong L, Guo H, Shen H, *et al.* Preliminary results of Sr: Ca ratios of *Coilia nasus* in otolithsby micro-PIXE[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms,

2007, 260(1): 349-352.

- [16] 窦硕增, 天野洋典, 于鑫, 等. 基于多测点LA-ICPMS的 耳石核区元素指纹分析技术及其在鱼类群体识别中 的实证研究[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(6): 771-778.
 Dou S Z, Amano H, Yu X, *et al.* Multiple laser ablations on otolith nuclei for ICPMS to elementally fingerprint fish stocks: A case study[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(6): 771-778 (in Chinese).
- [17] Dou S Z, 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 otolithSr: Caratio[J]. Environmental Biology of Fishes, 2012, 95(4): 481-490.
- [18] Jiang T, Yang J, Liu H B, *et al.* Life history of *Coilia nasus* from the Yellow Sea inferred from otolith Sr: Ca ratios[J]. Environmental Biology of Fishes, 2012, 95(4): 503-508.
- [19] 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.
- [20] 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, Kyushu University, 2014, 59(2): 383-389.
- [21] 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[J].海洋渔业,2015,37(4):310-317.

Lu M J, Liu H B, Jiang T, *et al.* Preliminary investigations on otolith microchemistry of *Odontamblyopus rubicundus* in the Daliao River Estuary, China[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(4): 310-317 (in Chinese).

[22] 陈婷婷,姜涛,卢明杰,等.基于耳石微化学的长江靖 江段长颌鲚与短颌鲚生境履历重建[J].湖泊科学, 2016,28(1):149-155.
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[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 149-155 (in Chinese).

[23] 卢明杰, 姜涛, 刘洪波, 等. 信江发现溯河洄游型刀鲚
 的实证研究[J]. 中国水产科学, 2015, 22(5): 978-985.
 Lu M J, Jiang T, Liu H B, *et al.* Existence of anadro-

mous Coilia nasus in Xinjiang River of Jiangxi Province

as determined by otolith microchemistry[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(5): 978-985 (in Chinese).

- [24] 唐逸民. 海洋学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.
 Tang Y M. Oceanography[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1983 (in Chinese).
- [25] 葛珂珂, 钟俊生, 吴美琴, 等. 长江口沿岸碎波带刀鲚 仔稚鱼的数量分布[J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 923-930.

Ge K K, Zhong J S, Wu M Q, *et al.* Distribution and abundance of larval Japanese grenadier anchovy *Coilia nasus* in the surf zone of the Yangtze River estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(6): 923-930 (in Chinese).

[26] 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[J].南京大学学报(自然科学版),1980(3):67-82.

Yuan C M, Qin A Q, Liu R H, *et al.* On the classification of the anchovies, *Coilia*, from the lower Yangtze River and the southeast coast of China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1980(3): 67-82 (in Chinese).

- [27] 许志强, 葛家春, 李跃华, 等. 非洄游季节长江2个江段 鲚属鱼类资源调查[J]. 水产养殖, 2015, 36(7): 10-14. Xu ZQ, Ge J C, Li Y H, *et al.* A resource investigation on the fish of genus *Coilia* in the two reaches of the Yangtze River during the non-migratory seasons[J]. Journal of Aquaculture, 2015, 36(7): 10-14 (in Chinese).
- [28] 姜涛,杨健,刘洪波,等.刀鲚、风鲚和湖鲚矢耳石的 形态学比较研究[J].海洋科学,2011,35(3):23-31. Jiang T, Yang J, Liu H B, *et al.* Comparative study of the morphology of sagittal otolith in *Coilia nasus*, *Coilia mystus* and *Coilia nasus taihuensis* [J]. Marine Sciences, 2011, 35(3): 23-31 (in Chinese).
- [29] 张敏莹,徐东坡,刘凯,等.长江下游刀鲚生物学及最 大持续产量研究[J].长江流域资源与环境,2005, 14(6):694-698.

Zhang M Y, Xu D P, Liu K, *et al.* Studies on biological characteristics and change of resource of *Coilia nasus* Schlegel in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(6): 694-698 (in Chinese).

Inversion of habitat history for the long-jaw ecotype *Coilia nasus* collected from Nanjing section of the Yangtze River

CHEN Tingting¹, JIANG Tao², LI Mengmeng¹, LIU Hongbo², YANG Jian^{1, 2*}

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;

2. 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 Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: The estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* is a highly valued fish in the Yangtze River, however, its resources have drastically declined due to anthropogenic impacts, e.g., overfishing, habitat degradation, water pollution. This small anchovy has been recently proposed for listing as a Class II protected species by the plan for adjustment on China's List of Wildlife under Special State Protection. The long-jaw (supermaxilla) estuarine tapertail anchovy is believed to be an anadromous ecotype of C. nasus with a length ratio of upperjaw to head>1. Anadromous C. nasus has much higher commercial value than that of another freshwater residen tecotype of this species with a length ratio of upper jaw to head < 1. In order to understand the migration characteristics of the longjaw C. nasus, an electronic probe microanalyzer (EPMA) was applied to analyze the microchemistry patterns of element Sr and Ca in otoliths of ten C. nasus of this ecotype collected form Nanjing section of the Yangtze River in 2009 and 2014. The results of line transect analyses showed that the Sr:Ca ratio (i.e., $Sr/Ca \times 10^3$) in the otolith of the anchovies could be divided into two patterns: (1) Sr/Ca ratio fluctuated between low (<3.0) and high (>3.0) phases in the otolith, suggesting the individuals were typical anadromous ecotype which experienced not only the freshwater, but also the brackish water, even the sea water habitats at different stages in their life history. 2 Sr/Ca ratio was consistently at low phase (≤ 3.0) throughout the otolith, indicating that the individuals only experienced freshwater habitat during its whole life history. These evidences were supported by the Sr mapping analyses of EPMA. The results showed, for the first time, that the habitat use of long-jaw grenadier anchovy was much more flexible, and furthermore, freshwater resident individual could even be found in long-jaw grenadier anchovies, although it is traditionally believed that every individual of long-jaw C. nasus in the Yangtze River is diadromous ecotype. Therefore, anadromous and freshwater resident C. nasus cannot be effectively distinguished only by the length ratio of upper jaw to head. However, otolith microchemistry analysis can provide an objective approach to solve successfully this problem of C. nasus fishery management.

Key words: Coilia nasus; microchemistry; habitat history; migration

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

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31372533); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20131089).