

鄱阳湖刀鲚耳石的两种微化学特征

姜 涛¹, 周昕期², 刘洪波³, 刘焕章⁴, 杨 健^{1,3*}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 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,

中国水产科学研究院内陆渔业生态环境与资源重点开放实验室, 江苏 无锡 214081;

4. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为确认鄱阳湖中是否仍存在有溯河洄游的刀鲚个体, 利用 X 射线电子探针微区分析技术(EPMA)研究了采自鄱阳湖星子县水域 2 尾刀鲚个体耳石的锶和钙微化学特征。定量线分析结果显示, 上颌骨较短个体(PYCB02)的耳石锶钙比值(即 Sr/Ca × 1 000)为稳定的低值(1.66 ± 0.54), 反映了其淡水定居的生活习性; 而上颌骨较长个体(PYCE05)的锶钙比值波动显著, 不仅具有对应淡水生活的低值(1.82 ± 0.50), 而且出现了对应于海水生活的高值(5.79 ± 0.91), 显示出其溯河洄游的“履历”。这些结果更得到了耳石元素面分布分析结果的支持。这两种截然不同的耳石微化学特征类型首次直观地反映和证实了目前距长江河口约 800 km 的鄱阳湖中同时存在有溯河洄游和淡水定居的两类刀鲚个体。

关键词: 刀鲚; 耳石; 电子探针; 鄱阳湖

中图分类号: Q 176; S 917.4

文献标志码: A

鄱阳湖为我国第一大淡水湖泊, 其通江口位于长江中下游分界处, 据长江口约 800 km。历史上这里曾是包括刀鲚(*Coilia nasus*)等许多洄游性鱼类的栖息地。目前由于栖息地恶化^[1], 鄱阳湖渔业资源急剧衰减^[2], 小型化、低龄化日趋明显^[3]。刀鲚是一种溯河洄游性鱼类, 每年春季亲鱼自海区进入河口沿长江上溯至平缓的河流或者湖泊产卵, 最远甚至可上溯至洞庭湖一带^[4]。洞庭湖与鄱阳湖等通江湖泊曾为刀鲚较为集中的产卵场^[5]。近年来, 由于水质污染、酷渔滥捕和水利工程等原因, 溯河刀鲚群体被认为仅可能洄游至安徽江段, 很难再上溯进入洞庭湖、鄱阳湖等水域^[6-8]。而鄱阳湖中的刀鲚可能仅为淡水定居的群体, 或被认为是短颌鲚(*Coilia brachygnathus*)^[9]。需要注意的是, 后者的分类地位尚存争议, 其形态、产卵期和仔稚鱼出现的时期和刀鲚相近^[4,10], 基于线粒体 CO I 基因条形码的

结果显示短颌鲚与刀鲚可能是同种^[11]。溯河洄游与淡水定居的刀鲚应有截然不同的生活史生境“履历”, 但这种“履历”很难用形态学、分子生物学等手段来破译、判别和表现; 因此, 至今尚无法解决目前鄱阳湖中的刀鲚到底是淡水定居、还是海淡水洄游, 或者是两者皆有的资源学难题。

鱼类耳石元素微化学是极具针对性研究和重建洄游性鱼类生境“履历”的重要方法。其中耳石中锶、钙元素沉积情况的变化常被用来作为反演不同盐度海淡水生境条件的“指纹”^[12-18]。由于研究结果独特的生境相关性及其客观性的优势, 即使仅有 1 至数尾样本鱼个体, 也能有效把握生活史生境“履历”。长江口鲮(*Mugil cephalus*)^[12]、九段沙和靖江水域刀鲚^[19]、日本褐鲟(*Salmo trutta*)^[20]等研究上均有成功的实例。笔者实验室曾就长江口洄游性刀鲚、太湖湖鲚(陆封性刀鲚)进行过耳石元素微化学研究, 并建立了重建其海水、河口半咸水、淡

收稿日期:2012-05-04 修回日期:2012-11-26

资助项目:国家自然科学基金项目(30871920);中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2012A0201)

通信作者:杨 健, E-mail: jiany@ffrc.cn

水生境“履历”的耳石锶钙比(即 $\text{Sr}/\text{Ca} \times 1\ 000$)标准和锶分布图像类型^[21]。以此为基础,本研究首次对鄱阳湖所捕刀鲚开展耳石元素微化学研究,并尝试直观而确切地判别目前鄱阳湖中的刀鲚到底属于溯河洄游还是淡水定居的个体,以期为有效评价和保护鄱阳湖刀鲚资源以及湖区合理的开发利用提供重要的基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

样本鱼采自江西省鄱阳湖星子县水域。由于刀鲚和短颌鲚是否为一种尚无定论,故本实验中仍采用两者为一种(即刀鲚)的观点,但仍参考上颌骨的长度及是否过鳃盖骨等特征将所获刀鲚样本分为上颌骨较长及较短的2类,并从中分别选取了长度差异极显著的各1尾鱼开展研究。个体PYCE05(上颌骨长:4.8 cm,上颌骨长/头长:1.2)和PYCB02(上颌骨长:2.9 cm,上颌骨长/头长:0.9)分别于2011年6月和2010年8月取自上述水域。其体长分别32.0 cm和24.3 cm,体质量分别为117.2 g和26.7 g。解剖后取出矢耳石,去离子水清洗后,室温下干燥待用。

元素微化学分析统一选用左矢耳石(以下简称耳石)为对象。耳石样品使用环氧树脂(Epofix;丹麦 Struers 公司)包埋固定后,用500目砂纸粗磨,1 200目砂纸精磨至核心将要暴露。换用装有机织布抛光盘的磨抛机(Roto Pol-35,丹麦 Struers 公

司)配合抛光液抛光至核心完全暴露且表面无明显刮痕。将处理完的包有耳石的树脂块放入MQ水中超声清洗5 min,然后自然晾干24 h。待完全晾干后,将样品置于真空镀膜机(JEE-420,日本电子株式会社)中蒸镀碳膜(36A,25S)。

1.2 耳石微化学分析

参考 Yang 等^[21]、杨健等^[12]的方法,使用X射线电子探针微区分析仪(JXA-8100型 EPMA,日本电子株式会社)分析耳石样品。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(CaCO_3)和钛酸锶(SrTiO_3)。定量线分析完后,再对耳石样品进行面分布分析。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 $7 \times 7 \mu\text{m}$,每点驻留时间为30 ms。

1.3 数据处理

数据使用 Excel 2007 和 SPASS 19.0 进行统计学计算和分析。

2 结果

鄱阳湖刀鲚个体PYCE05耳石Sr/Ca比值变化复杂,从核心至边缘可见剧烈的低高数值的波动,个体PYCB02较为稳定,一直处于低Sr/Ca比值水平(共202个测定点)(图1)。通过分析和比

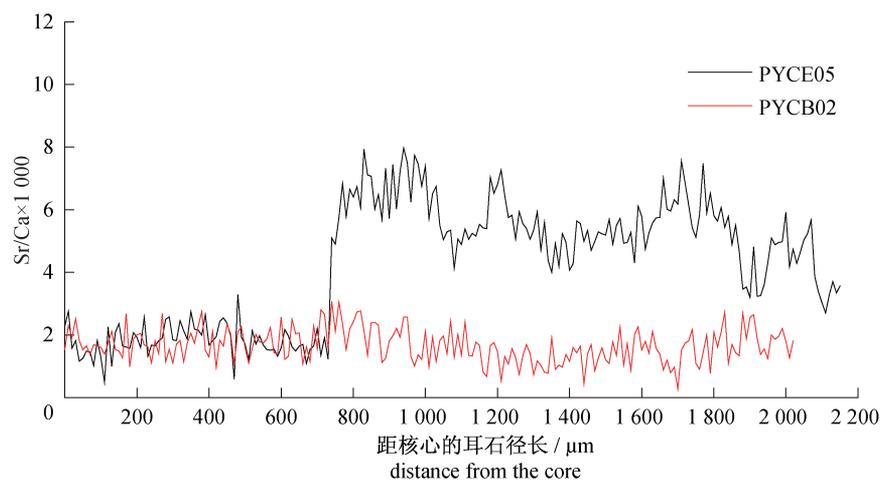


图1 沿刀鲚个体PYCE05和PYCB02的耳石矢状面从核心(0 μm)到边缘定量线分析记录到的Sr/Ca比值变化

Fig.1 Fluctuation of otolith Sr/Ca concentration ratios along line transects from the core (0 μm) to the edge in otoliths of two estuarine tapertail anchovies *C. nasus* (PYCB02 and PYCE05) from Xingzi area in Poyang Lake, China

较, PYCE05 耳石整个 Sr/Ca 比值变化过程可以分为 3 个阶段, 第一阶段是从核心出发到距离核心 740 μm 处共 74 个测定点, 其 Sr/Ca 比值为 1.82 ± 0.50 ; 第二阶段是从距离核心 740 μm 至 1 870 μm 处共 113 个测定点, 其 Sr/Ca 比值为 5.79 ± 0.91 ; 第三阶段是从距离核心 1 870 μm 处

至耳石边缘共 28 个测定点, 其 Sr/Ca 比值为 4.14 ± 0.88 ($P < 0.01$, Mann-Whitney U -test)。其中第一阶段的 Sr/Ca 比值和 PYCB02 的 Sr/Ca 比值 (1.66 ± 0.54) 虽然较为接近, 但是仍差异显著 ($P < 0.05$, Mann-Whitney U -test) (表 1)。

表 1 刀鲚个体 PYCE05 和 PYCB02 耳石中锶和钙的微化学变化

Tab. 1 Fluctuation of Sr and Ca microchemistry in otoliths of two estuarine tapertail anchovies *C. nasus* (PYCB02 and PYCE05) from Xingzi area in Poyang Lake, China

个体编号 individual code	锶钙含量比显著变化阶段 significant fluctuation phases of otolith Sr/Ca concentration ratio	耳石径长/ μm distance from the core	元素测定点数 detected points for element	Sr/Ca $\times 10^3$ (mean \pm SD)
PYCE05	1	0 ~ 740	74	1.82 ± 0.50
	2	740 ~ 1 870	113	5.79 ± 0.91
	3	1 870 ~ 2 150	28	4.14 ± 0.88
PYCB02	1	0 ~ 2 020	202	1.66 ± 0.54

PYCE05 和 PYCB02 的钙元素分布稳定呈现单一的黄色, 而锶元素分布差异很大 (图 2)。其中 PYCE05 从核心向外可以明显的分为三个区域, 分别是核心及其附近蓝色的低 Sr 值区, 较外围的 Sr 值较高的黄绿色甚至红色区, 以及耳石边缘的 Sr 值较低蓝绿色区。这种耳石上 Sr 分布分为三个区的现象与定量线分析 Sr/Ca 比值差异性的结果相印证。而 PYCB02 整个耳石呈现出与 PYCE05 核心区域较为相似的蓝色, 反映了其整个生活史过程均稳定地栖息于低 Sr 生境的情况。

3 讨论

耳石中元素锶和钙浓度比值的变化已经被广泛应用于鱼类生活史中生境“履历”的研究中^[13,15-16,22-24]。目前已有基于耳石元素分析刀鲚生活史的报道^[19,21], 说明利用这种方式研究刀鲚的生境“履历”是完全可行的。比较本实验室在刀鲚、凤鲚和湖鲚的研究工作^[21]中总结的 Sr/Ca 比值和不同盐度水体的判别标准可以发现, 个体 PYCB02 和湖鲚情况类似, 在 Sr/Ca 比值上表现为持续的低值 (Sr/Ca 比值小于 3), 其面分布结果也同样显示了较为单一的蓝色 (图 2)。说明 PYCB02 为类似湖鲚的纯淡水生活的个体。

与个体 PYCB02 截然不同的是, 个体 PYCE05 耳石 Sr/Ca 比值波动较为复杂 (图 1), 从其面分布分析结果可以看到, 整个耳石从核心至边缘依次经历了蓝色、绿色甚至红色然后波动回黄色、绿色, 在较外缘处再一次上升至红色后回落至蓝色 (图 2)。其类型与湖鲚和短颌鲚的情况不同, 而与 Yang 等^[21]中所描述的洄游性刀鲚情况相一致, 均表现为孵化和早期生活都需要在淡水中完成 (第 1 阶段, Sr/Ca 比值小于 3, 图 2 所示核心处蓝色区), 待发育到一定程度后进入半咸水区域 (第 2 阶段, Sr/Ca 比值大于 3 小于 7, 图 2 中的绿色至黄色) 甚至是盐度较高的外海水域 (Sr/Ca 比值大于 7, 图 2 中的红色环) 进行越冬和肥育, 最后从外海回来并上溯至鄱阳湖 (第 3 阶

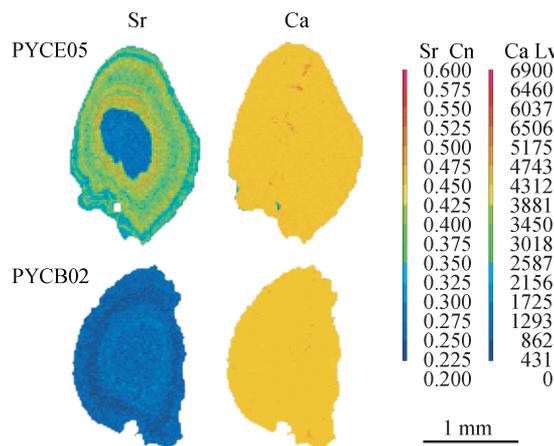


图 2 刀鲚个体 PYCE05 和 PYCB02 的耳石矢状面二维 Sr 和 Ca 含量的面分布

Fig. 2 Two-dimensional imaging using mapping analysis of the Sr and Ca in otoliths of two estuarine tapertail anchovies *C. nasus* (PYCB02 and PYCE05) from Xingzi area in Poyang Lake, China

段,图2中靠近耳石边缘处的蓝、绿色斑纹)。由此可见 PYCE05 反映出的是标准溯河洄游性刀鲚特征,在不同生理期需要不同的环境盐度。至此,本研究定量线分析和面分布分析结果首次直观地确认和证实了目前鄱阳湖中同时存在有淡水定居和溯河洄游的刀鲚个体。

考虑到鄱阳湖星子县水域离开长江口约 800 km,根据历史上有关鄱阳湖中分布有刀鲚产卵场的报导^[2-3],推测本研究中个体 PYCE05 很有可能是洄游产卵的亲鱼(该雌性个体卵巢可见清晰卵粒,目测为Ⅲ期至Ⅳ期雌鱼^[8]);这也显示出现今的鄱阳湖很有可能仍然为刀鲚的产卵场之一。刀鲚幼鱼早期生活史需要较长时间的一段纯淡水环境的生活史,这对于产浮性卵的刀鲚而言,选择一个离开河口高盐度环境的水域作为产卵场显得尤为重要,不然很有可能因为水流的关系而导致鱼卵或者仔稚鱼在未发育到特定阶段的时候已经被冲至河口区高盐度水体,而这种情况对于早期生活史阶段的刀鲚而言无疑是致命的^[25]。比较 PYCE05 三个阶段 Sr/Ca 比值的变化,不难发现第1阶段和第2阶段之间的变化要远比第2阶段到第3阶段之间的变化剧烈。这一方面说明幼鱼较成鱼更易受到生活环境的影响,另一方面也反映了在第1阶段到第2阶段这个突越性的变化(从淡水进入半咸水生活)对刀鲚幼鱼存活来说可能是至关重要的一步。

PYCE05 个体耳石在靠近边缘的地方有一个 Sr/Ca 比值下降的过程(第3阶段,图2中的边缘处蓝绿色环纹),这与其在淡水环境(鄱阳湖)中所捕获的情况相一致。不过其耳石边缘处 Sr/Ca 比值要显著大于第一阶段的数值($P < 0.01$, Mann-Whitney *U*-test)并高于3,除了可能与特定的生理条件有关(如早期生活史生理背景为低 Sr 浓度,而洄游上溯的亲鱼其生理背景为高 Sr 浓度),很大程度上也反映了该鱼在进入长江以后可能并没有在一些地方逗留太长时间,而是迅速上溯至此,从而使得在体内 Sr 浓度较高的情况(来自海水)影响下,耳石 Sr/Ca 比值并未下降至淡水水平(Sr/Ca 比值小于3)。考虑到鄱阳湖口距离长江口距离较远,而刀鲚亲鱼仍能上溯至此并很有可能选择此地作为其产卵场,这种现象也反映了其可能的“溯源性”,即在同一产卵场孵化的鱼,即使入海生长,在生殖洄游时应该会设法尽

快地回到其起源的产卵场繁殖。对于这些可能性,需要在下一步的工作中结合更多的样品进行分析,并结合实地调查研究。

本研究证明了鄱阳湖中除了淡水定居的刀鲚(或者的确存在前人所谓的短颌鲚^[26])外,仍有洄游性刀鲚的分布。因此,在针对鄱阳湖进行各种生态经济开发工程评估和规划时,就需要考虑不破坏其洄游通道。此外,鄱阳湖内每年新繁育刀鲚幼鱼对长江、长江口、甚至东、黄海刀鲚资源补充可能产生的重要作用和关联性都需要受到高度重视。

本研究刀鲚样本收集得到了黎明政、胡玉婷、朱其广等的帮助,谨表谢意!

参考文献:

- [1] 张志永,刘枚,彭安成,等. 鄱阳湖鱼类生境面临的主要问题及修复措施探讨[J]. 水生生态学杂志, 2011, 32(1): 134-136.
- [2] 张燕萍,肖宏恕,谢宪兵. 鄱阳湖鲚属资源衰退原因及恢复对策分析[J]. 江西水产科技, 2008(116): 11-13.
- [3] 钱新娥,黄春根,王亚民,等. 鄱阳湖渔业资源现状及其环境监测[J]. 水生生物学报, 2002, 26(6): 612-617.
- [4] 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[J]. 南京大学学报:自然科学版, 1980(3): 67-82.
- [5] 朱栋良. 长江刀鱼的天然繁殖与胚胎发育观察[J]. 水产科技情报, 1992, 19(2): 49-51.
- [6] 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.
- [7] 廖伏初,何望,黄向荣,等. 洞庭湖渔业资源现状及其变化[J]. 水生生物学报, 2002, 26(6): 623-627.
- [8] Li Y X, Xie S G, Li Z J, et al. Gonad development of an anadromous fish *Coilia ectenes* (Engraulidae) in lower reaches of Yangtze River, China[J]. Fisheries Science, 2007, 73(6): 1224-1230.
- [9] 袁传宓,林金榜,秦安龄,等. 关于我国鲚属鱼类分类的历史和现状[J]. 南京大学学报:自然科学版, 1976(2): 1-12.
- [10] 范海霞,吴志强,胡茂林. 鄱阳湖不同生长阶段短颌鲚生化成分和能量的变化[J]. 水产科学, 2011, 30(2): 91-93.

- [11] 周晓骥,杨金权,唐文乔,等. 基于线粒体 COI 基因 DNA 条形码的中国鲚属物种有效性分析[J]. 动物分类学报,2010,35(4):819-826.
- [12] 杨健,刘洪波. 长江口崇明水域鲚鱼耳石元素微化学分析[J]. 中国水产科学,2010,17(4):853-858.
- [13] Wells B K, Bath G E, Thorrold S R, et al. Incorporation of strontium, cadmium, and barium in juvenile spot (*Leiostomus xanthurus*) scales reflects water chemistry[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science,2000,57(10):2122-2129.
- [14] Tsunagawa T, Arai T. Flexible migration of Japanese freshwater gobies *Rhinogobius* spp. as revealed by otolith Sr: Ca ratios[J]. Journal of Fish Biology,2008,73(10):2421-2433.
- [15] Gillanders B M. Otolith chemistry to determine movements of diadromous and freshwater fish[J]. Aquatic Living Resources,2005,18(3):291-300.
- [16] Arai T, Yang J, Miyazaki N. Migration flexibility between freshwater and marine habitats of the pond smelt *Hypomesus nipponensis* [J]. Journal of Fish Biology,2006,68(5):1388-1398.
- [17] Arai T, Kotake A, Aoyama T, et al. Identifying sea-run brown trout, *Salmo trutta*, using Sr: Ca ratios of otolith[J]. Ichthyological Research,2002,49(4):380-383.
- [18] Arai T, Goto A, Miyazaki N. Migratory history of the threespine stickleback *Gasterosteus aculeatus* [J]. Ichthyological Research,2003,50(1):9-14.
- [19] Zhong L, Guo H, Shen H, et al. Preliminary results of Sr: Ca ratios of *Coilia nasus* in otoliths by microPIXE [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,2007,260(1):349-352.
- [20] Arai T, Kotake A, Aoyama T, et al. Identifying sea-run brown trout, *Salmo trutta*, using Sr: Ca ratios of otolith[J]. Ichthyological Research,2002,49(4):380-383.
- [21] 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.
- [22] Tsukamoto K, Arai T. Facultative catadromy of the eel *Anguilla japonica* between freshwater and seawater habitats [J]. Marine Ecology-Progress Series,2001,220:265-276.
- [23] Tzeng W N. Effects of salinity and ontogenetic movements on strontium: calcium ratios in the otoliths of the Japanese eel, *Anguilla japonica* Temminck and Schlegel [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology,1996,199(1):111-122.
- [24] Tzeng W N, Shiao J C, Iizuka Y. Use of otolith Sr: Ca ratios to study the riverine migratory behaviors of Japanese eel *Anguilla japonica* [J]. Marine Ecology-Progress Series,2002,245:213-221.
- [25] Matsui S, Tomishige S I, Tsukahara H. Ecological studies on the Engraulid fish, *Coilia nasus* Temminck er Schlegel. II: the effect of salinity on embryonic development and Hatch [J]. Science Bulletin of the Faculty of the Agriculture Kyusku University,1986,40(4):229-234.
- [26] 湖北省水生生物研究所鱼类研究室. 长江鱼类 [M]. 北京:科学出版社,1976.

Two microchemistry patterns in otoliths of *Coilia nasus* from Poyang Lake, China

JIANG Tao¹, ZHOU Xinqi², LIU Hongbo³, LIU Huanzhang⁴, YANG Jian^{1,3*}

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

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries,

Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;

4. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430072, China)

Abstract: To confirm whether there is anadromous estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* now in Poyang Lake, an electron probe microanalyzer (EPMA) was applied to analyze the element Sr and Ca microchemistry patterns in otoliths of two individuals collected from Xingzi area of the lake. Results of line transect analysis showed that the ratios of Sr: Ca $\times 1\ 000$ in the otolith of the individual with a shorter supramaxilla (PYCB02) were consistently low (1.66 ± 0.54), indicating that it experienced in freshwater habitat during its whole life history. Another individual with a longer supramaxilla (PYCE05) had a complex Sr/Ca ratio pattern which can be divided into three phases (1.82 ± 0.50 , 5.79 ± 0.91 , and 4.14 ± 0.88), suggesting it experienced not only the freshwater, but also the seawater and brackish water during different stages in its life history. All these differences could be well confirmed by the results of X-ray mapping analysis of EPMA. The whole otolith of PYCB02 presented a uniform bluish pattern (low Sr level) from the core to the outermost regions. In contrast, the otolith of PYCE05 showed a multi-color pattern. There were greenish (moderate Sr level), yellowish (moderate Sr level), or even reddish (high Sr level) in outer regions adjacent to the bluish central regions. Results of the two different microchemistry patterns obtained by both the line transect and mapping analyses confirmed objectively, for the first time, the coexistence of resident and anadromous forms of *Coilia nasus* in Poyang Lake and suggested that *Coilia nasus* is still possible to migrate anadromously for spawning into Poyang Lake, which is about 800 km away from the river mouth of Yangtze River. These aforementioned microchemistry patterns will provide important information not only to more effectively evaluate and protect the resources of *Coilia nasus*, but also to rationally plan and guide future ecological economic development in Poyang Lake.

Key words: *Coilia nasus*; otolith; electron probe microanalyzer; Poyang Lake

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