

长江口崇明水域鲻鱼耳石元素微化学分析

杨健, 刘洪波

(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)

摘要: 利用电子显微探针元素分析技术, 对长江口崇明水域鲻鱼 (*Mugil cephalus*) 的耳石进行了锶和钙沉积特征的初步研究。元素定量线分析和面分布分析结果均直观而明显地表明, 长江口鲻鱼存在着多样化的洄游活动。其孵化和早期发育需要盐度适中的生境, 而在随后的继续生长和发育阶段, 鲻鱼可以灵活地利用长江口淡水、河口半咸水和海水环境, 个体之间洄游的“履历”差异很大, 反映出了鲻鱼生活史过程中较为复杂的生存策略。本研究旨在探讨鲻鱼的生存环境背景, 为今后开展人工养殖提供基础生物学资料。[中国水产科学, 2010, 17(4): 853–858]

关键词: 耳石; 鲻鱼; 电子显微探针分析

中图分类号: Q959; S94

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2010)04-0853-06

长江口水域因营养物质丰富, 饵料生物繁多, 是历史上许多重要经济鱼类的栖息地或洄游通道。鲻鱼 (*Mugil cephalus*) 属河口洄游性鱼类, 是长江口习见种之一。因其体大肉厚, 富含高营养蛋白质和不饱和脂肪酸, 其卵可制成鱼子酱等高价值功能产品^[1], 历来在渔获物中占有重要地位。近40年来, 尽管国内外学者在鲻鱼的繁殖生物学及育苗培育等方面做了大量的尝试和研究, 积累了不少经验, 但就生产实践而言, 其规模化人工育苗技术至今尚未成熟^[2]。其中很重要的原因之一就是鲻鱼洄游过程中可能存在的多样性以及生活史历程所需生境的变化特点等信息缺乏了解。长江口属咸淡水交汇水域, 被认为是野生鲻繁殖季节前索饵肥育的主要栖息地之一^[2]。值得注意的是, 鲻鱼进入长江口水域后所需的生长停留时间尚不清楚, 渔获群体中的鲻鱼个体是否存在着洄游“履历”的多样性, 如在淡水、咸淡水或高盐度海水中生活背景的个体信息尚不清楚。对于这些信息的了解将对揭示鲻鱼的洄游过程和生活史环境提供有力证据。但由于目前长江口捕

捞调查的方法仅能捕到固定规格的鲻鱼, 且无法直观地把握其生活史过程中的生境变化, 故存在着很大的局限性。因此, 探求研究技术的突破无疑将对掌握上述信息具有十分重要的意义。

近年来, 鱼类耳石微化学分析已经成为研究鱼类生活史的重要方法之一。利用电子显微探针仪 (EPMA) 对鱼类耳石微量元素的微化学研究可避免上述局限。鱼类耳石中Sr和Ca的沉积可以反应其生活史过程中处于淡水、半咸水和海水时期的生长环境与鱼体的生理学变化状态, 耳石Sr含量或Sr/Ca含量比值可以用作研究在海水和淡水间洄游经历的指示参数^[3-4]。已有研究^[5-6]显示, 通过对鱼类耳石显微结构中微量元素Sr和Ca进行电子显微探针分析, 可了解保存于耳石中不同生活史阶段积累下来的环境元素含量和特征, 从而可以较为准确地而直观地“回推”鱼类过去生活过的环境“履历”, 达到“重建”鱼类自然栖息环境的目的。迄今, 该方法的应用已在研究生境变化较大的洄游性鱼类方面取得了一些突破性的成果^[7-8]。本研究室曾利用刀鲚

收稿日期: 2009-10-25; 修订日期: 2010-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30871920).

作者简介: 杨健 (1964-), 男, 研究员, 主要从事渔业生态环境监测与保护研究. E-mail: jiany@ffrc.cn

(*Coilia ectenes*)、凤鲚(*Coilia mystus*)初步建立了相关的研究方法并取得了一些突破^[9-10]。以此为基础,本研究拟利用EPMA首次对长江口崇明岛水域鲻鱼耳石的锶钙比进行分析,以期较为准确地还原其洄游史,比较集群个体的洄游背景,并对洄游过程中环境的变迁做出评价,旨在为今后开展鲻鱼人工养殖生产提供基础生物学依据。

1 材料与方法

1.1 材料处理

于2003年6月6日在长江口崇明岛水域采集鲻鱼样本3尾用于本研究,标本编号分别为:MC1、MC2、MC3。其体长分别为32.5 cm、30.5 cm、31.0 cm,体质量分别为276.7 g、236.3 g、252.9 g, -20℃冷冻保存备用。解剖取出鲻鱼左边矢耳石,清除耳石表面的有机质后,室温下干燥保存待用。

所有耳石标本用备有金刚石磨轮的碾磨机(Discoplan-TS型, Struers公司)初、精磨至耳石核心(Core)暴露,再将其用Planapol-V型(Struers公司)自动磨抛机上抛光。微量元素测定之前耳石标本用去离子水超声波水浴洗净。

1.2 分析方法

为进行元素电子探针显微分析,耳石标本在真空蒸着装置中镀Pt和Pd薄膜。然后,从耳石核心沿着最长横轴向边缘用日本JEOL公司的JEOL JXA-8900R型电子探针显微分析仪直线测定(简称定量

线分析)Sr和Ca的含量。利用CaCO₃和SrCO₃作为测定结果检验的标准物质。加速电压和电子束电流分别为15 kV和 1.2×10^{-8} A。电子束电流聚焦于直径2 μm的点上,且每间隔2 μm测量下一个点。耳石标本各元素的X-射线强度图像化(X-ray Intensity Maps)分析亦用相同的JXA-8900R型进行(简称面分布分析)。电子束电流为 1.2×10^{-7} A,记录时间为0.1 s。像素为2 μm×2 μm。电子束电流聚焦直径 $1 \mu\text{m}^{[11]}$ 。

1.3 数据分析

定量线分析数据用由上述电子探针显微分析仪沿耳石标本矢状面,从核心顺最长横轴向边缘测定,所获各点用Sr含量和Ca含量的比值来表示。每个测定点到耳石核心的距离在本研究中被成为“耳石径”。由于耳石中Sr含量远小于Ca的含量,本实验按惯例将Sr/Ca比值标准化,即统一用Sr含量:Ca含量×10³的比值表示,简称Sr/Ca比值。耳石不同区域Sr/Ca比值以平均值±标准差表示。

本研究的统计分析使用美国SAS公司的StatView 5.0软件。差异的显著水平判定用Mann-Whitney U测验进行。

2 结果与分析

EPMA定量线分析和面分布分析的结果均表明,MC1、MC2和MC3的生活史虽然不尽相同,但大致可分为3个阶段。

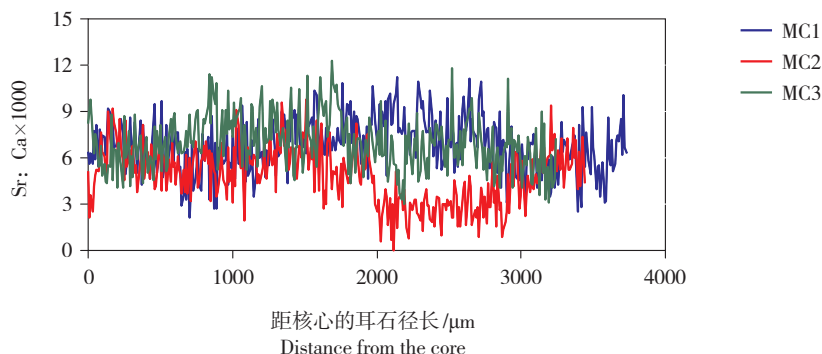


图1 沿3尾鲻鱼MC1、MC2、MC3的耳石矢状面从核心(0 μm)到边缘定量线分析记录到的Sr/Ca比值变化

Fig. 1 Fluctuation of otolith Sr:Ca concentration ratios along line transects from the core (0 μm) to the edge in the sagittal plane of otoliths from 3 individuals (MC1, MC2 and MC3) of *Mugil cephalus*

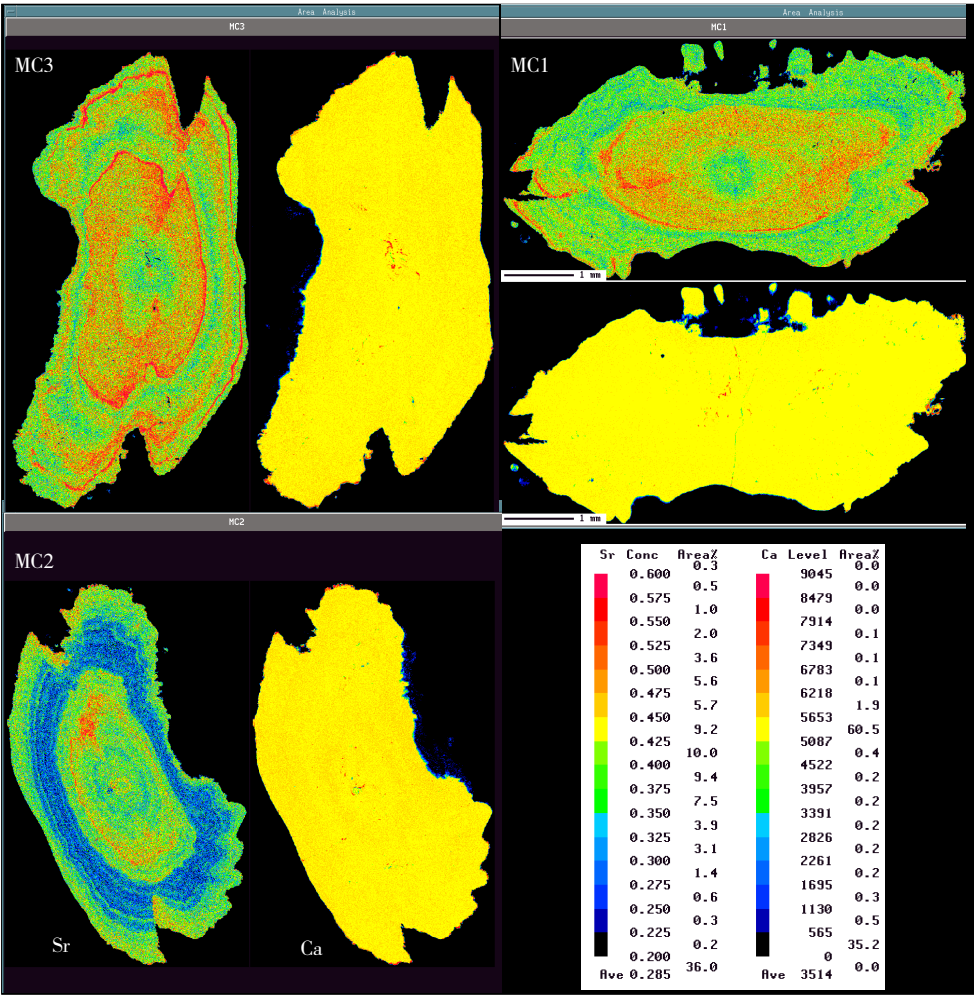


图2 3尾鲻鱼(MC1、MC2、MC3)的耳石矢状面二维Sr和Ca含量的面分布

Fig. 2 Two-dimensional imaging using mapping analysis of the Sr and Ca concentrations in the sagittal plane of sagittal otoliths from 3 individuals (MC1, MC2 and MC3) of *Mugil cephalus*

表1 3尾鲻耳石标本(MC1、MC2、MC3)中锶和钙的微化学变化				
Tab. 1 Fluctuation of Sr and Ca microchemistry in otoliths from 3 individuals (MC1, MC2 and MC3) of <i>Mugil cephalus</i>				
样本编号 Sample	锶钙含量比显著变化阶段 Signifucant fluctuation stage of otolith Sr: Ca concentration ratio	耳石径长/μm Distance from the core	Sr: Ca×10 ³ (n=3; $\bar{x} \pm SD$)	在图2中的对应位置 Corresponding area in Fig. 2
MC1	1	0 ~ 1330	6.25 ± 1.52 ^a	绿色同心环区域
	2	1340 ~ 2850	7.83 ± 1.45 ^b	红色同心环区域
	3	2860 ~ 3730	5.90 ± 1.56 ^a	绿色同心环区域
MC2	1	0 ~ 1990	5.67 ± 1.48 ^a	绿色同心环区域
	2	2000 ~ 2900	2.73 ± 1.09 ^b	蓝色同心环区域
	3	2910 ~ 3440	5.37 ± 1.43 ^a	绿色同心环区域
MC3	1	0 ~ 820	6.69 ± 1.41 ^a	绿色同心环区域
	2	830 ~ 1750	8.21 ± 1.74 ^b	红色同心环区域
	3	1760 ~ 3240	6.43 ± 1.56 ^a	绿色同心环区域

注: 每尾鱼耳石 Sr : Ca×10³数据右上角的相同字母表示不同阶段差异不显著(P>0.05),不同字母表示差异极显著(P<0.01)。

Note: Sr : Ca ratio values of each fish with the same superscript letters mean no significant difference (P>0.05) among different phase , with different superscript letters mean extremely significant difference (P<0.01) .

从表1和图1的结果可以看出, MC1的生长可分3个阶段, 即第一阶段为从耳石核心沿矢状面向边缘1 330 μm 横断面, Sr/Ca比值较高; 第二阶段为从核心向边缘方向的1 340 ~ 2 850 μm 范围, Sr/Ca比值最高; 第三阶段的Sr/Ca比值最低。同样MC3的3个阶段分别为从耳石核心到820 μm 横断面阶段, Sr/Ca比值较高; 第二阶段830 ~ 1 750 μm 横断面范围, Sr/Ca比值最高; 第三阶段(2 860 μm 至耳石最长轴边缘)为1 760 μm 截面至耳石最长轴边缘, Sr/Ca比值降为最低。而MC2的3个阶段分为从耳石核心到1 990 μm 横断面, Sr/Ca比值最高阶段、2 000 ~ 2 900 μm Sr/Ca比值最低阶段和2 910 μm 截面至耳石最长轴边缘的Sr/Ca比值较高阶段。3个耳石均显示Sr/Ca比值变动高的第一阶段与第二阶段、第二阶段与第三阶段间存在极其显著的差异($P < 0.000\ 1$), 而比值变动不大的第一阶段与第三阶段没有显著性差异($P > 0.05$)。Sr和Ca含量面分布也表明, MC1、MC2和MC3在孵化期(即耳石的核心部位)和早期发育阶段以及被捕获时的生存环境非常相似(图2)。

3 讨论

3.1 鲮鱼生活史过程中生境“履历”的重建

目前认为, 鲮鱼栖息于长江口浅海或河口的咸淡水交汇处, 对环境的适应能力特别强, 淡水、咸淡水或高盐度的海水中均能正常生长。秋冬鲮鱼在沿岸较深处产卵, 早春常溯河到淡水区, 甚至可进入太湖, 秋季长至体长约25 cm时又回到海中^[12-13]。根据本研究中鱼耳石Sr/Ca比值的变化可以推断, 长江口鲮的洄游活动和生境“履历”远比人们了解的要复杂。

本研究室在对太湖刀鲚、长江刀鲚和凤鲚耳石的Sr/Ca比值进行比较研究中发现, 对应于淡水、长江口半咸水和海水的Sr/Ca比值平均值一般分别具有“ ≤ 3 , $3 \sim 7$, > 7 ”的趋势(分别对应于相同耳石面分布分析中的蓝色、绿色、黄-红色同心环区域)^[10]。参照此标准, 本研究对鲮鱼在长江口水域生活史中所经历过的环境“履历”和特征进行了重建。

值得注意的是, MC1、MC2和MC3在孵化期(即耳石核心部位)和早期发育阶段以及被捕获时的环境盐度类似, 均生活于Sr浓度较高的半咸水环境(图2中绿色同心圆环), 而不是盐度很高的海水或盐度很低的淡水环境。前两阶段的结果显示, 长江口鲮鱼的繁殖、孵化及早期发育的生境水域的盐度需适中, 可能类似于Chang等^[14]报道中所采集到鲮鱼幼鱼(特别是0 ~ 2龄)的河口水域盐度(平均23.5, 范围1.0 ~ 34.9)。这一点对鲮鱼人工繁育水环境条件的优化具有重要的参考价值。

3.2 鲮鱼洄游方式的特征

本研究中3尾鲮鱼个体耳石Sr/Ca比值的结果明显地反映出鲮鱼的洄游方式存在多样性。MC1和MC3仅往返于河口半咸水、海水环境生长和发育(Sr/Ca比值均高于5), 直至捕获亦不进入淡水。而MC2则往返于河口半咸水、海水环境, 在进入淡水环境(图2中蓝色同心圆环)生活一段时期后再回到河口半咸水区, 直至被捕获。电子微探针波长色散X-射线衍射分析的结果也表明, 虽然MC1和MC3耳石Sr/Ca比值有波动, 但总体的值都较高, 显示出往返于河口半咸水、海水环境, 并不溯河到淡水区。MC2的定量线分析数据却表现出另一种类型。2 000 ~ 2 900 μm 区域的Sr/Ca比值明显处于较低水平, 与面分布分析图像结果相一致。说明生活史中的这个时期, MC2会溯河到淡水区活动。文献报道台湾西部沿岸捕获的鲮鱼产卵洄游群体中, 成熟年龄为2 ~ 8龄, 体长320 ~ 500 mm^[2]。本研究样本的体长平均值为310 mm, 推断个体年龄为2龄以下, 可能尚未到成熟年龄。因此, 本研究的结果清楚地显示出长江口鲮鱼在其1龄左右的幼鱼阶段会有一次生境的分化, 即鲮鱼的群体会出现不进入淡水和进入淡水生活的2种洄游类型。一般认为多样的洄游类型可能与相应个体生长的潜在需求和索饵方式的选择有关。最近的研究表明, 台湾西部鲮鱼繁殖群体中个体的大部分由不进入淡水的个体组成^[14]。有文献报道, 东海区鱼卵仔鱼周年调查中未见该种鲮鱼的鱼卵仔鱼^[15], 但从5月份开始, 2龄左右的鲮鱼

开始在长江口崇明岛水域出现,5–8月占渔获量的百分比平均可达22.3%,且在6月份达到最高^[16]。由于鲻鱼的产卵季节在秋冬季^[14–15],因此其在长江口水域最多出现的时间为非繁殖季节的夏季。最近台湾的研究发现,深冬季节鲻鱼会出现于台湾西部沿岸繁殖产卵,而该水域是黑潮暖流的流经区域^[14]。而长江口、江苏和浙江沿岸鲻鱼的繁殖水域也被认为是台湾西部沿岸^[2]。由于本研究中的鲻鱼尚未达到性成熟,因此其耳石锶、钙微化学结果应该记录了其从繁殖水域孵化开始一直伴随着发育和生长洄游到长江口崇明水域的生境变化过程。但目前从3个耳石标本上无法读出确切的日龄和年龄信息,因此精确推算鲻鱼生境变化时的发育日龄和可能的生理状态仍难实现。

今后有必要结合各种规格鲻鱼的耳石日龄、年龄和从长江口到台湾西部沿岸水域盐度变化规律的调查,进一步较为精确地重建长江口水域鲻鱼洄游的时间和空间模式,以为其资源保护和人工繁育工作提供重要的基础资料。

致谢: 日本东京大学海洋研究所新井崇臣副教授、宫崎信之教授提供了EPMA技术协助,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 李来好,陈培基,杨贤庆,等. 鲻鱼营养成分的研究[J]. 营养学报,2001,23(1): 91–93.
- [2] 庄平,王幼槐,李圣法,等. 长江口鱼类[M]. 上海: 上海科学技术出版社,2006: 181–187.
- [3] Secor D H, Rooker J R. Is otolith strontium a useful scalar of life cycles in estuarine fishes? [J]. Fisheries Research, 2000, 46: 359–371.
- [4] 高永华,李胜荣,任冬妮,等. 鱼耳石元素研究热点及常用测试分析方法综述[J]. 地学前缘,2008,15(6): 11–17.
- [5] Campana S E. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1999, 188: 263–297.
- [6] 罗军燕,李胜荣,申俊峰. 鱼耳石中锶和钡富集的影响因素及其环境响应[J]. 地学前缘,2008,15(6): 18–24.
- [7] Tsukamoto K, Nakai I, Tesch W V. Do all freshwater eels migrate? [J]. Nature, 1998, 396: 635–636.
- [8] Hamilton S L, Regetz J, Warner R R. Postsettlement survival linked to larval life in a marine fish[J]. PNAS, 2008, 105(5): 1561–1566.
- [9] Yang J, Arai T, Liu H B, et al. 2006. Environmental signature in the otolith elemental fingerprint of the tapertail anchovy, *Coilia mystus*, from the Changjiang estuary, China [J]. J. Appl. Ichthy, 2006, 22(5): 459–462.
- [10] Yang J, Arai T, Liu H B, et al. Reconstructing habitat use of *Coilia mystus*, *Coilia ectenes* of the Changjiang River estuary and Taihu *Coilia ectenes* of the Taihu Lake based on otolith environmental strontium and calcium signature [J]. J. Fish Biol., 2006, 69(4): 1120–1135.
- [11] Arai T, Hayano H, Asami H., et al. Coexistence of anadromous and lacustrine life histories of the shirauo, *Salangichthys microdon* [J]. F Oceanography, 2003, 12: 134–139.
- [12] 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.
- [13] 周文坚. 鲻鱼对蛋白质的营养需求[J]. 现代渔业信息, 1991, 6(9): 18–22.
- [14] Chang C W, Iizuka Y, Tzeng W N. Migratory environmental history of the grey mullet *Mugil cephalus* as revealed by otolith Sr: Ca ratios [J]. Mar Ecol Prog Ser, 2004, 269: 277–288.
- [15] 郑元甲,陈雪忠,程家骅,等. 东海大陆架生物资源与环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003: 231.
- [16] 冯广朋,庄平,刘健,等. 崇明东滩团结沙鱼类群落多样性与生长特性[J]. 海洋渔业, 2007, 29(1): 38–43.

Otolith microchemistry of grey mullet *Mugil cephalus* from Chongming water in the Yangtze River estuary, China

YANG Jian, LIU Hongbo

(Key Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: An electron probe microanalyzer was used to analyze the elements Sr and Ca accumulation patterns in otoliths of three samples of grey mullets *Mugil cephalus* collected from Chongming water in the Yangtze River estuary, China. Results of both the line transect and mapping analyses clearly showed that the Sr concentration and Sr : Ca concentration ratios in the otoliths changed with the salinity of the habitat during the life-history of the grey mullets, implying their fluctuation migration patterns. A moderate salinity habitat seems to be necessary for the hatching and early ontogenetic development of *M. cephalus*. However, in their continued developmental stages much more flexible migration patterns among fresh, brackish, and marine waters can be found in *M. cephalus* and the individual differences were very obvious, suggesting the complicated life history strategies in grey mullet *Mugil cephalus* of the Yangtze River estuary. [Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 853–858]

Key words: otolith microchemistry; *Mugil cephalus*; electron probe microanalyzer