

文章编号: 1674-5566(2013)01-0023-10

太湖及洪泽湖太湖新银鱼耳石元素锶钙比的比较研究

周昕期¹, 刘洪波², 姜涛³, 杨健²

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心 内陆渔业生态环境与资源重点开放实验室, 江苏 无锡 214081; 3. 南京农业大学 无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081)

摘要: 利用元素电子显微探针分析技术, 对南太湖(白雀乡水域)、北太湖(吴塘门至乌龟山水域)以及洪泽湖(老子山水域)的太湖新银鱼(*Neosalanx taihuensis*)的耳石进行了元素微化学分析, 如锶及钙元素分布、积累、浓度比等特征的比较研究。元素定量线分析和面分布分析结果均直观而明显地表明, 北太湖太湖新银鱼的个体可以分为两种类型, 一类耳石具高锶钙比($21.41 \pm 0.50, N=4$), 另一类耳石具低锶钙比($1.64 \pm 0.12, N=5$); 南太湖个体耳石的锶钙比值居中($3.12 \pm 0.07, N=10$); 而洪泽湖个体耳石的锶钙比普遍偏高($5.42 \pm 0.32, N=9$)。这些个体类别间锶钙比值的差异均显著($P < 0.05$)。此外, 洪泽湖个体耳石标本有高锶环的存在, 而太湖个体耳石中锶的分布水平较均一化。上述结果显示, 一方面太湖和洪泽湖太湖新银鱼耳石锶钙比类型差异明显; 另一方面太湖不同水域太湖新银鱼耳石的锶钙比类型亦不尽相同; 反映出耳石锶钙比特征具有可以用来区别太湖新银鱼不同水域资源群体的潜力。

研究亮点: 首次开展了太湖新银鱼耳石锶钙比的研究, 成功地获得了能够直观反映不同湖泊和同一湖泊不同水域太湖新银鱼耳石锶分布和锶钙比变化的特征图像。这些特征较为清楚地显示出太湖新银鱼不同资源群体的地理差异明显, 且该种鱼类耳石微化学因子的变动因素与江海洄游性鱼类有很大差异。

关键词: 太湖新银鱼; 耳石; 电子探针; 锶钙比; 耳石微化学

中图分类号: S 917

文献标志码: A

太湖新银鱼(*Neosalanx taihuensis*)属鲑形目(Salmoniformes), 银鱼科(Salangidae), 新银鱼属(*Neosalanx*), 为我国特有的种类, 原产于我国长江中下游及附属湖泊、淮河、瓯江中下游等水域^[1-5]。太湖新银鱼耐盐性强, 其沿海栖息的群体有溯河洄游习性; 也是一种能存在于淡水中完成孵化、生长、成熟和繁殖生活史全过程的淡水定居型群体^[4,6-7]。太湖新银鱼是我国优质水产品之一^[6-10], 但近年来资源量却逐年下降^[5]。

目前对太湖新银鱼的研究方向集中于基础生物学方面, 如繁殖条件^[11-13]、食性情况^[14-15]、遗传地位^[16-19]、耳石微结构^[20-21]等。然而, 针对太湖新银鱼同一水域资源群体的组成情况, 不同水域资源群体间是否存在地域差异性等问题尚很难进行研究和确认。YE等^[22], 杨健等^[23]研

究发现, 太湖及洪泽湖的大银鱼间存在有元素积累的地域性差异。因此, 银鱼组织中元素环境“指纹”有可能成为解决上述难题的有效工具。本研究中, 笔者将通过对太湖以及洪泽湖所产太湖新银鱼硬组织耳石进行元素微化学的比较研究, 对两地的新银鱼资源组成、生境特征及其差异性进行调查, 为相关鱼种的资源管理提供新的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料

试验用太湖新银鱼共计 28 尾。其中 9 尾采自北太湖吴塘门至乌龟山水域, 体长为(5.46 ± 0.56) cm; 10 尾采自南太湖白雀乡水域, 体长为(5.39 ± 1.62) cm; 9 尾采自洪泽湖老子山水域,

收稿日期: 2012-04-05 修回日期: 2012-05-28

基金项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项课题(2012A0201)

作者简介: 周昕期(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业生态环境监测与保护。E-mail: pipi_991@163.com

通信作者: 杨 健, E-mail: jiany@ffrc.cn

体长为 (5.94 ± 0.28) cm(表 1、图 1)。样本采集后迅速放入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冷藏保存备用。

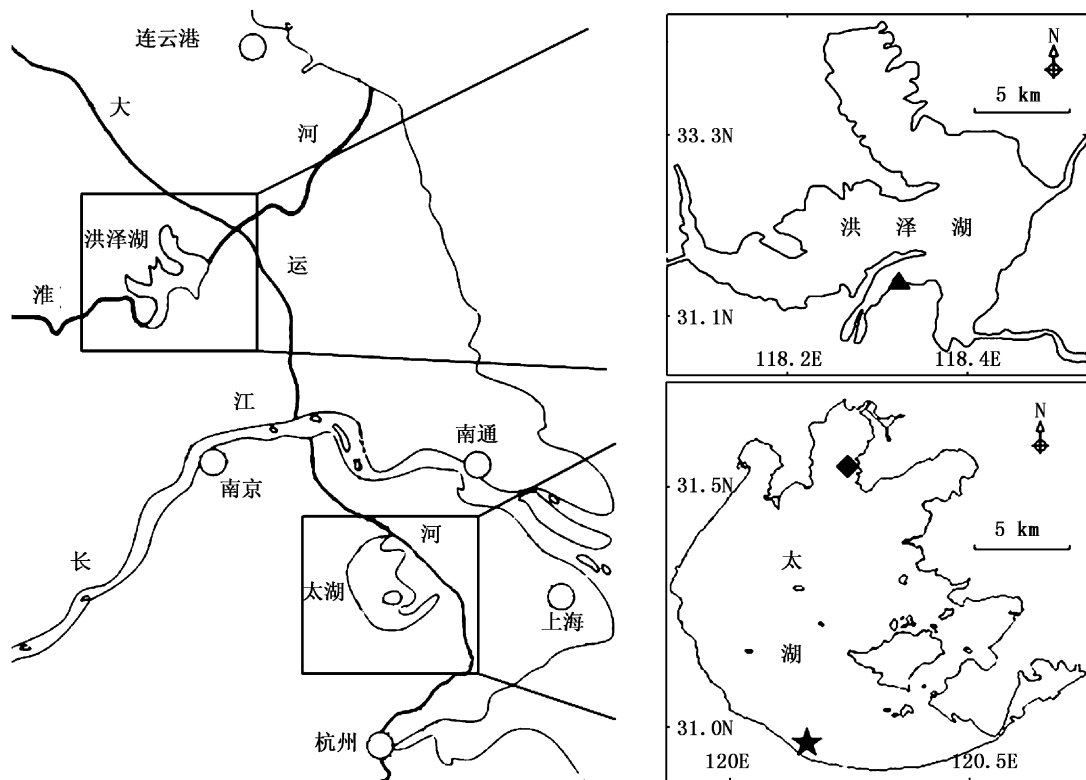


图 1 太湖新银鱼采样水域图

Fig. 1 A map of all sampling waters of *Neosalanx taihuensis*

◆表示北太湖吴塘门至乌龟山水域;★表示南太湖白雀乡水域;▲表示洪泽湖老子山水域。

1.2 耳石标本前处理

太湖新银鱼样本解冻后,从其耳蜗取出一对矢耳石,去除并清洗表面的软组织后晾干,统一使用左矢耳石进行本研究的元素微化学测定。将耳石标本包埋于环氧树脂(Epofix,丹麦 Struers 公司)中。用 1 200 目砂纸进行精磨。当磨至核心后,使用金刚石抛光液和 MD 抛光布以 150 r/min 进行抛光(Roto Pol-35,丹麦 Struers 公司)至耳石表面无刮痕为止。后将所有树脂块放入超纯水中进行超声清洗 5 min 后自然晾干 24 h。待完全晾干后,耳石标本置于镀膜机(JEE-420,日本电子株式会社)中蒸镀碳膜(镀膜电流 36 A,镀膜时间 25 s)。

1.3 耳石微化学分析

使用 X 射线电子探针微区分析仪(JXA-8100,下文简称 EPMA,日本电子株式会社)分析耳石标本。沿耳石矢状面,从核心沿最长轴向边缘测定 Sr 和 Ca 的含量(简称定量线分析)。以碳酸钙(CaCO_3)和钛酸锶(SrTiO_3)为标样。

EPMA 分析参数为加速电压 15 kV,电子束电流 2.0×10^{-8} A,束斑直径为 5 μm ,每间隔 5 μm 分析下一个点。使用相同仪器对耳石标本进行 X 射线强度图像化分析(简称面分布分析),机器参数设定为加速电压 15 kV,电子束电流 5.0×10^{-7} A,束斑直径为 5 μm ,像素为 2 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$,每点驻留时间为 30 ms。

1.4 日轮计数

将微化学分析后的标本模块使用金刚石抛光液和 MD 抛光布以 150 r/min 进行抛光(Roto Pol-35,丹麦 Struers 公司)至模块表面无碳膜为止。抛光后的树脂块使用 Mili Q 水洗净。使用 1:1 甘油透明。在生物显微镜(CX31,日本奥林巴斯株式会社)下观察拍照并进行日轮计数。每个耳石样本由 2 个人分别读数,每人统计 3 次,取其平均值。

1.5 数据处理

上述定量线分析数据为从核心沿最长径至耳石边缘的各点测定,所获各点用锶含量和钙含

量的比值表示。由于耳石中锶含量远小于钙的含量,本研究按惯例将锶/钙值标准化,即统一使用锶含量/钙含量 $\times 10^3$ 的比值表示,简称 Sr/Ca 值或锶钙比值。不同水域耳石 Sr/Ca 值以平均

值 \pm 标准差表示。

本研究中获得数据使用 SPSS 18.0 进行差异性分析。差异的显著水平用 Mann-Whitney U 检验进行。

表 1 太湖新银鱼样本基本情况

Tab. 1 Sampling details of *Neosalanx taihuensis* in the present study

样品	采样点	采样时间	体长/cm	微化学	日轮计数
TLXF050505	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	5.21	●	●
TLXF050509	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	4.85	●	●
TLXF050510	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	5.31	●	●
TLAF050503	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	6.21	●	●
TLAF050511	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	4.78	●	●
TLAF050514	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	6.35	●	●
TLAF050515	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	5.51	●	●
TLAF050516	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	5.85	●	●
TLAF050519	北太湖吴塘门至乌龟山水域	2005 年 5 月	5.15	●	●
Mean \pm SD			5.46 \pm 0.56		
BQNT01	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	3.80	●	●
BQNT02	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	3.75	●	●
BQNT03	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	3.21	●	●
BQNT04	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	3.77	●	●
BQNT05	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	6.01	●	●
BQNT06	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	7.00	●	●
BQNT07	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	5.70	●	●
BQNT08	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	6.27	●	●
BQNT09	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	6.72	●	●
BQNT10	南太湖白雀乡水域	2011 年 5 月	7.70	●	●
Mean \pm SD			5.39 \pm 1.62		
HZH01A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	5.74	●	●
HZH02A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	5.6	●	●
HZH03A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	5.91	●	●
HZH04A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	6.44	●	●
HZH05A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	5.68	●	●
HZH06A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	6.03	●	●
HZH07A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	6.25	●	●
HZH09A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	5.76	●	●
HZH10A	洪泽湖老子山水域	2009 年 9 月	6.08	●	●
Mean \pm SD			5.94 \pm 0.28		

注:●表示该样品成功进行了耳石微化学与日轮计数研究。

2 结果与分析

2.1 元素定量线分析

EMPA 所测定量线分析数据见图 2~4。2005 年北太湖吴塘门至乌龟山水域所采到的标本明显分为 2 种不同的类型,一种为高锶型(TLAF050503、TLXF050505、TLXF050509、TLAF050514),其 Sr/Ca 值为 21.41 ± 0.50 ;另一种为低锶型(TLXF050510、TLAF050511、TLAF050515、TLAF050516、TLAF050519),其 Sr/Ca 值为 1.64 ± 0.12 (图 2)。这两类新银鱼的 Sr/

Ca 值差异极其显著($P < 0.01$,表 2)且两类的太湖新银鱼的个体数比例为 4:5。而 2011 年 9 月份在南太湖所采集到的太湖新银鱼 Sr/Ca 值则普遍较低,平均值为 3.12 ± 0.07 ,与 2005 年所采样品的高 Sr 型的差异极其显著($P < 0.01$);与其低 Sr 型的差异同样显著($P < 0.05$)。洪泽湖太湖新银鱼耳石的其 Sr/Ca 值则处于较为中等的水平,平均值为 5.42 ± 0.32 ,与太湖各水域所采耳石标本 Sr/Ca 值结果都有着显著差异($P < 0.05$)。结果显示,不同水域(包括同一太湖的不同地点)所采集的太湖新银鱼耳石有 Sr/Ca 值不同的现象。

表 2 不同水域太湖新银鱼耳石的锶钙比值

Tab. 2 Sr/Ca ratios in the otoliths of *Neosalanx taihuensis* from different water areas

	北太湖(高锶型)	北太湖(低锶型)	南太湖	洪泽湖
Sr:Ca $\times 10^3$	21.41 \pm 0.50 ^a	1.64 \pm 0.12 ^b	3.12 \pm 0.07 ^c	5.42 \pm 0.32 ^d
耳石长半径/ μm	228.31 \pm 20.21	327.32 \pm 50.07	271.34 \pm 81.51	321.11 \pm 34.71

注:表中数据为平均值 \pm 标准差,后面的不同小写字母表示统计学上的显著差异性($P < 0.05$)。

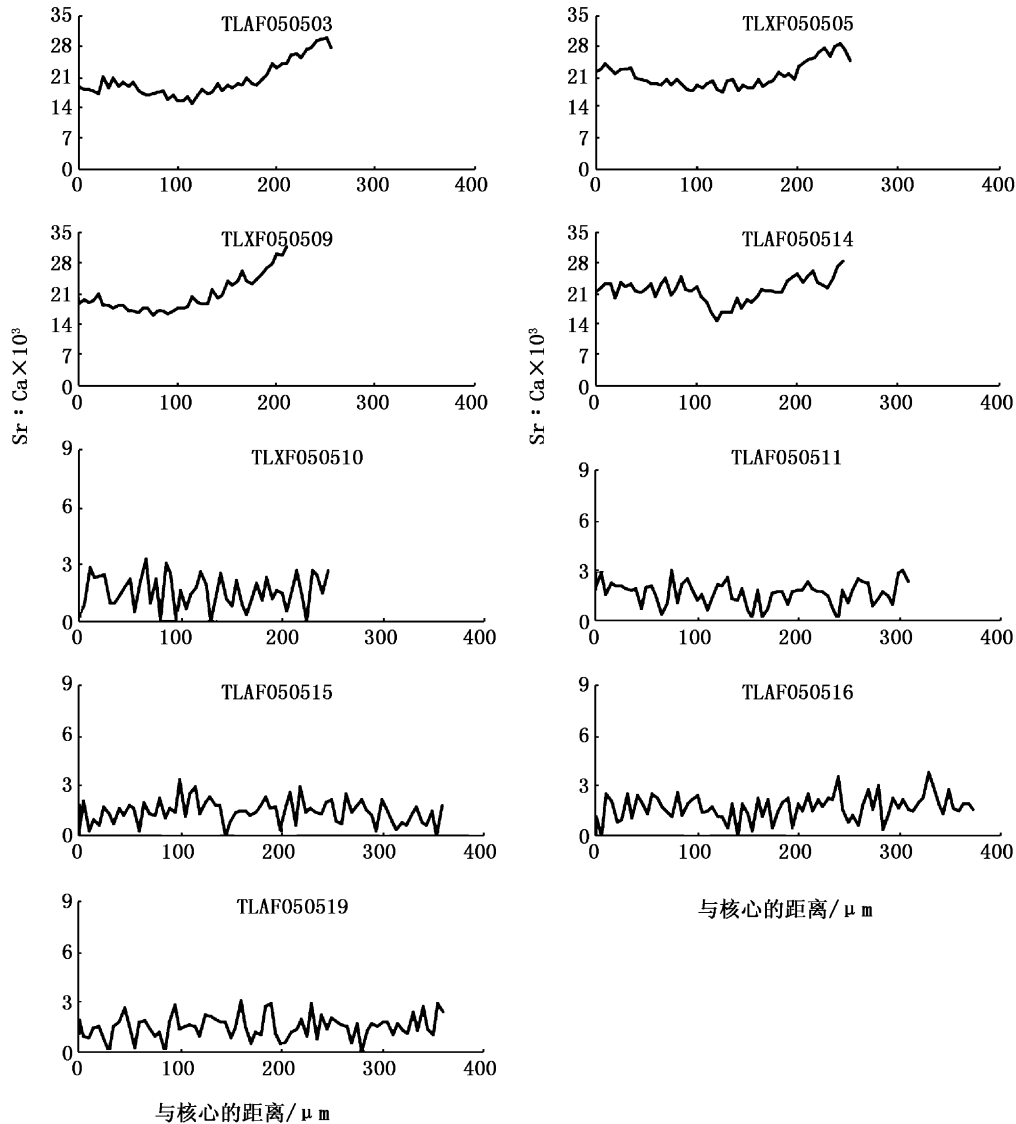
图 2 北太湖所采太湖新银鱼耳石矢状面从核心(0 μm)到耳石边缘定量线分析记录到的 Sr/Ca 值变化

Fig. 2 Fluctuation of otolith Sr:Ca ratios along line transects from the core (0 μm) to the edge in the sagittal plane of sagittal otoliths of *Neosalanx taihuensis* from northern Taihu Lake

2.2 元素面分布分析

据元素定量线的结果,我们可以从一定程度上了解到各地的太湖新银鱼的差异性,但是为了更加清晰而直观地了解耳石整体上元素“指纹”

的变化情况,笔者进一步对不同水域太湖新银鱼耳石样品进行了 Sr 元素面分布分析,以引证上述元素定量线分析所得到的结果。

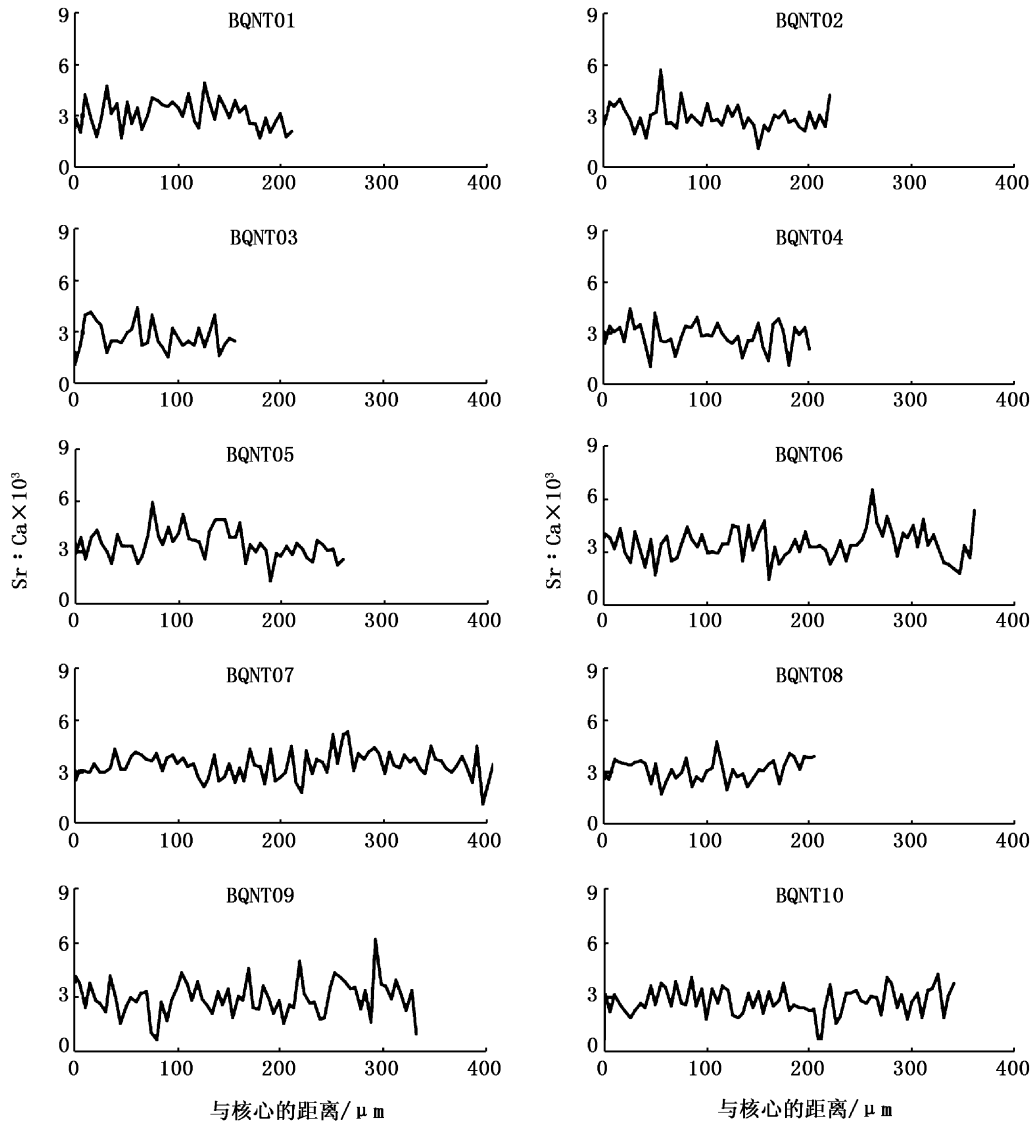


图3 南太湖所采太湖新银鱼耳石矢状面从核心(0 μm)到耳石边缘定量线分析记录到的 Sr/Ca 值变化
 Fig.3 Fluctuation of otolith Sr:Ca ratios along line transects from the core (0 μm) to the edge in the sagittal plane of sagittal otoliths of *Neosalanx taihuensis* from southern Taihu Lake

图5的结果可以非常鲜明地反映出2005年北太湖(吴塘门至乌龟山)所采到的太湖新银鱼耳石可分为2种类型:一种是低Sr型,表现为蓝色水平;一种为高Sr型,表现为红色水平。南太湖所采到的耳石样品则表现出明显较低的Sr分布的类型,表现为蓝色到绿色水平。虽然南太湖部分样品有Sr分布变化的情况,但整体而言其浓度水平上没有明显差异。而洪泽湖的耳石标本与太湖的耳石标本有明显的差别。洪泽湖样本的Sr浓度较高,普遍达到黄绿色水平。同时,大部分洪泽湖耳石标本Sr浓度分布可以分为3个阶段,即第一阶段为从耳石核心沿矢状面向边缘

至180~220 μm ,其Sr浓度为黄绿色;第二阶段为距离核心180~220 μm 处的高Sr环,高Sr环宽度约41~53 μm ,其Sr浓度达到红色水平;第三阶段为高Sr环后至耳石边缘,其Sr浓度与核心部分相似。

3 讨论

3.1 太湖水域太湖新银鱼耳石的微化学特征

太湖新银鱼为一年生的鱼类种群,其亲鱼在产卵后开始衰弱,并逐渐死亡。《江苏鱼类志》^[24]描述太湖所产的太湖新银鱼有春秋两季的繁殖群体,春季繁殖群体的产卵期为3月上旬到

5月中旬,盛产期为4月中、上旬;秋季繁殖群体的产卵期为9月中下旬到11月,盛产期为10月上、中旬。根据耳石日轮数的计数分析,发现北太湖的标本的日轮数差异不大,其高锶型以及低锶型的样本日轮数差异不足一个月,因此,推测这些样本来源于同一季节繁殖群体。而对于南太湖样本来说,其日轮数分为两个情况,第一种情况是日轮数为57轮左右,另一情况耳石日轮数为185轮左右,可以看出两类的耳石日轮数相差4个月的时间段,因此推测这批南太湖样本含有两季繁殖群体所产新银鱼个体。值得注意的是,南太湖虽然含有春秋两季所繁殖的新银鱼个体,但其Sr/Ca值之间没有显著的差异($P >$

0.05)。由此推测,同一水域太湖新银鱼春秋繁殖群体之间在耳石的锶钙积累上差异并不大;但北太湖产个体与南太湖产个体间的差异显著。这种现象可能反映出太湖内的太湖新银鱼确实应该存在不同的水域相对独立的资源群体。YE等^[22]的研究发现,生活在太湖不同水域的大银鱼体内元素含量和组成存在着显著差异,认为太湖中大银鱼有着不同水域资源群体的分布,且各水域群体间个体交流的可能性很小。本研究耳石微化学显示,太湖新银鱼与大银鱼存在类似的情况,即太湖内的太湖新银鱼资源分布可能也有着明显的地域性。

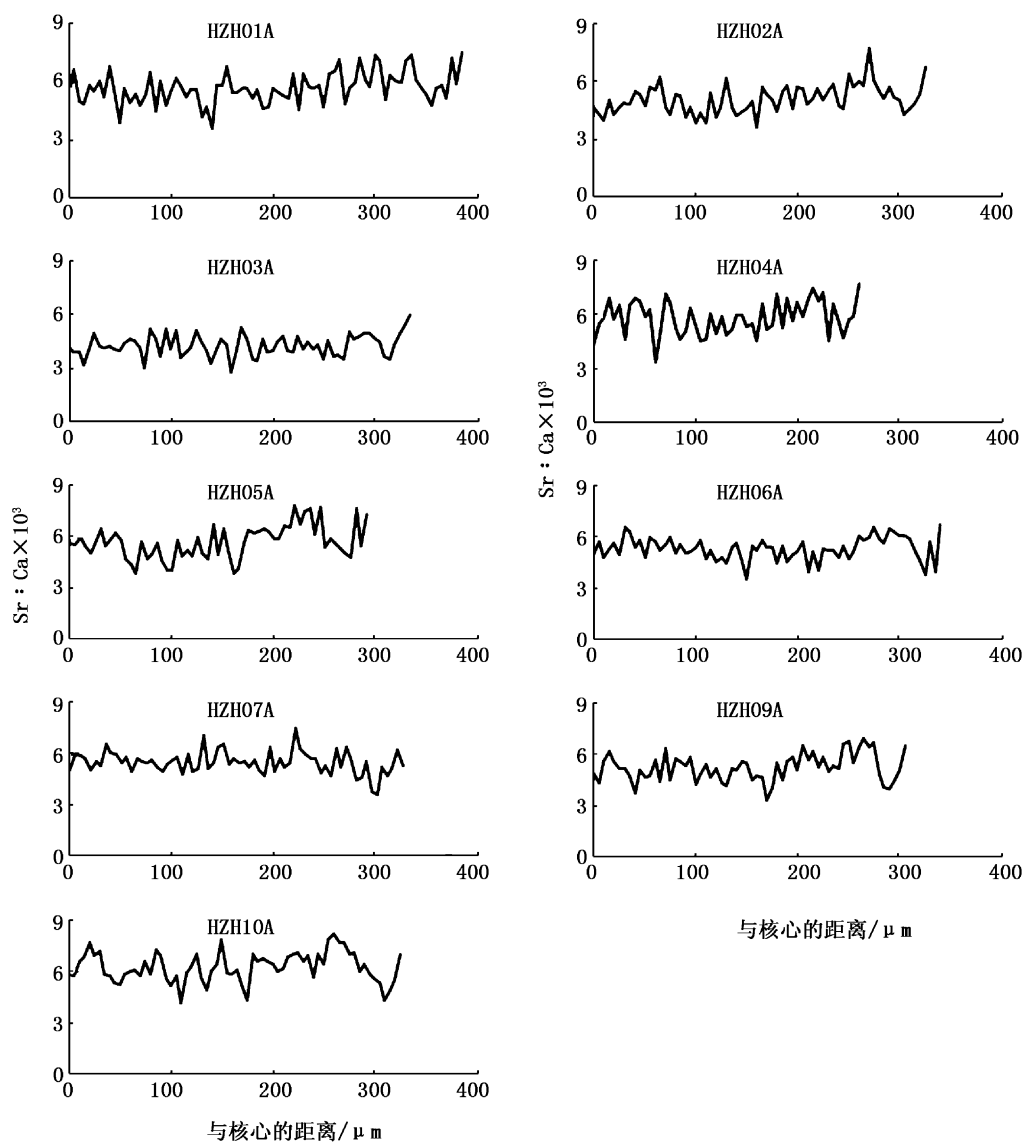


图4 洪泽湖所采太湖新银鱼耳石矢状面从核心(0 μm)到耳石边缘定量线分析记录到的Sr/Ca值变化

Fig. 4 Fluctuation of otolith Sr:Ca ratios along line transects from the core (0 μm) to the edge in the sagittal plane of sagittal otoliths of *Neosalanx taihuensis* from Hongze Lake

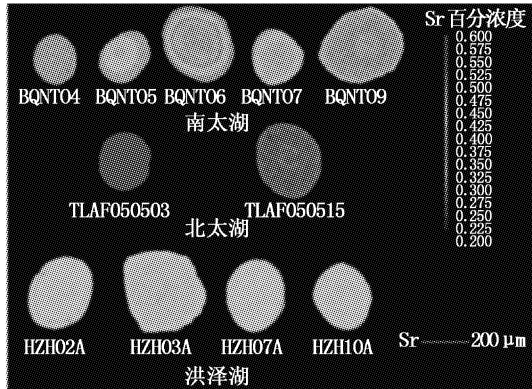


图5 太湖新银鱼耳石矢状面二维锶含量分布图

Fig. 5 Two-dimensional imaging using X-ray electron microprobe analysis of the Sr concentrations in the sagittal area of the otolith of *Neosalanx taihuensis*

锶浓度的值由蓝色(最低)经绿和黄色到红色(最高)的16种颜色表示。

表3 不同水域太湖新银鱼耳石的日轮数

Tab. 3 Daily-growth increments of sagittal otoliths of *Neosalanx taihuensis* from different water areas

	北太湖	北太湖低锶型	北太湖高锶型	南太湖 I 型	南太湖 II 型	洪泽湖
日轮数	147 ± 15	158 ± 6	135 ± 14	57 ± 8	185 ± 15	178 ± 18

注:北太湖指北太湖高锶型以及低锶型的总括。

3.3 太湖及洪泽湖太湖新银鱼耳石微化学的比较

张开翔等^[8]研究发现洪泽湖所产的太湖新银鱼也有春秋两季的繁殖群体。春季繁殖群体3月底至5月初产卵,盛产期为4月中下旬。其主要生长期在当年7-8月;秋季繁殖群体产卵期为9月中到10月中旬,盛产期为10月上、中旬。秋季群新银鱼在翌年5月上、中旬成长尤为迅速。每年银鱼汛期中所捕获太湖新银鱼以秋季群繁殖的鱼为主。据耳石日轮计数判断,本研究中洪泽湖新银鱼的个体间日轮数都集中在178日轮处,其差异只有半个月到一个月。因此推测,洪泽湖所采集到太湖新银鱼个体应该来自同一季节所繁殖的资源群体。

除去2005年太湖耳石样品中的高锶型外,其他太湖样本早期生活史阶段(对应于耳石核心处至距离核心15 μm处)的Sr/Ca值大约为0.25~0.37左右,而洪泽湖样品的早期生活阶段Sr/Ca值为0.37~0.55左右。就Sr/Ca平均值比较,除了2005年太湖耳石标本的高Sr型外,其他太湖耳石标本Sr/Ca值要低于洪泽湖的耳石标本($P < 0.05$)。综合而言,洪泽湖太湖新银鱼样品

3.2 耳石日轮数分析

耳石日轮由一条明亮的轮纹以及一条暗色轮纹组成。本研究中以暗色轮纹计数。太湖新银鱼样本日龄分析结果如表3所示。北太湖总体采集的样本日轮数平均为147轮。其中,低锶型标本日轮数平均为158轮,高锶型标本样本数平均为135轮,期间差异为23 d,因此认为其属于同一个繁殖群体的生物类群。而南太湖其日轮数则分为I型和II型两种。南太湖I型(BQNT01-04)的日轮数较少,平均为57轮;南太湖II型(BQNT05-10)的日轮数较多,平均为185轮。而洪泽湖标本的日轮数则比较统一,其标本的日轮数平均为178轮。

耳石较太湖样品耳石的Sr/Ca值有着显著性差异($P < 0.05$)。除了北太湖的高Sr型标本外,洪泽湖的耳石Sr/Ca值比太湖的均偏高。其结果显示太湖新银鱼耳石Sr/Ca值存在着明显的地域性差异,这显示出耳石锶及锶钙比的不同类型应该具有区别不同水域产太湖新银鱼资源的应用潜力。

3.4 太湖新银鱼耳石特殊微化学积累

如图5所示,北太湖所产太湖新银鱼耳石反映出存在着特殊的高Sr型类群(如TLAF050503、TLXF050505、TLXF050509、TLAF050514),其Sr/Ca值与其余太湖产样品的值有着显著的差异($P < 0.05$)。另外,洪泽湖产太湖新银鱼耳石中普遍存在着一个特殊的高Sr环(高Sr环位置的Sr/Ca比显著高于其耳石整体Sr/Ca值)。但是由于本研究太湖新银鱼采样的湖泊都是淡水湖,且其通江、通海河道均已被水闸等阻挡^[25-28],故本研究中太湖新银鱼应该都是淡水湖泊的定居性的个体,其部分耳石的高Sr情况应该是不同于在江海洄游鱼类耳石中所观察到的与水体盐度相关的高Sr现象。

耳石是一种位于鱼体内耳前庭区,用于听觉

和身体平衡的硬组织,其主要成分为碳酸钙(CaCO_3)并含有有机物及一些微量元素。耳石终生生长,具有代谢上的惰性,一旦积累,元素不可能被重吸收或者改变^[29-31]。耳石中的 Sr 元素积累受到环境因素如盐度、温度、环境元素含量等的影响^[32-34]。YANG 等^[35]总结在盐度有所变化的河海环境中,由于高盐度的海水中含 Sr 量远远高于低盐度的淡水,耳石的 Sr/Ca 比可反映野生洄游性鱼类生活海淡水环境的盐度情况,且盐度是影响耳石锶钙沉积的主要因素。然而,影响鱼类耳石元素的积累不仅仅是生境水域盐度或元素背景,食物、特殊的水环境条件、鱼类自身的生理状况等也可能是影响因素。KALISH^[33-34]与 GALLAHAR 和 KINGSFORD^[36]的研究则认为食物中 Sr 元素的含量等也是影响耳石锶钙沉积的原因;CHECKLEY 等^[37]研究有名锤形石首鱼(*Atractoscion nobilis*)发现,水体环境中 CO_2 容量的变化会改变其幼鱼耳石的大小。OTAKE 等^[38]发现星康吉鳗(*Conger myrisaster*)的变态发育过程中会受到 GAG(glycosaminoglycan, 葡萄糖胺聚糖)的影响使耳石中的锶元素积累下降;KALISH^[33]研究发现鱼类的性腺发育会对鱼体的血液以及淋巴液造成影响,进而影响耳石的锶钙积累。

因为太湖及洪泽湖为淡水湖泊,盐度及元素组成等较为稳定^[25-28]。就太湖的高 Sr 类型而言,由于同一时间在同一水域同样可以采集到低 Sr 型的新银鱼个体,因此推测太湖新银鱼耳石特殊高 Sr 积累可能与生境水域中盐度及锶的背景值等无关。笔者认为由于某些特殊原因,如水体理化因子的改变等,影响了部分银鱼钙元素的积累,而作为钙同族元素的锶元素则置换钙元素进入耳石内,而可能导致出现高锶微化学现象。2005 年,太湖的部分水域(主要是北太湖水域)发生了水华。水华造成了其生境水域水体理化因子,如光照、溶氧量、 CO_2 容量等的显著变化。CHECKLEY 等^[37]研究发现 CO_2 容量的变化会改变耳石的大小,LIMBURG 等^[39]发现缺氧的情况下会导致耳石微化学积累的变化,SANO 等^[40]通过研究发现光照变化对生物体硬组织 Sr/Ca 值会产生影响。因此太湖水华导致的环境特殊变化也许是导致太湖新银鱼耳石特殊元素微化学类型的原因。对于洪泽湖样本而言,其锶钙积累类

型的成因也值得深入分析。本次采样为 9 月,正值洪泽湖太湖新银鱼春季繁殖种群性成熟期到繁殖时间段,KALISH^[33]研究发现鱼类的性腺发育会对鱼体的血液以及淋巴液造成影响,进而影响耳石的锶钙积累。太湖新银鱼也可能是由于性腺发育影响了耳石的元素积累导致高 Sr 环的出现。同时,性成熟阶段鱼体消耗较大,其摄食量也随之改变,其摄食的改变情况亦可能是导致锶钙特殊沉积的原因。当然,造成太湖新银鱼耳石锶钙特殊沉积的具体成因现阶段尚无法确定,但这将是笔者下一步相关耳石微化学研究需要重点探索的内容。

参考文献:

- [1] 盖玉欣,王玉芬. 银鱼移植及其生物学技术的探讨[J]. 现代渔业信息, 1994, 9(4): 9-11.
- [2] 王忠锁,傅萃长,雷光春. 中国银鱼的多样性及其保护对策[J]. 生物多样性, 2002, 10(4): 416-424.
- [3] 尤洋, 尤琦. 太湖产太湖新银鱼的生态学和经济学效应的初步研究[J]. 西南民族学院学报:自然科学版, 1999, 25(3): 269-273.
- [4] WANG Z S, LU C, HU H J, et al. Freshwater icefishes (*Salangidae*) in the Yangtze River basin of China: spatial distribution patterns and environmental determinants [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2005, 73(3): 253-262.
- [5] WANG Z S, SHI J, XU C, et al. Degradation of icefishes (*Salangidae*) in the Yangtze River basin of China: threats and strategies[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, 86(1): 109-117.
- [6] 解玉浩,解涵. 银鱼科鱼类的分类分布和种群生态[J]. 水产学杂志, 1997, 10(2): 11-19.
- [7] 张玉玲. 银鱼科鱼类系统生物地理学初步研究. 系统进化动物学论文集(第二集) [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 65-77.
- [8] 张开翔,高礼存,张立,等. 洪泽湖所产太湖短吻银鱼的初步研究[J]. 水产学报, 1982, 6(1): 9-16.
- [9] 戈志强,朱江,沈其璋,等. 大银鱼 *Protosalans hyalocranius* (Abbott)沿海、河口原产地资源海洋农牧化(Farming and Ranching of Sea)的探讨[J]. 现代渔业信息, 2001, 16(12): 10-12.
- [10] 胡传林,刘家寿,彭建华,等. 我国银鱼研究概况及其移植的生态管理准则[J]. 湖泊科学, 2001, 13(3): 202-208.
- [11] 陈德富,胡廷尖,葛亚非,等. 太湖新银鱼(*N. taihuensis* Chen)的人工繁殖技术[J]. 福建水产, 1999(4): 38-43.
- [12] 盖玉欣,王玉芬. 太湖新银鱼对温度、盐度适应能力试验[J]. 中国水产科学, 1998, 5(4): 23-26.
- [13] 王玉芬,盖玉欣,庄玉兰,等. 增殖太湖新银鱼水体主要

- 生态因子的研究[J]. 中国水产科学, 1998, 5(1): 123 - 126.
- [14] 尤洋, 胡庚东, 王博. 大银鱼和太湖新银鱼口器结构研究[J]. 湛江海洋大学学报, 1999, 19(2): 30 - 33.
- [15] 刘恩生, 鲍传和, 吴林坤, 等. 太湖新银鱼、鲢鱼的食性比较及相互影响分析[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 103 - 110.
- [16] 孙帼英, 刘玲. 太湖新银鱼胚胎染色体组型分析[J]. 水产学报, 1990, 14(4): 357 - 358.
- [17] 张际峰, 汪承润, 王顺昌, 等. 鲢鱼、太湖新银鱼和大银鱼 18S rRNA 基因的克隆与序列分析[J]. 武汉大学学报:理学版, 2010, 56(1): 87 - 92.
- [18] 夏德全, 曹莹, 吴婷婷, 等. 太湖中大银鱼、太湖新银鱼和寡齿新银鱼群体的遗传结构[J]. 水产学报, 1999, 23(3): 254 - 260.
- [19] 张颖, 董仕, 王茜, 等. 大银鱼和太湖新银鱼同工酶遗传组成的研究[J]. 大连水产学院学报, 2005, 20(2): 111 - 115.
- [20] WU L, LIU J, WANG X, et al. Identification of individuals born in different spawning seasons using otolith microstructure to reveal life history of *Neosalanx taihuensis* [J]. Fisheries Science, 2011, 77(3): 321 - 327.
- [21] 杨青瑞, 刘建虎, 吴强, 等. 三峡水库太湖新银鱼耳石日轮与生长的研究[J]. 淡水渔业, 2007, 37(3): 59 - 62.
- [22] YE S S, YANG J, LIU H B, et al. Use of element fingerprint analysis to identify localities of collection for the large icefish *Protosalanx chinensis* in Taihu Lake, China [J]. Journal of The Faculty of Agriculture Kyushu University, 2011, 56(1): 41 - 45.
- [23] 杨健, 徐勋, 刘洪波. 太湖和洪泽湖大银鱼 (*Protosalanx hyalocranius*) 体内元素的积累特征及产地判别[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 201 - 207.
- [24] 倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 217 - 219.
- [25] 刘恩生, 刘正文, 陈伟民, 等. 太湖鱼类产量、组成的变动规律及与环境的关系[J]. 湖泊科学, 2005, 17(5): 251 - 255.
- [26] 张开翔, 庄大栋, 张立, 等. 洪泽湖所产大银鱼生物学及其增殖的研究[J]. 水产学报, 1981, 5(1): 29 - 39.
- [27] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 26 - 35.
- [28] 潘红玺, 王苏民. 中国湖泊矿化度的空间分布[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(2): 7.
- [29] 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.
- [30] CAMPANA S E. Otolith science entering the 21st century [J]. Marine and Freshwater Research, 2005, 56(5): 485 - 495.
- [31] CAMPANA S E. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications [J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, 188: 263 - 297.
- [32] CAMPANA S E, CHOUINARD G A, HANSON J M, et al. Otolith elemental fingerprints as biological tracers of fish stocks [J]. Fisheries Research, 2000, 46(1/3): 343 - 357.
- [33] KALISH J M. Otolith microchemistry: validation of the effects of physiology, age and environment on otolith composition [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1989, 132(3): 151 - 178.
- [34] KALISH J M. Determinants of otolith chemistry: seasonal variation in the composition of blood plasma, endolymph and otoliths of bearded rock cod *Pseudophycis barbatus* [J]. Marine Ecology Progress Series, 1991, 74(2/3): 137 - 159.
- [35] YANG J, JIANG T, LIU H B. Are there habitat salinity markers of Sr: Ca ratio in otolith of wild diadromous fishes a literature survey [J]. Ichthyological Research, 2011, 59(3): 291 - 294.
- [36] GALLAHAR N K, KINGSFORD M J. Patterns of increment width and strontium: calcium ratios in otoliths of juvenile rock blackfish, *Girella elevata* (M.) [J]. Journal of Fish Biology, 1992, 41(5): 749 - 763.
- [37] CHECKLEY D M, DICKSON A G, TAKAHASHI M, et al. Elevated CO₂ enhances otolith growth in young fish [J]. Science, 2009, 324(5935): 1683.
- [38] OTAKE T, ISHII T, ISHII T, et al. Changes in otolith strontium: calcium ratios in metamorphosing *Conger myrisaster* leptocephali [J]. Marine Biology, 1997, 128(4): 565 - 572.
- [39] LIMBURG K E, OLSON C, WALTHER Y, et al. Tracking baltic hypoxia and cod migration over millennia with natural tags [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(22): E177 - E182.
- [40] SANO Y, KOBAYASHI S, SHIRAI K, et al. Past daily light cycle recorded in the strontium/calcium ratios of giant clam shells [J]. Nature Communications, 2012, 3: 761.

Comparative study on otolith Sr : Ca ratios of *Neosalanx taihuensis* from Taihu Lake and Hongze Lake of China

ZHOU Xin-qi¹, LIU Hong-bo², JIANG Tao³, YANG Jian²

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Lab of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, Jiangsu, China; 3. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agriculture University, Wuxi 214081, Jiangsu, China)

Abstract: An electron probe microanalyzer was used to analyze the microchemistry of Sr and Ca in sagittal otoliths of the Salangid icefish *Neosalanx taihuensis* from southern (area of Baiquexiang) and northern (area between Wutangmen and Wuguishan) Taihu Lake, and Hongze Lake (area of Laozishan). The results of both the life history transect analysis and X-ray intensity mapping analyses clearly showed that there were two different patterns in otolith samples of *N. taihuensis* from northern Taihu Lake. One was characterized by high Sr : Ca ratios (Sr : Ca \times 1000) with a mean value of 21.41 (SD, 0.50; N = 4); whereas another showed low Sr : Ca ratios with a mean value of 1.64 (SD, 0.12; N = 5). In contrast, mean otolith Sr : Ca ratios of the fish from southern Taihu Lake was 3.12 (SD, 0.07; N = 10). That of *N. taihuensis* from Hongze Lake was 5.42 (SD, 0.32; N = 9). The difference of otolith Sr : Ca ratio values was statistically significant at a 5% level among the icefish from different water areas. In addition, the X-ray intensity maps showed that the otoliths of *N. taihuensis* from Hongze Lake presented high Sr concentric rings, while Sr distribution in those of the icefish from Taihu Lake were almost homogeneous. The results of the present study indicated that different microchemistry patterns of otolith existed not only between the icefishes from the Taihu Lake and Hongze Lake, but also existed between the icefishes from different water areas of Taihu Lake, suggesting a possibility to separate different geographic resources of *N. taihuensis* by means of the different features of otolith microchemistry.

Key words: *Neosalanx taihuensis*; otolith; electron probe microanalyzer; Sr: Ca ratio; otolith microchemistry