

文章编号: 1674-5566(2013)06-0821-06

长江口日本鳗鲡幼体矢耳石元素的 SRXRF 分析

张亚, 郭弘艺, 唐文乔, 李辉华, 张旭光, 吴嘉敏

(上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 2012年1-4月,在长江河口靖江段采集了一批溯河洄游中的日本鳗鲡幼鱼,对其中5尾幼鱼的矢耳石进行了全耳石SRXRF分析。结果表明,SRXRF分析可精确测得14种元素的含量,其中钙(Ca)和锶(Sr)的平均含量分别达240 215.928 $\mu\text{g/g}$ 和2 383.221 $\mu\text{g/g}$,是常量元素;其余12种均属于微量元素,含量从高至低依次为钡(Ba)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)、铬(Cr)、镍(Ni)、汞(Hg)、硒(Se)、钴(Co)、铜(Cu)、金(Au)、钒(V)。其中,钡(Ba)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)的平均含量在1~10 $\mu\text{g/g}$ 之间;铬(Cr)、镍(Ni)、汞(Hg)、硒(Se)、钴(Co)、铜(Cu)、金(Au)、钒(V)的平均含量在1 $\mu\text{g/g}$ 以下。从元素的空间分布及全部测试点的含量分析来看,矢耳石内钙(Ca)和锶(Sr)的变异系数仅为10.11%和21.83%,是含量最稳定的元素;锰(Mn)、锌(Zn)、铬(Cr)、镍(Ni)、钴(Co)、铜(Cu)的变异系数在23.11%~35.88%之间;钒(V)、汞(Hg)、铜(Au)和钡(Ba)的变异系数均超过50%;硒(Se)的变异系数达134.31%,是含量最不稳定的元素。研究还发现,日本鳗鲡幼体从海洋到淡水洄游的过程中,耳石中锶(Sr)与钙(Ca)的比值变化存在较长时间的时迟现象。

研究亮点: 本研究为国内首次采用同步辐射X射线荧光分析方法研究日本鳗鲡幼体矢耳石的化学组成和含量,探明了14种金属元素的空间分布,探讨了各元素之间的相互关系,首次提出了日本鳗鲡幼体从海洋到淡水的洄游过程中锶(Sr)与钙(Ca)的比值变化可能存在时迟现象的结论。
关键词: 日本鳗鲡幼体;矢耳石;元素含量空间分布;SRXRF分析;时迟现象
中图分类号: S 917
文献标志码: A

日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)是一种典型的降河性洄游鱼类,其产卵场已被证实位于菲律宾东部马里亚纳(Mariana)海沟附近(14°N,142~143°E)^[1]。其生活史包括柳叶鳗、玻璃鳗、线鳗、黄体鳗和银色鳗等5个发育阶段。刚孵化的仔鱼称为柳叶鳗,随洋流漂流至中国、朝鲜、日本的大陆架附近时变态成玻璃鳗,并在河口水域变态成为线鳗^[2]。线鳗进入河流,逐渐变态成黄体鳗,在淡水中生活4~8年直至性成熟。性成熟后的黄体鳗在降海洄游过程中逐渐变态成银色鳗,返回产卵场产卵后即死亡^[3-4]。

鱼类耳石具有代谢惰性(metabolic inertness),在生长发育过程中,水环境中的化学元素一旦被

耳石沉积,就很难再被机体吸收,成为记录鱼类生活史的元素指纹^[5-6]。因此,耳石微化学分析已成为解决鱼类生活史及环境史重新构建、出生地溯源、混合群体识别、种群鉴定、海洋环境反演等问题的关键技术^[7]。目前我国学者对日本鳗鲡的研究主要集中在鳗苗的资源动态^[8]、群体遗传多样性^[9-10]和早期生活史^[11-17]等方面,但关于耳石微化学及其应用方面的研究相对较少^[18]。本文利用先进的同步辐射X射线荧光(synchrotron radiation X-ray fluorescence, SRXRF)扫描微探针技术^[19],对洄游至长江河口段的日本鳗鲡幼体耳石元素作了分析,旨在为洄游性鱼类的耳石元素提供背景资料。

收稿日期: 2013-03-03

修回日期: 2013-04-26

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203065);上海海洋大学博士科研启动基金(B-8812-11-0193)

作者简介: 张亚(1987—),男,硕士研究生,研究方向为水生生态学。E-mail: aa22bb99@163.com

通信作者: 唐文乔, E-mail: wqtang@shou.edu.cn

1 材料与amp;方法

1.1 标本采集

于 2012 年 1-4 月日本鳗鲡苗捕捞季节,在长江靖江段(31°51'N, 121°14'E),从正在捕捞作业的渔船上采集鳗苗标本,每次采集不少于 50 尾。装入 50 cm × 30 cm 双层封口保鲜袋内,用冰块保存,带回实验室。用数显游标卡尺测量全长,电子分析天平称量体重。随机抽取 5 尾用作耳石元素分析,体长体重信息见表 1。

表 1 日本鳗鲡幼鱼的色素发育阶段、日龄、体长、体重和采样时间

Tab.1 The pigmentation stages, daily age, total length, body weight and sampling date of Japanese eel larvae collected in Jingjiang section of Yangtze River

编号	色素期	日龄/d	体长/mm	体重/g	采样时间
JJ-1	V _A	145	59.73	0.126	2012-1-24
JJ-2	V _A	160	59.46	0.131	2012-2-9
JJ-3	VI _{A1}	162	56.53	0.122	2012-3-22
JJ-4	VI _{A2}	177	57.69	0.111	2012-4-19
JJ-5	VI _{A1}	160	57.26	0.123	2012-4-19

1.2 耳石样品制备

选取 3 对耳石中最大的矢耳石作为元素分析对象。从耳囊中取出矢耳石,用去离子水清洗干净后,剔除耳石外薄膜,用 3 M 胶带将耳石粘在靶架上,测定元素组成。测量结束后,从胶带上取下耳石,环氧树脂包埋固定。用 2 000 目砂纸打磨直至可见清晰的耳石核心,用 8 000 目 Al₂O₃ 抛光液抛光,去离子水超声波清洗。干燥后,密封保存于聚乙烯离心管中备用。

1.3 元素测定方法

在上海光源(SSRF)的硬 X 射线微聚焦线站(BL15U1)上,采用同步辐射 X 射线荧光分析(SRXRF)测定耳石元素的含量。入射 X 射线由波荡器产生,用硅 Si(111)单色器选取 17.0 keV 的 X 射线,经 K-B 镜聚焦成 2.4 μm × 2.0 μm 的光斑,用 Si 漂移单元探测器采集元素的特征 X 射线信号,探测器与耳石样本间的介质为空气,多道分析器记录。在监测显微镜视窗中精确定位耳石磨片的位置,以每点 5 μm 的间隔和相邻两条扫描线 7 μm 的间隔进行整个耳石的面扫描,分析测试耳石元素的组成和含量(图 1)。扫描时,单点的测量时间为 2 s,样品放置位置与入射

X 射线的夹角为 45°,探测器水平方向与入射线夹角为 90°。

数据采用欧洲同步辐射装置(ESRF)的 PyMca 软件分析。为定量分析所测试耳石的元素含量,测量值采用美国国家标准局(NIST)的玻璃基痕量元素标样进行标定,标样的编号是 SRM 611,最终可获得耳石元素的绝对含量。

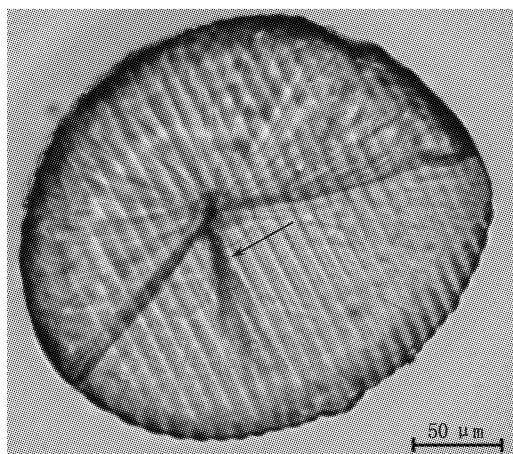


图 1 SRXRF 实验扫描过的耳石

Fig.1 The sagittal otolith detected by SRXRF

1.4 数据分析

变异系数(Coefficient of variation, C_v)的计算公式为:

$$C_v = S/M \times 100 \quad (1)$$

式中: M 为耳石面扫描全部测试点含量的均值($\mu\text{g/g}$); S 为全部测试点含量的标准差。

用 Microsoft Excel 2007 软件和 SPSS 16.0 统计软件进行数据分析和绘图。

2 结果

2.1 耳石的元素组成和含量

SRXRF 测试的介质为空气,原子序数在 19 K 以下的 Na、K 等元素,因其所激发的特征 X 射线可以被空气吸收,故不能对这些元素作定量的分析。分析测得的日本鳗鲡幼鱼耳石元素有 14 种,其平均含量见表 2。14 种元素中,以 Ca 的含量最高,平均为 240 215.928 $\mu\text{g/g}$;Sr 的含量其次,平均为 2 383.221 $\mu\text{g/g}$;其余 12 种元素的含量均很小,含量从高至低依次为 Ba、Fe、Mn、Zn、Cr、Ni、Hg、Se、Co、Cu、Au、V。其中, Ba、Fe、Mn、Zn 的平均含量在 1 ~ 10 $\mu\text{g/g}$ 之间;Cr、Ni、Hg、

Se、Co、Cu、Au、V 的平均含量在 1 $\mu\text{g/g}$ 以下。

表 2 还列出了 5 个矢耳石经面扫描获得的全部测试点各元素含量的平均变异系数,可见,Ca 的变异系数最小,仅为 10.11%;Se 的变异系数最大,达 134.31%;V、Hg、Au 和 Ba 的变异系数

均超过 50%;Mn、Zn、Cr、Ni、Co、Cu 等的变异系数接近,在 23.11%~35.88%之间。这表明 Ca 的含量不仅高而且很稳定,Se 的含量低也最不稳定。

表 2 长江口日本鳗鲡幼体矢耳石各元素含量

Tab.2 The otolith elements concentrations of *Anguilla japonica* larval eels collected from Jingjiang section of Yangtze River Estuary

元素	JJ-1	JJ-2	JJ-3	JJ-4	JJ-5	均值/($\mu\text{g/g}$)	平均变异系数/%
Ca	265 490.286 \pm 14 148.115	200 131.288 \pm 36 005.253	250 858.403 \pm 9 116.295	268 252.273 \pm 55 063.65	216 347.391 \pm 6 591.580	240 215.928 \pm 24 184.980	10.11
V	0.005 \pm 0.004	0.008 \pm 0.005	0.005 \pm 0.003	0.007 \pm 0.005	0.005 \pm 0.004	0.006 \pm 0.004	73.26
Cr	0.747 \pm 0.229	0.844 \pm 0.317	0.992 \pm 0.271	0.943 \pm 0.370	0.829 \pm 0.371	0.871 \pm 0.311	35.88
Mn	4.393 \pm 1.517	5.026 \pm 2.003	4.451 \pm 1.518	4.449 \pm 1.519	4.350 \pm 1.521	4.534 \pm 1.616	35.52
Fe	6.538 \pm 1.158	8.795 \pm 5.880	6.486 \pm 2.129	6.913 \pm 2.436	6.006 \pm 2.072	6.948 \pm 2.735	37.43
Co	0.312 \pm 0.015	0.409 \pm 0.149	0.276 \pm 0.120	0.336 \pm 0.053	0.293 \pm 0.088	0.325 \pm 0.085	26.11
Ni	0.675 \pm 0.027	0.722 \pm 0.229	0.575 \pm 0.223	0.711 \pm 0.137	0.555 \pm 0.130	0.647 \pm 0.149	23.42
Cu	0.237 \pm 0.036	0.279 \pm 0.064	0.215 \pm 0.076	0.262 \pm 0.049	0.226 \pm 0.053	0.244 \pm 0.056	23.11
Zn	2.690 \pm 0.901	2.740 \pm 0.956	2.438 \pm 0.812	2.604 \pm 0.872	2.565 \pm 0.852	2.607 \pm 0.879	33.68
Se	0.329 \pm 0.405	0.407 \pm 0.494	0.525 \pm 0.679	0.320 \pm 0.461	0.451 \pm 0.612	0.406 \pm 0.542	134.31
Sr	2 560.771 \pm 44.774	1 868.983 \pm 870.863	2 641.462 \pm 497.217	2 281.379 \pm 450.840	2 563.509 \pm 569.946	2 383.221 \pm 486.728	21.83
Ba	8.276 \pm 4.368	13.989 \pm 9.608	7.677 \pm 4.266	8.705 \pm 4.428	8.971 \pm 4.870	9.524 \pm 5.508	56.43
Au	0.139 \pm 0.041	0.314 \pm 0.232	0.130 \pm 0.085	0.165 \pm 0.061	0.150 \pm 0.086	0.180 \pm 0.101	52.54
Hg	0.586 \pm 0.237	0.768 \pm 0.816	0.614 \pm 0.237	0.646 \pm 0.488	0.678 \pm 0.408	0.658 \pm 0.437	64.22

2.2 各元素在耳石内的空间分布

统计分析了经过耳石核心这条扫描线的元素含量,除 Ca 以外,5 个耳石自核心至边缘的平均元素含量见图 2。可见,Ba、Se、V、Cr、Mn、Au、Zn 等元素在整个耳石各测量点的含量并不稳定,这些元素种类与上一节提到的平均变异系数较大元素基本一致。在除 Ca 以外的 13 种元素中,Ba、Se、V、Cr、Zn、Hg 等在整个耳石空间的含量变化没有明显的上升或下降趋势,但 Sr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Au 等的含量则具有明显的变化趋势。其中,Fe 族元素的 Mn、Fe、Co、Ni 和 Cu 族元素的 Cu、Au,从耳石的核心至边缘,基本均呈现出波浪式递增的变化趋势,在耳石边缘时出现最大值。Sr 是 13 种元素中含量最高的,自耳石核心附近的最大值,逐步降低至耳石边缘的最低值。

2.3 耳石元素含量的相关性分析

为探讨耳石内各个元素含量的相互联系,将全部元素的平均含量作了 Pearson 相关性分析,分析结果见表 3。可见(1)耳石内 Ca 与 Sr 元素的含量呈现极显著的负相关($r = -0.821, P = 0.000 < 0.01$);(2)Ba 与铁族元素 Co、Ni、铜族元

素 Au 的含量呈显著或极显著的正相关;(3)铁族元素 Mn、Fe、Co、Ni 之间的含量均呈显著或极显著的正相关;而 Fe、Co、Ni 还与铜族元素 Cu、Au 之间的含量呈显著或极显著的正相关;(4)铜族元素 Cu 与 Au 的含量为极显著的正相关;(5)V、Cr、Se、Zn 和 Hg 之间,及其与其他元素的含量之间均无显著的相关性。

3 讨论

同步辐射光源具有高强度、高度准直、高度极化、特性可精确控制等优异性能,SRXRF 技术具有流强大、分析灵敏度高、探测限低、空间分辨率好(最小可达纳米级)、对样品损伤小、韧致辐射小、多元素同时分析等优点,尤其适用于微小样品的高分辨率无损分析,已广泛应用于材料科学、生命科学、医学以及环境科学等研究^[19]。

本文用 SRXRF 技术的测量表明,Ca 是矢耳石中最稳定的常量元素,平均含量占其总重量的 24.02%。Sr 的平均含量也占耳石重的 0.24%,如果按生物学的元素分类,也属于常量元素。但 Ba、Fe、Mn、Zn 的平均含量在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 之间,

Cr、Ni、Hg、Se、Co、Cu、Au、V 的平均含量则在 1×10^{-6} 以下,都属于微量元素。在所测定的 14 种元素中,Ca、Fe、Cr、Mn、Cu、Zn、Co、V、Ni、Se 等 10 种为必需元素,Sr 为可能必需元素,Au、Ba、Hg 等

3 种为非必需元素。从全部测试点各元素含量的平均变异系数看,Se 和 V 以及 3 种非必需元素 Au、Ba、Hg 的变异系数均超过 50%,表明这些元素的含量在耳石中是不稳定的。

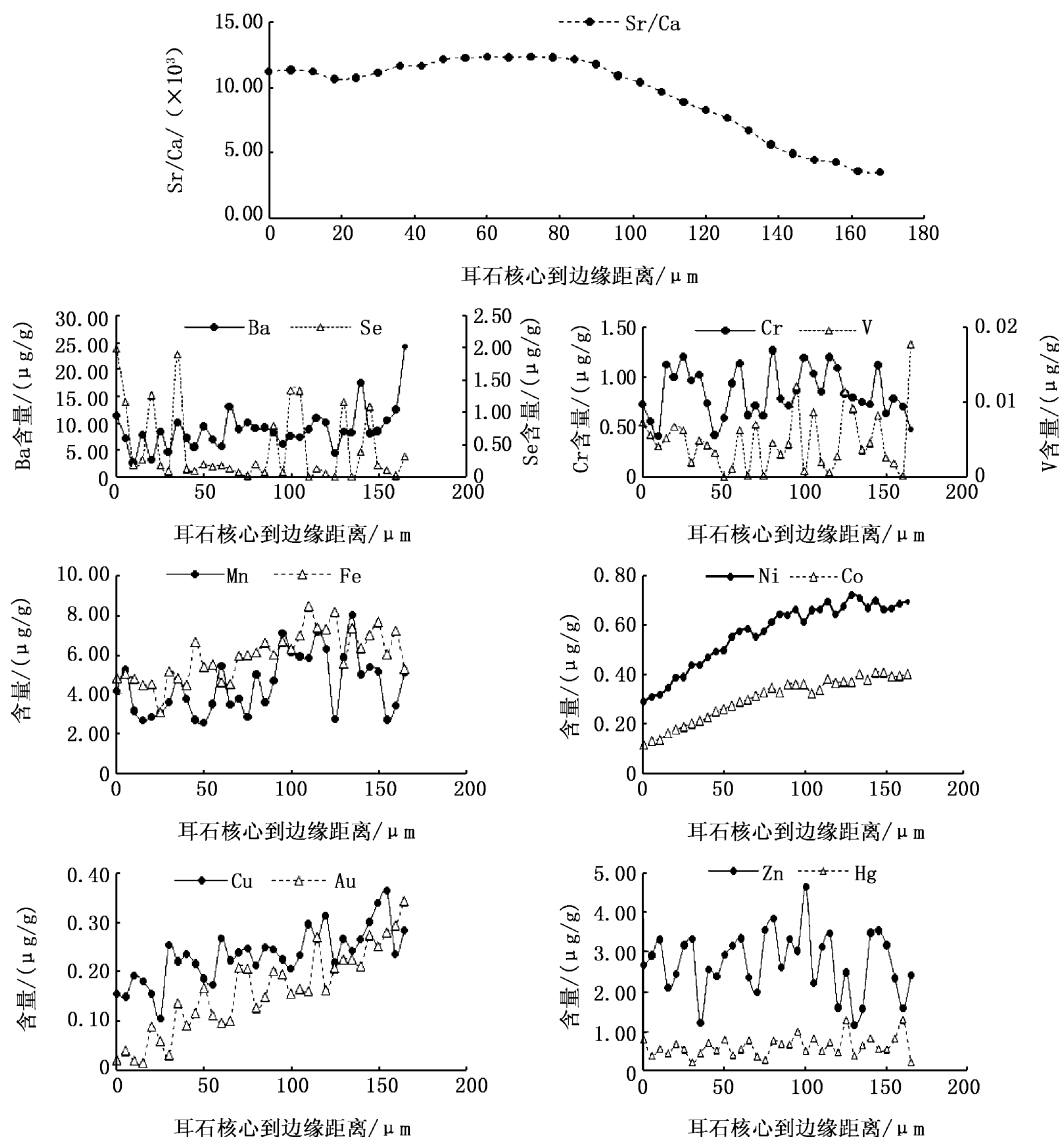


图 2 日本鳗鲡幼体矢耳石核心至边缘各元素平均含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average element contents from the core to edge of sagittal otolith from Japanese eel larvae

Sr 与 Ca 均为 II_A 族元素,具有相似的化学性质和生理功能^[20-21]。在耳石碳酸钙的沉积过程中,Sr 可以置换 Ca 元素而进入耳石的晶格中^[22-23]。由于海水中 Sr 的含量约比淡水高 2 个数量级,因此 Sr 与 Ca 比值的突然下降一直被作为是表征日本鳗鲡幼体从海洋到淡水生活履历的元素指纹^[23-25]。我们前期的研究已经表

明^[17],鳗苗到达长江口的日龄为 (141.0 ± 3.4) d,也即 Sr 与 Ca 的比值在这一时期理应出现突然下降的现象。但本研究表明,靖江江段线鳗矢耳石 Sr 的含量自 120 日龄左右开始直至 160 日龄左右被捕获,一直呈平缓的下降趋势,没有出现突然下降的现象。因此我们认为,日本鳗鲡幼体从海洋到淡水洄游的过程中,Sr 与 Ca 的比值并

没有立即被响应,耳石可能存在较长时间的时迟 现象。

表 3 长江靖江段日本鳗鲡幼体矢耳石各元素含量间的相关性
Tab.3 Pearson correlation analysis about otolith element contents of Japanese eel larvae collected in Jingjiang section of Yangtze River

相关系数	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Ba	Au	Hg
V	1											
Cr	-0.029	1										
Mn	0.184	0.300	1									
Fe	-0.077	-0.019	0.429 *	1								
Co	0.052	0.070	0.457 **	0.718 **	1							
Ni	0.078	0.090	0.488 **	0.717 **	0.979 **	1						
Cu	-0.044	-0.055	0.324	0.579 **	0.729 **	0.710 **	1					
Zn	-0.195	0.198	0.035	0.006	0.014	-0.040	-0.083	1				
Se	0.240	0.178	0.159	-0.250	-0.317	-0.302	-0.282	-0.084	1			
Ba	0.198	-0.203	0.149	0.028	0.388 **	0.354 *	0.296	-0.121	-0.022	1		
Au	0.173	-0.110	0.330	0.607 **	0.896 **	0.854 **	0.667 **	-0.127	-0.189	0.521 **	1	
Hg	0.002	0.011	-0.064	0.331	0.241 **	0.260	-0.047	-0.078	-0.103	-0.062	0.210	1

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关。

感谢上海光源的和友研究员、张丽丽、张玲、王华和郑怡博士在 SRXRF 分析过程中给予的热忱指导和帮助。

参考文献:

- [1] TSUKAMOTO K. Spawning of eels near a seamount [J]. *Nature*, 2006, 439(7079): 929-929.
- [2] CHENG P W, TZENG W N. Timing of metamorphosis and estuarine arrival across the dispersal range of the Japanese eel *Anguilla japonica* [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 131: 87-96.
- [3] TSUKAMOTO K, OTAKE T, MOCHIOKA N, et al. Seamounts new moon and eel spawning: the search for the spawning site of the Japanese eel [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2003, 66 (3): 221-229.
- [4] TSUKAMOTO K, AOYAMA J. Migration, speciation and the evolution of diadromy in anguillid eels [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, 59(12): 1989-1998.
- [5] CAMPANA S E. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 188: 263-297.
- [6] CAMPANA S E, THORROLD S R. Otoliths increments and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(1): 30-38.
- [7] 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.
- [8] 刘凯, 段金荣, 徐东坡, 等. 长江口日本鳗鲡苗汛特征及捕捞量时空变动 [J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(6): 814-822.
- [9] 龚小玲, 李思发, 王成辉. 长江口日本鳗鲡群体遗传多样性 RAPD 初步分析 [J]. *上海水产大学学报*, 2007, 16(3): 201-206.
- [10] 张辛, 许璞, 许广平, 等. 中国东海日本鳗鲡种群遗传结构的 AFLP 分析 [J]. *水生态学杂志*, 2010, 3(1): 82-86.
- [11] 李城华. 日本鳗鲡补充群体的日龄, 全长, 出生时间及耳石生长的变化 [J]. *海洋学报*, 1998, 20(4): 107-113.
- [12] 李勃, 解玉浩, 刘义新. 鳗鲡幼鱼耳石日轮的研究 [J]. *动物学研究*, 1992, 24(4): 345-349.
- [13] 解玉浩, 李勃, 富丽静, 等. 中国沿海河口地区鳗苗群体结构的研究 [J]. *中国水产科学*, 1997, 4(5): 33-38.
- [14] 熊国强, 邓思明, 减增嘉, 等. 中国沿海日本鳗鲡幼苗群体鉴别研究 [J]. *动物学报*, 1992, 38(3): 254-265.
- [15] 富丽静, 解玉浩, 李勃. 中国沿海代表性河口地区鳗苗群体形态特征的比较研究 [J]. *动物学研究*, 1996, 17(3): 203-210.
- [16] 郭弘艺, 魏凯, 谢正丽, 等. 中国东南沿海日本鳗鲡幼体的日龄及其孵化时间 [J]. *水产学报*, 2011, 35(7): 1050-1058.
- [17] 郭弘艺, 魏凯, 唐文乔, 等. 中国东南沿海日本鳗鲡幼体的发育时相及其迁徙路径分析 [J]. *水产学报*, 2012, 36(12): 1793-1800.
- [18] 郭弘艺, 郑怡, 唐文乔, 等. 基于矢耳石 Sr/Ca 值的长江日本鳗鲡迁移格局多样性分析 [J]. *动物学研究*, 2011, 32(4): 442-450.
- [19] 秦玉, 樊春海, 黄庆, 等. 大科学装置同步辐射光源在生命分析化学中的应用 [J]. *中国科学: 化学*, 2010, 40(1): 22-30.
- [20] 吕志选, 于宙, 王广仪. 元素生物学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011: 154-350.
- [21] 王顺年. 微量元素与保健 [M]. 北京: 人民军医出版社, 2009: 1-8.

- [22] 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相应[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 18-24.
- [23] ARAI T, HIRATA T. Determination of trace elements in otoliths of chum salmon *Oncorhynchus keta* by laser ablation-ICP-mass spectrometry[J]. Fisheries Science, 2006, 72(5): 977-984.
- [24] ARSLAN Z, SECOR D H. Analysis of trace transition elements and heavy metals in fish otoliths as tracers of habitat use by American eels in the Hudson River Estuary[J]. Estuaries, 2005, 28(3): 382-393.
- [25] LE D Q, CHINO N, SHIRAI K, et al. Trace metals in Japanese eel *Anguilla japonica* in relation to ecological migratory types and growth stages[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 87(3): 405-410.

Elemental SRXRF analysis of sagittal otolith of Japanese eel larvae collected from Yangtze River Estuary

ZHANG Ya, GUO Hong-yi, TANG Wen-qiao, LI Hui-hua, ZHANG Xu-guang, WU Jia-min

(Ministry of Education Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Japanese eel larvae *Anguilla japonica* were collected in Jingjiang section of Yangtze River Estuary from January to April, 2012. The elements of sagittal otolith extracted from five larval eels were detected by using synchrotron radiation X-ray fluorescence (SRXRF). Results showed that fourteen elements could be accurately detected. It included two major elements Ca and Sr, the average contents of which in otolith could reach 240 215.928 $\mu\text{g/g}$ and 2 383.221 $\mu\text{g/g}$ respectively. The other twelve were recognized as minor elements. Their contents sequentially decreased in the following order: Ba, Fe, Mn, Zn, Cr, Ni, Hg, Se, Co, Cu, Au, V. The average concentrations of Ba, Fe, Mn, Zn were 1-10 $\mu\text{g/g}$ and the average concentrations of the other elements Cr, Ni, Hg, Se, Co, Cu, Au, V were less than 1 $\mu\text{g/g}$. According to spatial distribution and the content variation of all measured elements, Ca and Sr were the most stable elements whose coefficient of variation were 10.11% and 21.83%. By comparison, the coefficient of variation of Mn, Zn, Cr, Ni, Co varied from 23.11% to 35.88% and V, Hg, Au, Ba even exceeded 50%. The most unsteady element was Se for its coefficient of variation reached 134.31%. We also found that the variation of Sr/Ca ratios might be delayed in the otolith when Japanese eels larvae migrated from sea to freshwater.

Key words: Japanese eel larvae; sagittal otolith; element concentration spatial distribution; SRXRF analysis; time lag phenomenon