

DOI: 10.12264/JFSC2023-0257

阿根廷滑柔鱼耳石核心与边缘元素的比较

陈昭凯¹, 林东明^{1, 2, 3, 4}

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306;
3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306

摘要: 生物体硬组织中的元素是重构其生活史过程和栖息环境的重要自然标记物。为探究阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)耳石核心与边缘元素的时空变化, 本研究利用 LA-ICP-MS 法测定其耳石核心和边缘的元素含量, 计算分析 Sr、Ba、Mg 和 Mn 与 Ca 的比值, 并利用混合模型分析这 4 种元素与 Ca 的比值在耳石边缘与核心之间的关系。结果显示, 耳石核心和边缘的 Ba/Ca 值均存在雌雄差异, 且耳石核心的 Ba/Ca 值存在显著的孵化月份差异, 而雄性个体耳石边缘的 Ba/Ca 值在不同采样月份间差异显著; 耳石核心的 Sr/Ca 值和边缘的 Ba/Ca 值在不同采样站点纬度重心之间差异显著($P < 0.05$)。耳石核心的 Sr/Ca、Ba/Ca 和 Mg/Ca 值显著高于耳石边缘的对应元素比值, 而 Mn/Ca 值在耳石核心与边缘之间没有显著差异($P > 0.05$)。混合模型结果显示, 雌性个体耳石边缘的元素比值与耳石核心对应元素比值之间没有效应关系, 而雄性个体耳石边缘的 Ba/Ca 和 Mn/Ca 值均随着耳石核心的 Ba/Ca 和 Mn/Ca 值增大而增大。研究表明, 阿根廷滑柔鱼耳石核心与边缘之间的 Sr、Ba 和 Mg 元素存在差异, 且 Ba 元素的差异存在雌雄特殊性。本研究为进一步揭示阿根廷滑柔鱼生活史的环境选择适应性及掌握该种类资源变动规律提供了基础数据。

关键词: 阿根廷滑柔鱼; 耳石; 元素; 海洋环境; 西南大西洋

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)11-1348-16

在生物体中, 维持正常生理机能的必需元素可直接或间接地参与机体的生理生化过程^[1]。海洋生物个体在与外界环境进行物质交换时, 环境中的元素通过呼吸、摄食等方式进入体内, 并可在生理代谢循环后进入内淋巴并沉积在耳石等硬组织中^[2]。元素的沉积与耳石等硬组织轮纹的形成相一致, 沉积浓度可以表征水生动物的生活史过程及其栖息环境条件, 被看作是一种重要的自然标记物^[2-3]。头足类是重要的海生软体动物, 因其寿命短、生长快、世代更替时间短且资源量丰富^[4], 已经被联合国粮农组织认定为最具开发潜力的海洋生物资源, 近 5 年的年均渔获量占全球

海洋渔业产量的 5%~6%^[5-6]。然而, 这些种类对栖息海域的环境波动变化敏感, 且具有索饵洄游和产卵洄游的生活习性, 生活史早期容易受到栖息海域的地形、洋流等的影响^[7-8], 亚成体至成体期则与饵料丰富度、海域环境等密切相关^[9]。头足类在这两个时期的正常生长发育是维持其生物量的关键, 也是资源可持续开发利用的基础^[10-11]。因此, 通过比较分析头足类耳石核心与边缘的元素及其组成变化, 可为掌握它们生活史早期及生长发育期的栖息环境提供重要参考^[12-13], 有助于深入了解其资源变动规律。

阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)是典型的大洋

收稿日期: 2023-10-16; **修订日期:** 2023-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41876144); 上海市人才发展资金项目(2020107); 上海市自然科学基金资助项目(16ZR1415400).

作者简介: 陈昭凯(1999-), 男, 硕士, 研究方向为头足类繁殖生物学. E-mail: 2629479928@qq.com

通信作者: 林东明, 高级工程师, 研究方向为头足类繁殖生物生态学. E-mail: dmlin@shou.edu.cn

性头足类, 隶属于头足纲(Cephalopoda)、枪形目(Teuthoidea)、柔鱼科(Ommastrephidae), 分布在 $22^{\circ}\text{S}\sim 54^{\circ}\text{S}$ 的西南大西洋, 且相对集中分布于 200 m 等深线附近的大陆架和大陆坡水域^[9,14-15]。该种类生活史早期及繁殖产卵期主要发生在巴西南部的巴西海流(Brazil Current, BC)与马尔维纳斯海流(Malvinas Current, MC)交汇区, 生长发育期则主要发生在南巴塔哥尼亚大陆架的马尔维纳斯海流区域^[16]。通常, 仔鱼的栖息水温为 $12\sim 17^{\circ}\text{C}$, 生长发育期的栖息水温则可低至 4°C ^[17]。然而, Crespi-Abril 等^[18]发现阿根廷近海圣马蒂亚斯湾也是阿根廷滑柔鱼的繁殖产卵场, 且是索饵育肥场。Torres Alberto 等^[19]则发现繁殖产卵场若发生在巴西南部大陆坡海域, 阿根廷滑柔鱼补充成功率几乎为零, 而若发生在 $45^{\circ}\text{S}\sim 48^{\circ}\text{S}$ 的巴塔哥尼亚陆架海域, 其补充成功率可达 52%。最近, Chemshirova 等^[20]也发现孵化场及索饵育肥场的水温变化影响阿根廷滑柔鱼成体大小及补充资源量。可见, 阿根廷滑柔鱼早期生活史及生长发育阶段对栖息海域及环境选择仍存在较多的不确定。为此, 本研究将采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术对阿根廷滑柔鱼耳石中的元素进行测定, 分析耳石核心和耳石边缘的元素与钙的比值, 研究其比值在不同采样月份(孵化月份)、不同采样站点纬度重心及不同性腺发育时期的变化, 以探讨阿根廷滑柔鱼孵化期(耳石核心)与捕获时期(耳石边缘)的栖息海域环境特点, 为揭示其早期生活史和捕获时期的栖息地选择提供数据基础, 并为掌握该种类资源变动及可持续开发利用提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 样本来源

阿根廷滑柔鱼样本采集自我国远洋鱿钓作业渔船的渔获物, 采集时间为 2021 年 2—4 月, 采样海域为西南大西洋公海 $41^{\circ}31'\text{S}\sim 45^{\circ}48'\text{S}$ 、 $57^{\circ}32'\text{W}\sim 63^{\circ}36'\text{W}$ (图 1)。根据鱿钓作业渔船流动作业的特点, 每个站点随机取样, 样本采集经冷冻保存后运回实验室进行生物学分析。

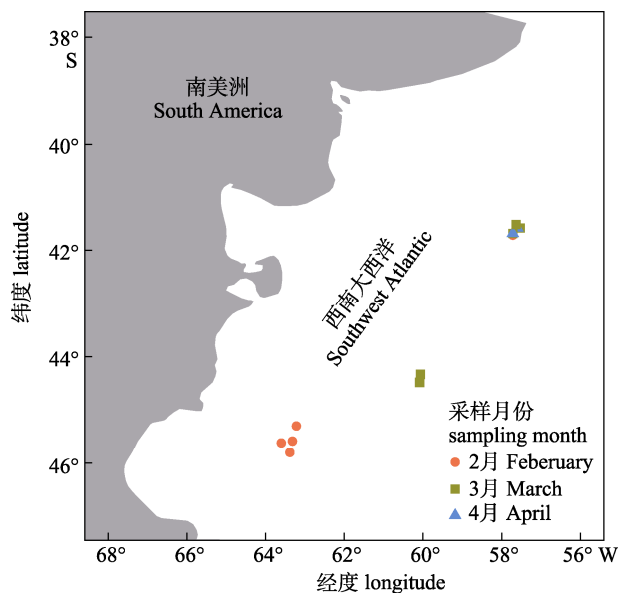


图 1 西南大西洋阿根廷滑柔鱼采样海域和采样站点

Fig. 1 Sampling area and sampling stations of *Illex argentinus* in the southwest Atlantic Ocean

1.2 生物学测定分析

阿根廷滑柔鱼样本在实验室常温解冻后, 进行生物学测定, 测定分析项目包括胴长(mantle length, ML)、体重(body weight, BW)、性别及性腺成熟度。胴长和体重的测定分别精确到 1 mm 和 1 g。性腺成熟度以林东明等^[21]的划分标准为基础, 结合实验观察, 将阿根廷滑柔鱼实验样本的性腺成熟度划分为 I、II、III、IV、V、VI、VII 和 VIII 共 8 个时期。其中, I~II 期为性腺未发育期, III 期为生理性发育期, IV~VI 期为性腺发育成熟期, VII 期为繁殖期, VIII 期为繁殖后期。

生物学数据测定后, 利用解剖刀和镊子从样本头部的平衡囊处取出完整耳石, 然后编号并置于 75%乙醇溶液中保存, 以便清除耳石表面的有机物和包裹的软膜。根据采样月份和站点, 每个成熟度随机选取 5 尾样本完整的耳石(不足 5 尾则全部取样)。本研究中用于耳石元素分析的样本共 63 尾(表 1), 2 月、3 月和 4 月的样本数量分别为 23 尾、30 尾和 10 尾。同时, 根据 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的空间分辨率, 将采样站点归类为 3 组, 记录每组采样站点的纬度重心, 分别为 41°S 、 44°S 和 45°S , 其中 41°S 重心 36 尾, 44°S 重心 12 尾, 45°S 重心 15 尾。

表 1 阿根廷滑柔鱼耳石元素分析的实验样本数量
Tab. 1 Sample size of *Illex argentinus* specimens used for analyzing trace elements of statolith

性腺成熟度 gonad maturity stage	雌性 female	雄性 male
I	6	7
II	6	5
III	5	6
IV		9
V		8
VI	5	6
合计 pooled	22	41

1.3 耳石切片制备及轮纹判读

将耳石放入长方形塑料模具中，经包埋、硬化之后，逐次使用 80、600、1200 和 2000 grits 的防水耐磨砂纸在研磨机上沿耳石纵切面研磨至核心。待研磨完毕之后，使用 0.3 μm 氧化铝水绒布抛光耳石切片以备摄像处理。制备好的耳石切片置于全自动正置荧光显微镜(Axio Imager M2)下观察，并拍摄高清照片，随后利用图像处理软件拼接处理以备耳石轮纹判读。在判读过程中，每一个耳石的轮纹由观察者计数 2 次，若 2 次计数的值与均值的差值低于 5%，则认为计数准确，否则再计数 2 次取 4 次平均值^[22-23]。阿根廷滑柔鱼的耳石轮纹形成为一日一轮纹，其核心往外的第一条轮纹代表孵化日^[24]。在本研究中，以判读的耳石轮纹数量作为实验样本的日龄，根据日龄和捕获日期逆推个体的孵化日期，即孵化日期=捕获日期-日龄^[13]。

1.4 耳石元素测定

在阿根廷滑柔鱼耳石元素测定之前，使用电阻率大于 18 MΩ·cm 的去离子水清洗耳石切片 5 min，以去除表面杂质。随后沿着耳石核心至边缘的最长轴，利用 LA-ICP-MS 技术测定耳石核心和耳石边缘的元素(图 2)。LA-ICP-MS 的激光剥蚀系统为 NWRIImageGEO-193，电感耦合等离子体质谱为 Agilent 7900，激光剥蚀直径为 30 μm，激光频率为 4 Hz，激光能量密度为 4 J/cm²，激光剥蚀过程载气为氦气(He, 0.6 L/min)。以巨型蛤蜊化石粉末压片标样 Jct-1-NP 和国际人造玻璃标样 NIST-612 作为间插标样，采用“样品-标准品间插法”定量分析元素浓度，每 10 个样品点插入一组

标样。利用 Iolite4 软件对采样数据进行离线处理，得到元素浓度^[25]。

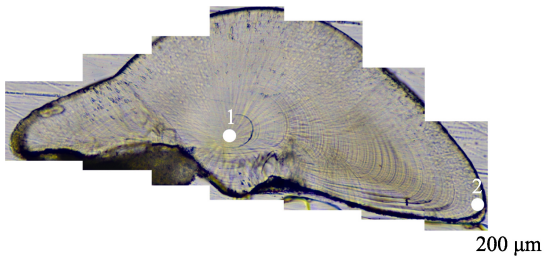


图 2 阿根廷滑柔鱼耳石切片及核心与边缘元素分析的测试点

1: 核心测试点; 2: 边缘测试点.

Fig. 2 The statolith section of *Illex argentinus* and the sampling points in the core and edge for trace element determination

Sampling points 1 and 2 represent the sites for trace element determination in the core and edge of statolith, respectively.

1.5 数据处理

在本研究中，选用锶(Sr)、钡(Ba)、镁(Mg)和锰(Mn) 4 种元素与钙(Ca)元素的比值进行元素的处理分析[如，锶钙比(Sr/Ca)]，单位为 μg/g。Sr、Ba、Mg 和 Mn 元素的最低检出限分别为 0.01、0.06、1.82 和 0.58 μg/g，相对标准偏差(%RSD)分别为 1.20%、1.42%、2.12%和 2.61%。Sr 元素是耳石沉积过程中不可缺少的元素，可以指示头足类栖息环境的盐度和温度变化，且是影响头足类幼体游泳行为的重要元素^[26-27]；Ba 元素被认为可以指示海洋中的上升流事件，也是头足类垂直运动的指示标志物^[28-30]；Mg 元素被认为在耳石钙化过程中起着重要作用^[31]，且与生理变化密切相关^[32-33]；生物个体的 Mn 元素对外部因素(环境)和内在因素(生理)都很敏感，可同时作为栖息环境及其个体生理变化的示踪元素^[34]。

利用单样本 Kolmogorov-Smirnoff 检验分析耳石核心与边缘元素与钙比值分布的正态性。若符合正态分布，利用 *t* 检验分析阿根廷滑柔鱼耳石核心和边缘的元素与钙比值在不同性别之间的差异；利用单因素方差分析(ANOVA)检验耳石核心元素与钙比值在不同孵化月份之间的差异，耳石边缘元素与钙比值在不同采样月份、不同性腺发育成熟度等之间的差异，并利用 Tukey HSD 进

行差异性随后检验。若不符合正态分布, 则利用卡方检验(χ^2)分析耳石核心和边缘元素与钙比值的雌雄性差异; 利用 Kruskal-Wallis 非参数检验分析各数据分布在不同孵化月份(或不同采样月份)、性腺发育成熟度之间的差异, 并利用 Games-Howell HSD 进行随后的差异性检验。同时, 检验分析耳石核心、耳石边缘元素与钙比值在不同采样站点纬度重心之间的差异性。

为进一步了解耳石核心与边缘元素之间的关系, 利用线性混合效应模型(linear mixed-effects models, LMM)分别拟合分析雌性、雄性个体元素在耳石核心与边缘之间的效应关系, 模型随机效应因子为采样月份。LMM 模型采用 R 语言 lmerTest 数据包进行处理。

所有数据的统计分析均运用 R 语言^[35]进行处理, 结果用平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm SD$)表示。统计分析的显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

阿根廷滑柔鱼的胴长为(218.33 $\pm$ 20.49) mm (179~289 mm), 体重为(219.84 $\pm$ 63.39) g (110~470 g)。胴长和体重均存在显著的雌雄差异($P<0.05$)。其中, 雌雄性个体的平均胴长分别为(236.95 $\pm$ 16.43) mm 和(208.34 $\pm$ 14.70) mm, 平均体重分别为(253.64 $\pm$ 65.14) g 和(201.71 $\pm$ 55.09) g。耳石轮纹判读分析发现, 阿根廷滑柔鱼的日龄为 120~227 d ([174.37 $\pm$ 24.68] d), 但不存在雌雄差异($P>0.05$), 雌雄个体的平均日龄分别为(179.41 $\pm$ 13.57) d 和

(171.66 $\pm$ 28.74) d; 雌性个体的孵化月份为 8—10 月, 雄性个体的孵化月份为 7—11 月。

2.1 耳石核心的元素

分析显示, 阿根廷滑柔鱼耳石核心区的 Sr/Ca、Ba/Ca、Mg/Ca 和 Mn/Ca 值分别为 14030.77~27577.64 $\mu\text{g/g}$ 、19.73~64.85 $\mu\text{g/g}$ 、73.49~360.34 $\mu\text{g/g}$ 和 1.01~6.51 $\mu\text{g/g}$ 。显著性检验结果显示, 仅 Ba/Ca 值存在显著的雌雄差异($P<0.05$), 以雌性个体的 Ba/Ca 值最大, 为(44.78 $\pm$ 10.57) $\mu\text{g/g}$ (表 2)。

在不同孵化月份之间, 雌雄性个体耳石核心的 Sr/Ca 值均没有显著差异, 而 Ba/Ca 值均存在显著差异($P<0.05$)。雌雄性个体均以 10 月孵化个体的 Ba/Ca 值最大, 分别为(50.31 $\pm$ 6.80) $\mu\text{g/g}$ 和(33.40 $\pm$ 10.80) $\mu\text{g/g}$ (图 3b)。同时, 雌性个体耳石核心的 Mg/Ca 和 Mn/Ca 值没有显著的孵化月份间差异; 雄性个体耳石核心的 Mg/Ca 值和 Mn/Ca 值则存在显著的孵化月份差异($P<0.05$)。其中, 雄性个体耳石核心的 Mg/Ca 值在孵化月份 9 月时最大, 为(285.55 $\pm$ 43.46) $\mu\text{g/g}$, 随后呈下降趋势(图 3c); Mn/Ca 值则在孵化月份 7 月时最大, 为(5.41 $\pm$ 1.29), 随后整体呈下降趋势(图 3d)。

在不同采样站点纬度重心之间, 雌雄性个体耳石核心的 Sr/Ca 值均存在显著差异($P<0.05$), 并且雌雄性个体均以采样站点纬度重心 45°S 的 Sr/Ca 值为最大, 分别为(22357.26 $\pm$ 3290.43) $\mu\text{g/g}$ 和(20539.60 $\pm$ 1086.28) $\mu\text{g/g}$ 。然而, 雌雄性个体耳石核心的 Ba/Ca、Mg/Ca 和 Mn/Ca 值则均没有显著的采样站点纬度重心间差异(图 4)。

表 2 阿根廷滑柔鱼耳石核心微量元素比值的雌雄差异性分析结果
Tab. 2 Statistic result of difference in the ratio of trace element content to Ca content in the statolith core between female and male *Illex argentinus*

元素/($\mu\text{g/g}$) element	性别 sex		统计结果 statistic result			
	雌性 female	雄性 male	统计方法 statistic method	t	P	
锶钙比 Sr/Ca	16533.63~27577.64 (19734.28 $\pm$ 2398.02)	14030.77~23977.47 (19155.81 $\pm$ 2036.40)	t 检验 t test	0.94	0.35	
钡钙比 Ba/Ca	27.60~64.85 (44.78 $\pm$ 10.57)	19.73~57.21 (29.30 $\pm$ 6.89)	t 检验 t test	6.12	7.61 $\times 10^{-7}$	
镁钙比 Mg/Ca	128.24~360.34 (236.62 $\pm$ 84.75)	73.49~341.28 (193.60 $\pm$ 86.60)	t 检验 t test	1.71	0.10	
锰钙比 Mn/Ca	2.26~6.51 (3.96 $\pm$ 1.16)	1.01~6.33 (3.21 $\pm$ 1.52)	t 检验 t test	1.95	0.06	

注: 括号内数据表示为平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm SD$).
Note: Value in parenthesis is mean $\pm$ standard deviation ($\bar{x} \pm SD$).

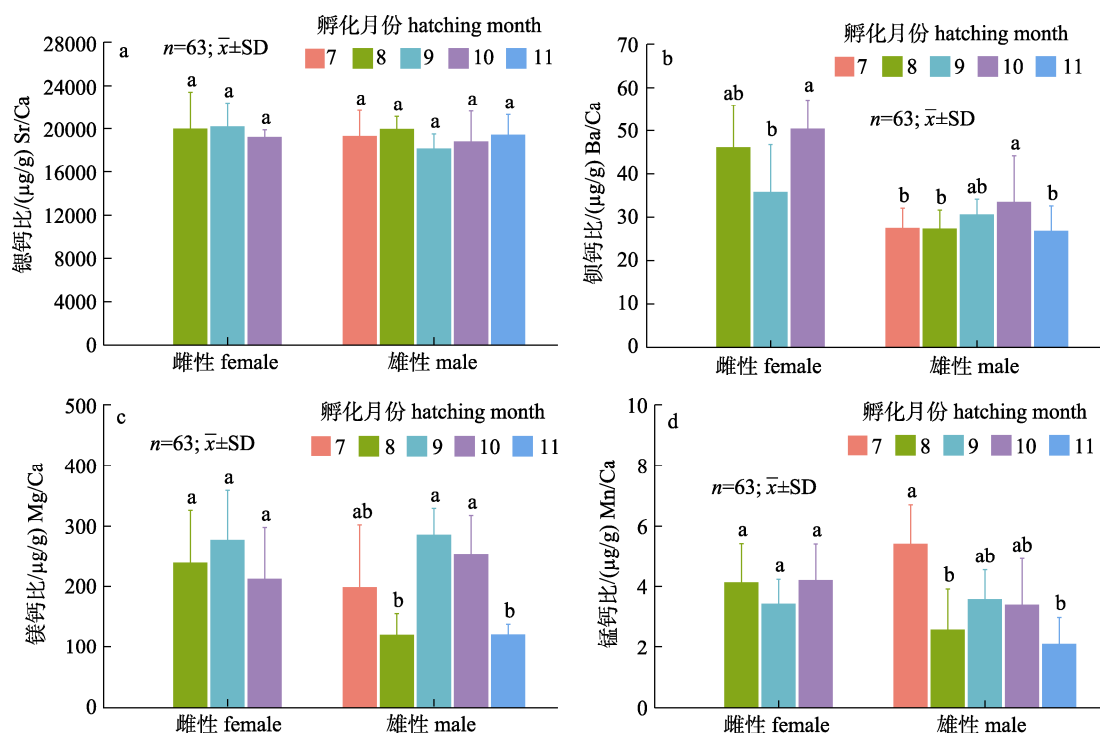


图 3 阿根廷滑柔鱼耳石核心元素的孵化月份分布
柱形图上方不同字母表示不同月份间差异显著($P<0.05$).

Fig. 3 Distribution of elements in the statolith core of *Illex argentinus* by hatching months
Different letters on the top of columns indicate significant differences among different hatching months ($P<0.05$).

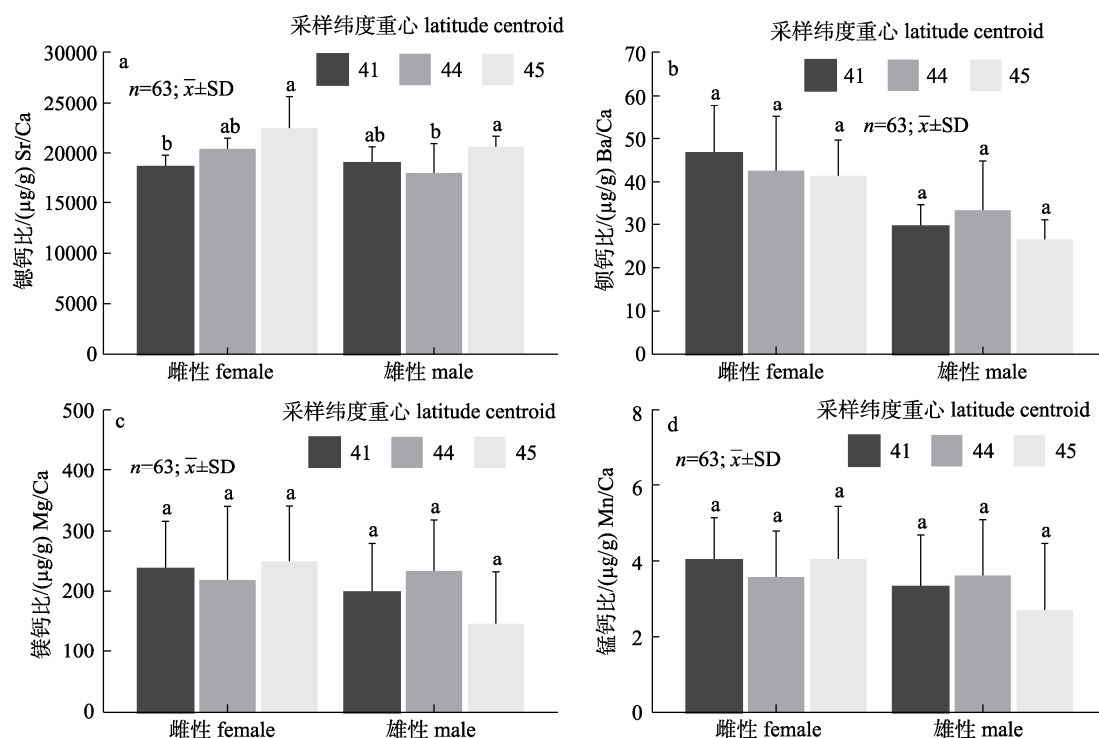


图 4 阿根廷滑柔鱼耳石核心元素的采样纬度重心分布
柱形图上方不同字母表示不同采样纬度重心间差异显著($P<0.05$).

Fig. 4 Distribution of elements in the statolith core of *Illex argentinus* by sampling latitude centroid
Different letters on the top of columns indicate significant difference among different sampling latitude centroids ($P<0.05$).

2.2 耳石边缘元素

分析显示, 阿根廷滑柔鱼耳石边缘区的 Sr/Ca、Ba/Ca、Mg/Ca 和 Mn/Ca 分别为 13000.70~19657.70 $\mu\text{g/g}$ 、14.86~41.70 $\mu\text{g/g}$ 、65.67~269.42 $\mu\text{g/g}$ 和 1.85~7.98 $\mu\text{g/g}$ 。显著性检验结果显示, 仅 Ba/Ca 值存在显著的雌雄差异($P<0.05$), 以雌性个体的 Ba/Ca 值最大, 为(30.50 $\pm$ 5.20) $\mu\text{g/g}$ (表 3)。

不同采样月份之间, 雌雄性个体耳石边缘的

Sr/Ca、Mg/Ca 和 Mn/Ca 值均不存在显著差异(图 5)。雌性个体的 Ba/Ca 值也不存在采样月份间差异; 但雄性个体的 Ba/Ca 值则存在显著的采样月份差异($F=3.35$, $P<0.05$), 在 3 月达到最大值, 为(27.24 $\pm$ 4.15) $\mu\text{g/g}$ (图 5b)。

在不同采样站点纬度重心之间, 雌性个体耳石边缘的 Sr/Ca、Mg/Ca 和 Mn/Ca 值均没有显著差异(图 6); 但雌雄性个体的 Ba/Ca 值存在显著

表 3 阿根廷滑柔鱼耳石边缘微量元素比值的雌雄差异性分析结果

Tab. 3 The results of significant testing for elements in the statolith edge between female and male *Illex argentinus*

元素/($\mu\text{g/g}$) element	雌性 female	雄性 male	统计结果 statistic result		
			统计方法 statistic method	t	P
锶钙比 Sr/Ca	15016.81–19657.70 (16762.27 $\pm$ 1174.81)	13000.70–18679.43 (16901.67 $\pm$ 1066.54)	t 检验 t test	−0.43	0.67
钡钙比 Ba/Ca	20.98–41.70 (30.50 $\pm$ 5.20)	14.86–38.18 (24.57 $\pm$ 6.50)	t 检验 t test	3.55	0.00
镁钙比 Mg/Ca	65.67–231.39 (127.27 $\pm$ 41.39)	67.08–269.42 (143.45 $\pm$ 51.32)	t 检验 t test	−1.12	0.27
锰钙比 Mn/Ca	1.90–5.81 (3.57 $\pm$ 1.15)	1.85–7.98 (4.08 $\pm$ 1.64)	t 检验 t test	−1.20	0.24

注: 括号内数据表示为平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm\text{SD}$)。
Note: Value in parenthesis is mean $\pm$ standard deviation ($\bar{x}\pm\text{SD}$).

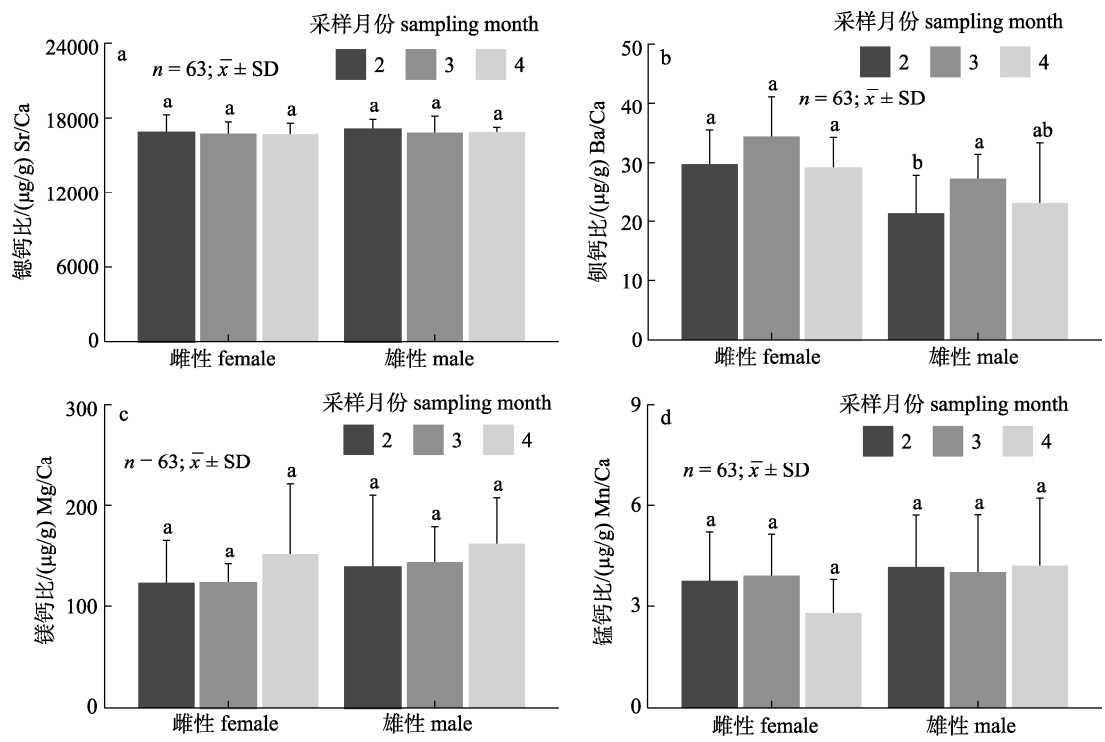


图 5 阿根廷滑柔鱼耳石边缘元素采样月份分布
柱形图上方不同字母表示不同月份间差异显著($P<0.05$).

Fig. 5 Distribution of elements in the statolith edge of *Illex argentinus* by sampling month
Different letters on the top of columns indicate significant difference among different months ($P<0.05$).

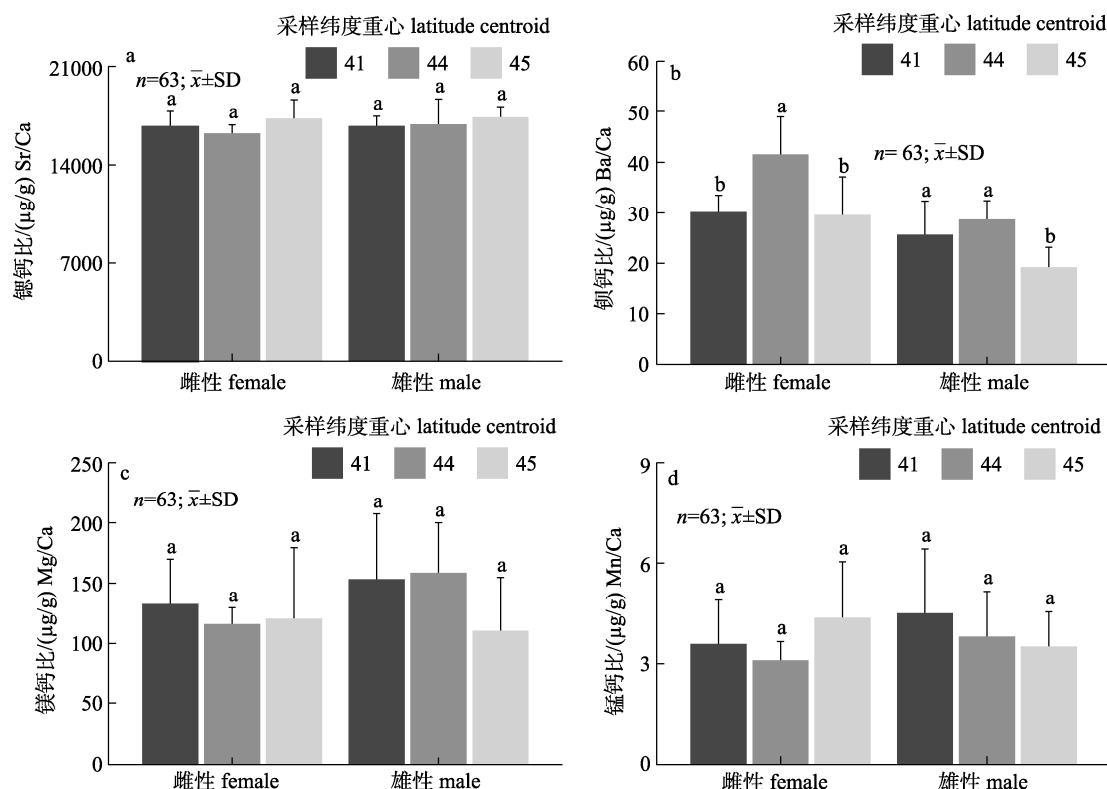


图 6 阿根廷滑柔鱼耳石边缘元素的采样纬度重心分布

柱形图上方不同字母表不同采样纬度重心间差异显著($P < 0.05$).

Fig. 6 Distribution of elements in the statolith edge of *Illex argentinus* by sampling latitude centroid

Different letters on the top of columns indicate significant difference among different sampling latitude centroids ($P < 0.05$).

的采样站点纬度重心间差异($P < 0.05$), 且雌雄性个体均以在纬度重心 44°S 的 Ba/Ca 值最大, 分别为 $(41.41 \pm 7.50) \mu\text{g/g}$ 和 $(28.61 \pm 3.80) \mu\text{g/g}$ 。

此外, 在不同性腺发育时期, 雌雄性个体耳石边缘的 Sr/Ca、Ba/Ca、Mg/Ca 和 Mn/Ca 值均没有显著差异(图 7)。

2.3 耳石核心与边缘元素的关系

显著性检验结果显示, Sr/Ca、Ba/Ca 和 Mg/Ca 值均存在显著的耳石核心与边缘之间的差异($P < 0.05$), 以雌性个体耳石核心 Sr/Ca、Ba/Ca 和 Mg/Ca 值为最大, 分别为 $(19864.68 \pm 2418.84) \mu\text{g/g}$ 、 $(44.78 \pm 10.57) \mu\text{g/g}$ 和 $(236.62 \pm 84.75) \mu\text{g/g}$ (图 8a~c)。然而, Mn/Ca 值在耳石核心与边缘之间没有显著性差异($P > 0.05$)(图 8d)。

线性混合模型结果显示, 阿根廷滑柔鱼雌性个体耳石边缘的 Sr/Ca、Ba/Ca、Mg/Ca 和 Mn/Ca 值均与其耳石核心的对应元素值没有显著的效应关系($P > 0.05$, 表 4)。雄性个体耳石边缘的 Ba/Ca

和 Mn/Ca 值与其耳石核心的对应元素存在显著的效应关系($P < 0.05$), 耳石边缘的 Ba/Ca 和 Mn/Ca 值均随着耳石核心的 Ba/Ca 和 Mn/Ca 值增大而增大(图 9), 模型解析率分别为 49%和 22% (表 4)。

3 讨论

类似于其他头足类种类, 阿根廷滑柔鱼为雌雄二态型, 即雌性体型较雄性的, 且雌性个体性腺发育滞后于雄性个体^[4,36]。在本研究中, 阿根廷滑柔鱼雌性个体胴长和体重均大于雄性个体, 然而雌雄性个体日龄相近, 平均日龄在 180 d 左右。结合采样月份为 2—4 月, 这些结果可以推测本研究的阿根廷滑柔鱼雌雄性个体的孵化时间相同, 且孵化月份主要发生在南半球的冬末至春季, 而 2—4 月是其主要的索饵育肥期。

3.1 耳石核心和边缘的锶元素

水生生物硬组织中的锶(Sr)元素可以指示其栖息环境的温度变化, 并且两者往往呈负相关关

系^[26]。在头足类种类中, 来自冷水区的太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)耳石 Sr 含量高于暖水区

个体的 Sr 含量^[37], 福克兰群岛沿岸海域的巴塔哥尼亚枪乌贼(*Doryteuthis gahi*)耳石 Sr 含量与海域

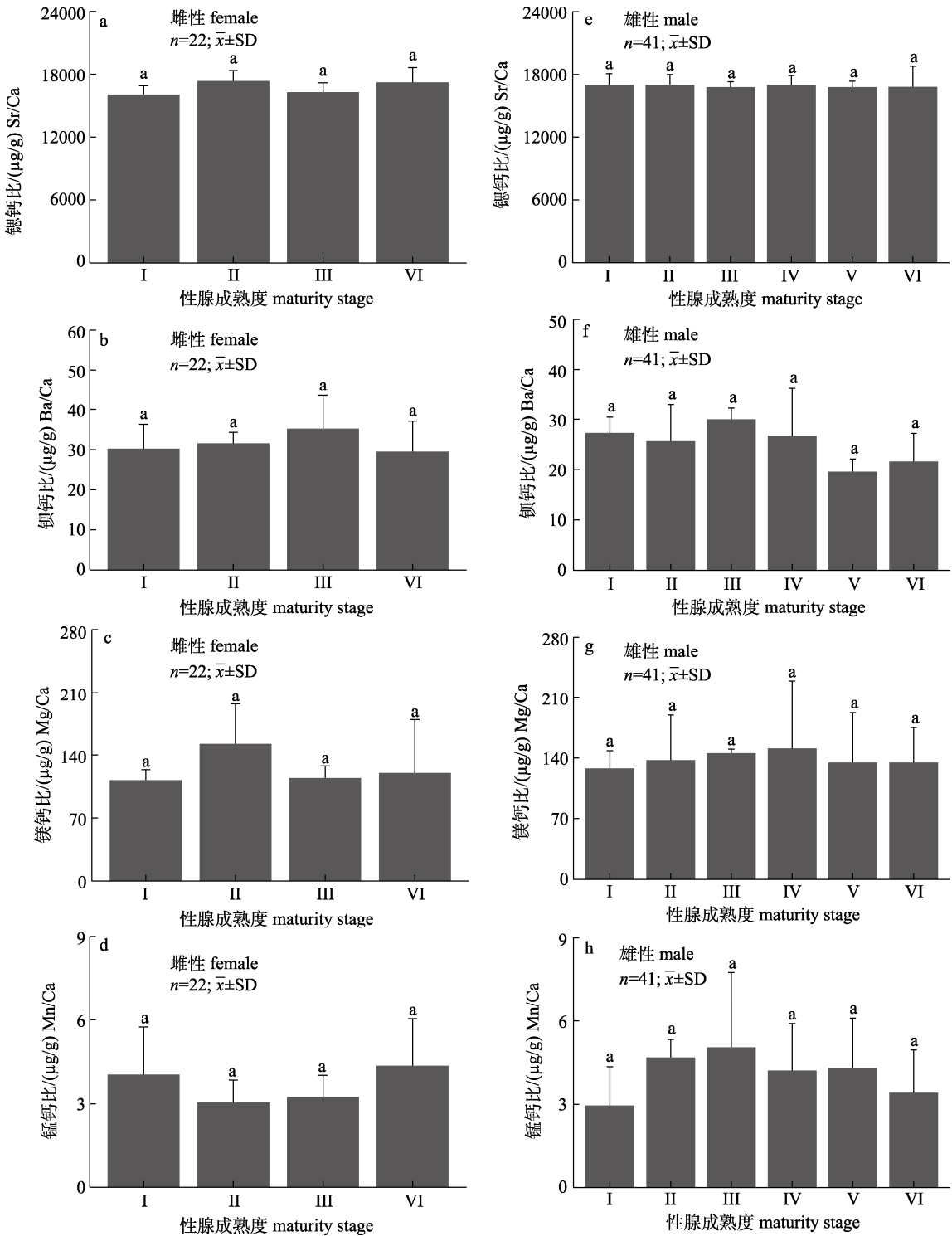


图 7 阿根廷滑柔鱼耳石边缘元素的性腺发育时期分布
柱形图上方不同字母表示差异显著($P < 0.05$).

Fig. 7 Distribution of elements in the statolith edge of *Illex argentinus* by maturity stage
Different letters on the top of columns indicate significant difference ($P < 0.05$).

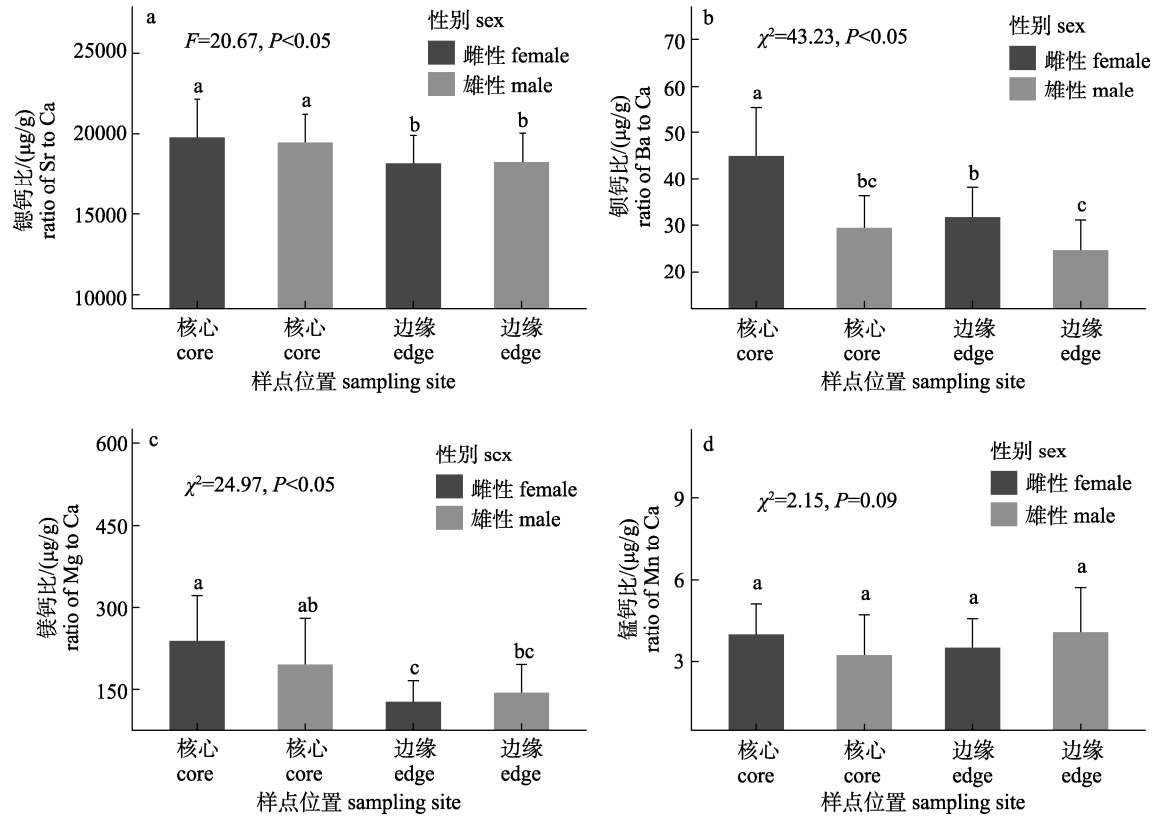


图 8 阿根廷滑柔鱼耳石核心和边缘的元素分布
柱形图上方不同字母表示差异显著($P<0.05$).

Fig. 8 The distribution of elements in the statolith core and edge of *Illex argentinus*
Different letters on the top of columns indicate significant difference ($P<0.05$).

表 4 阿根廷滑柔鱼耳石边缘元素与核心元素的广义
线性混合效应模型的固定效应结果

Tab. 4 Results of generalized linear mixed-effects models fixed effects of elements of statolith edge performed on elements of statolith core for <i>Illex argentinus</i>						
元素 element		估计 estimate	标准误差 SE	模型统计 model statistic		
				<i>t</i>	<i>P</i>	<i>R</i> ²
雌性 female						
锶钙比	Sr/Ca	0.18	0.14	1.33	0.20	0.34
钡钙比	Ba/Ca	0.19	0.14	1.33	0.20	0.56
镁钙比	Mg/Ca	0.01	0.16	0.05	0.96	0.00
锰钙比	Mn/Ca	0.15	0.29	0.52	0.61	0.02
雄性 male						
锶钙比	Sr/Ca	0.18	0.11	1.69	0.10	0.08
钡钙比	Ba/Ca	0.40	0.17	2.34	0.03	0.49
镁钙比	Mg/Ca	0.29	0.17	1.71	0.11	0.22
锰钙比	Mn/Ca	0.35	0.15	2.31	0.03	0.22

水温也表现出相同的变化趋势^[38]。头足类耳石 Sr 含量与水温的负相关关系也得到实验室数据的佐

证, Hosono 等^[39]将长枪乌贼(*Heterololigo bleekeri*)置于不同温度的水体中进行试验,发现耳石的 Sr/Ca 值随水温升高而降低。根据耳石轮纹判读结果,可知本研究的阿根廷滑柔鱼的孵化月份主要发生在南半球的冬末至春季(7—11 月),期间西南大西洋大陆架和大陆坡海域的水温逐渐上升^[40],至采样月份 2—4 月时,栖息海域的水温变化趋于稳定^[41]。在本研究中,随着孵化月份推移,阿根廷滑柔鱼雌雄性个体的耳石核心 Sr/Ca 值整体呈下降趋势;而随着采样月份(2—4 月)推移,雌雄性个体耳石边缘的 Sr/Ca 值则没有明显变化趋势。同时,耳石核心和耳石边缘的 Sr/Ca 值均没有显著的雌雄差异,但是耳石核心的 Sr/Ca 值显著高于耳石边缘的 Sr/Ca 值。可见,阿根廷滑柔鱼耳石核心的 Sr/Ca 值随孵化月份的变化及耳石核心与边缘的 Sr/Ca 值差异性为栖息海域水温升高所致,与其他头足类的研究结果相同^[37-39];该结果也表

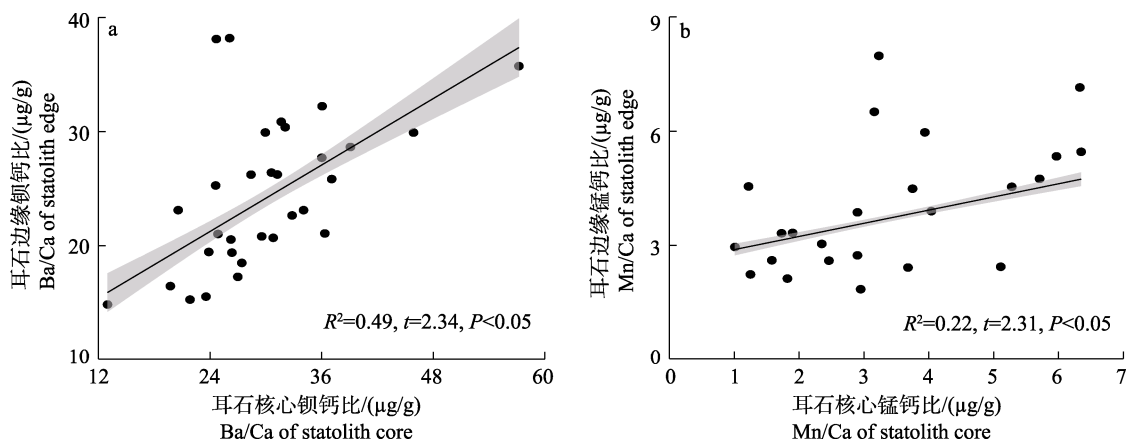


图 9 阿根廷滑柔鱼雄性个体耳石边缘与核心的 Ba/Ca 和 Mn/Ca 的关系

Fig. 9 Relationships in Ba/Ca and Mn/Ca between statolith core and statolith edge for male *Illex argentinus*

明阿根廷滑柔鱼个体的孵化期与被捕获时所处的海域环境存在差异, 从侧面反映了其索饵洄游的生活史特性^[42]。

同时, 阿根廷滑柔鱼耳石核心的 Sr/Ca 值随采样站点纬度重心南移呈增大趋势, 且雌性个体的 Sr/Ca 值增大显著。通常, 西南大西洋巴塔哥尼亚海域水温表现为北高南低^[43], 阿根廷滑柔鱼的繁殖产卵活动主要发生在巴西南部外海 38°S 附近的巴西海流与马尔维纳斯海流汇合区, 孵化场则多发生在水温较为暖和的汇合区南侧水域^[19], 或者在巴塔哥尼亚北部的近海海域^[44]; 孵化仔鱼随洋流向南漂移, 而且具有一定游泳能力的稚鱼也将向马尔维纳斯群岛北部的巴塔哥尼亚大陆架海域索饵洄游^[16]。因此, 尽管本研究的采样站点纬度重心不一定是阿根廷滑柔鱼的产卵孵化位置, 但是耳石核心 Sr/Ca 值的采样站点纬度重心差异性可能说明这些个体来自于不同的孵化场所, 也可能是同一孵化海域不同孵化月份的个体所面对的海域环境不同所致^[19]。

然而, 本研究发现阿根廷滑柔鱼耳石边缘区的 Sr/Ca 值在不同采样月份、不同采样站点纬度重心之间均没有明显变化趋势。生物个体的 Sr/Ca 值与环境中 Sr 元素丰度紧密相关, 而后者往往受到水域盐度的影响^[45]。然而, 海洋生物耳石 Sr/Ca 值对水温波动变化的敏感性大于对盐度波动变化的敏感性, 其中对水温变化的敏感度为 5%/℃, 对盐度变化的敏感度为 1%/盐度(‰)^[46]。而且, 在

环境盐度无显著变化时, 环境温度将是影响生物个体硬组织中 Sr/Ca 值的主要外界因素^[39]。在本研究中, 巴塔哥尼亚陆架海域(40°S~46°S)盐度的波动变化极小^[47], 而且样本采样时间正处于南半球夏末至秋季, 期间采样海域的物理环境也较为稳定^[41]。由此认为, 稳定的海域环境条件是阿根廷滑柔鱼耳石边缘 Sr/Ca 值没有月份差异和采样站点纬度重心差异的原因之一。需要注意的是, 当环境条件相对稳定时, 水生动物耳石元素变化则决定于生理发育因素, 不同发育时期元素在耳石中的沉积速率也会发生显著变化^[48-49]。然而, 阿根廷滑柔鱼耳石边缘 Sr/Ca 值在不同性腺发育时期没有显著性差异, 这表明阿根廷滑柔鱼耳石中的 Sr 元素沉积可能还受到其他生理因素的影响, 或者更多地决定于外界环境, 具体原因仍需后续加强数据的采集与分析并加以佐证。

3.2 耳石核心和边缘的钡元素

在海洋中, 钡元素(Ba)被认为是上升流事件的重要指示元素^[28], 同时也与海洋中营养物质的水层分布有关, 即在表层水中 Ba 浓度很低, 而在较深水域 Ba 浓度则较高^[50]。在头足类中, Zumholz 等^[32]发现成体期的鹦乌贼(*Gonatus fabricii*)耳石 Ba 含量高于仔鱼期的 Ba 含量; 基于耳石 Ba/Ca 值的水层分布模式, Liu 等^[30]也发现茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)仔稚鱼生活在表层水域, 而成鱼则洄游到较深的水域; 而且, 来自哥斯达黎加海域茎柔鱼个体耳石中的 Ba 元素含量最高, 是强

烈的上升流所致^[51]。因此, 观察生物种类 Ba/Ca 值的变化可以在一定程度上反映其栖息水层的差异, 以及栖息海域的海洋环境特征。在本研究中, 随着孵化月份推移, 阿根廷滑柔鱼雌雄个体的耳石核心 Ba/Ca 值均变化显著, 且耳石核心 Ba/Ca 值也存在显著的雌雄差异。头足类仔鱼的游泳能力往往较弱, 洋流是影响其移动的最主要因素^[52]。阿根廷滑柔鱼繁殖产卵活动的海域与马尔维纳斯海流与巴西海流密切相关, 孵化仔鱼的活动容易受到海流的影响^[16]。由此推测, 产卵孵化海域的洋流活动是阿根廷滑柔鱼耳石核心 Ba/Ca 值存在孵化月份差异的主要原因之一。然而, 阿根廷滑柔鱼也具有垂直移动的生活习性, 与索饵育肥期的捕食行为有关^[53], 其仔稚鱼期多栖息在表层水域, 随着生长发育逐渐向较深水层迁移^[54]。本研究发现, 随着采样月份推移, 雌雄个体耳石边缘 Ba/Ca 值的变化趋势均保持一致, 说明这些个体在被捕获前所处的栖息水层没有较大差异, 且所栖息海域的营养物质变化相对稳定。但是, 随着性腺发育, 阿根廷滑柔鱼耳石边缘的 Ba/Ca 值呈先上升后下降的变化趋势, 则表明它们在不同的性腺发育时期所栖息水层可能存在差异。

同时, 本研究结果显示在不同采样站点纬度重心之间, 阿根廷滑柔鱼耳石核心的 Ba/Ca 值没有显著差异, 而耳石边缘的 Ba/Ca 值则差异显著, 且以纬度重心 44°S 为最高。阿根廷滑柔鱼为间歇性终端产卵者^[55-56], 雌性亲体在到达产卵场后会潜至海底进行产卵, 所产出的沉性卵将在海底发育并孵化^[57-59]。因此, 尽管本研究尚未能确定这些个体的具体孵化场所, 但耳石核心相同的 Ba/Ca 值可能说明它们孵化时的栖息水层无明显差异。阿根廷滑柔鱼胚胎孵化之后将受到 BMC 洋流系统的涡流、上升流等影响^[60], 且自身的生长发育也使得这些个体的栖息水层发生变化^[54], 进而影响了耳石边缘的 Ba/Ca 值。在西南大西洋巴塔哥尼亚大陆架/大陆坡海域, 44°S 附近的大陆坡深层水域往往是阿根廷滑柔鱼的主要洄游通道^[61]。可见, 阿根廷滑柔鱼耳石边缘 Ba/Ca 值在采样纬度重心 44°S 最高, 可能是其洄游生活习性所致。此外, 阿根廷滑柔鱼耳石核心的 Ba/Ca 值均显著高

于耳石边缘的 Ba/Ca 值, 佐证了阿根廷滑柔鱼胚胎孵化期所处水层深度大于索饵育肥期所栖息的水层^[54,57]。然而, 本研究也发现阿根廷滑柔鱼雌性个体耳石核心与边缘之间的 Ba/Ca 值没有显著的相关关系, 而雄性个体则呈显著正相关。这说明阿根廷滑柔鱼自孵化仔鱼期之后对栖息水层的选择可能存在一定的雌雄差异, 具体原因还需后续结合生活史数据和生物-物理耦合模型等加以验证。

3.3 耳石核心和边缘的镁和锰元素

头足类的耳石核心富含 Mg 元素, 而胚胎期的 Mg 元素是耳石形成的必需元素^[30,32,62-63]。同时, 头足类耳石核心区也存在较高浓度的 Mn 元素^[64], 与胚胎发育期卵黄营养物质中 Mn 元素的转移相关^[32,64-65]。因而, 耳石核心区的 Mg/Ca 和 Mn/Ca 值均可作为头足类种群结构研究的重要参考指标^[30,66-67]。在本研究中, 阿根廷滑柔鱼耳石核心的 Mg/Ca 值显著高于耳石边缘的 Mg/Ca 值, 而且耳石核心区的 Mg/Ca 值和 Mn/Ca 值均不存在雌雄差异, 且不因采样站点纬度重心不同而存在差异。同时, 阿根廷滑柔鱼雄性个体孵化月份跨度较大, 且耳石核心的 Mg/Ca 值和 Mn/Ca 值存在明显的孵化月份间差异。结合考虑耳石核心 Sr/Ca 值随采样站点纬度重心不同而存在差异的结果, 本研究的阿根廷滑柔鱼个体更可能来自同一孵化场所同一种群, 但是这些个体因孵化时间跨度大, 受到不同的环境背景场影响, 从而在耳石核心沉积不同浓度的 Mg/Ca 值和 Mn/Ca 值。然而, 具体原因仍需后续加强样本采集并深入研究耳石元素与栖息海域环境之间的效应关系加以确证。

头足类耳石的 Mg/Ca 值和 Mn/Ca 值与摄食的饵料生物种类也存在密切关系^[68]。阿根廷滑柔鱼的索饵育肥场往往发生在马尔维纳斯海流流经的巴塔哥尼亚大陆架海域^[16], 该海流把亚南极的富营养冷水向北输送, 丰富了巴塔哥尼亚大陆架海域的营养盐, 为浮游动植物的大量繁殖创造了良好条件^[69], 并为阿根廷滑柔鱼生长发育提供丰富的饵料生物资源^[70]。而且, 阿根廷滑柔鱼的食性也会随着个体生长发育及体型增大而发生转变^[71], 理论上, 阿根廷滑柔鱼耳石中的 Mg、Mn 等元素

将随之发生改变。然而, 本研究发现阿根廷滑柔鱼雌雄个体耳石边缘区的 Mg/Ca 值和 Mn/Ca 值在不同采样月份之间、不同采样站点纬度重心之间, 以及不同性腺成熟度之间均没有显著差异, 但雄性个体耳石边缘的 Mn/Ca 值随着耳石核心的 Mn/Ca 值增大而增大。因此, 阿根廷滑柔鱼耳石中 Mg、Mn 元素的沉积可能更多地取决于栖息环境因素而非摄食, 且可能还受到孵化期沉积元素的影响。

4 结论

水生生物种类硬组织中的元素可以记录其栖息环境变化过程, 可用于重构其生活史历程及栖息地选择的研究^[2-3]。本研究初步阐明了阿根廷滑柔鱼雌雄个体耳石核心与边缘的 Sr、Ba、Mg 和 Mn 这 4 种元素的累积变化模式。其中, Sr/Ca 值在耳石核心与边缘的差异性印证了阿根廷滑柔鱼索饵洄游的生活史特性, 而耳石核心与边缘 Ba/Ca 值的分布模式表明该种类的胚胎及仔鱼生活在较深的水域, 成鱼则栖息在中上层水域。耳石核心的 Mg/Ca 和 Mn/Ca 值显著高于耳石边缘, 且两种元素在边缘处的沉积较为稳定, 推测其可能受环境因素影响较大。这些结果为增进认知阿根廷滑柔鱼的生活史提供了基础, 并为开展其他头足类相类似的研究提供资料参考。然而, 由于本次实验阿根廷滑柔鱼雌性样品数量有限, 且该种类对栖息环境的波动变化较为敏感, 今后研究需加强雌性样本采集以及监测栖息海域的水文特征, 以进一步认知其生活史策略, 为阿根廷滑柔鱼资源的可持续开发利用提供基础。

参考文献:

- [1] Gumienna-Kontecka E, Rowińska-Żyrek M, Luczkowski M. The role of trace elements in living organisms[M]// Chojnacka K, Saeid A. Recent Advances in Trace Elements. Oxford: Wiley Blackwell, 2018: 177-206.
- [2] Liu B L, Chen X J, Ma J, et al. Review of studies of the microchemical structure of cephalopod statoliths[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(2): 315-321. [刘必林, 陈新军, 马金, 等. 头足类耳石的微化学研究进展[J]. 水产学报, 2010, 34(2): 315-321.]
- [3] Campana S E. Chemistry and composition of fish otoliths: Pathways, mechanisms and applications[J]. Marine Biology, 1999, 133(1): 263-297.
- [4] Boyle P, Rodhouse P. Cephalopods: Ecology and fisheries[M]. Oxford: Wiley Blackwell, 2005: 1-458.
- [5] Chen X J. Development status of world cephalopod fisheries and suggestions for squid jigging fishery in China[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 321-330. [陈新军. 世界头足类资源开发现状及我国远洋鱿钓渔业发展对策[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 321-330.]
- [6] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation[R]. Rome: FAO, 2022: 1-236.
- [7] Young R, Harman R F. Larva, paralarva and subadult in cephalopod terminology[J]. Malacologia, 1988, 29(1): 201-207.
- [8] Waluda C, Rodhouse P, Podestá G, et al. Surface oceanography of the inferred hatching grounds of *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) and influences on recruitment variability[J]. Marine Biology, 2001, 139(4): 671-679.
- [9] Jereb P, Roper C F E. Cephalopods of the world: An annotated and illustrated catalogue of cephalopod species known to date: Vol 2. Myopsid and oegopsid squids[M]. Rome: FAO, 2010: 62-115.
- [10] Alberto M T, Saraceno M, Ivanovic M, et al. Habitat of Argentine squid (*Illex argentinus*) paralarvae in the southwestern Atlantic[J]. Marine Ecology Progress Series, 2022, 688: 69-82.
- [11] Arkhipkin A I, Winter A G, Nigmatullin C M. Heavy fishery exploitation does not affect sizes at recruitment and maturity of squid *Illex argentinus* and *Doryteuthis gahi*, in the Southwest Atlantic[J]. ICES Journal of Marine Science, 2022, 79(1): 182-192.
- [12] Yatsu A, Mochioka N, Morishita K, et al. Strontium/calcium ratios in statoliths of the neon flying squid, *Ommastrephes bartrami* (Cephalopoda), in the North Pacific Ocean[J]. Marine Biology, 1998, 131(2): 275-282.
- [13] Liu B L, Cao J, Truesdell S B, et al. Reconstructing cephalopod migration with statolith elemental signatures: A case study using *Dosidicus gigas*[J]. Fisheries Science, 2016, 82(3): 425-433.
- [14] Brunetti N E, Ivanovic M L. Distribution and abundance of early life stages of squid (*Illex argentinus*) in the south-west Atlantic[J]. ICES Journal of Marine Science, 1992, 49(2): 175-183.
- [15] Leta H R. Abundance and distribution of rhynchoteuthion larvae of *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the south-western Atlantic[J]. South African Journal of

- Marine Science, 1992, 12(1): 927-941.
- [16] Sacau M, Pierce G J, Wang J J, et al. The spatio-temporal pattern of Argentine shortfin squid *Illex argentinus* abundance in the southwest Atlantic[J]. Aquatic Living Resources, 2005, 18(4): 361-372.
- [17] Haimovici M, Alvarez-Pérez J A. Distribución y maduración sexual del calamar argentino, *Illex argentinus* (Castellanos, 1960) (Cephalopoda: Ommastrephidae), en el sur de Brasil[J]. Scientia Marina, 1990, 54: 179-185.
- [18] Crespi-Abril A C, Morsan E M, Williams G N, et al. Spatial distribution of *Illex argentinus* in San Matias Gulf (Northern Patagonia, Argentina) in relation to environmental variables: A contribution to the new interpretation of the population structuring[J]. Journal of Sea Research, 2013, 77: 22-31.
- [19] Torres Alberto M L, Bodnariuk N, Ivanovic M, et al. Dynamics of the confluence of Malvinas and Brazil currents, and a southern Patagonian spawning ground, explain recruitment fluctuations of the main stock of *Illex argentinus*[J]. Fisheries Oceanography, 2021, 30(2): 127-141.
- [20] Chemshirova I, Hoving H J, Arkhipkin A. Temperature effects on size, maturity, and abundance of the squid *Illex argentinus* (Cephalopoda, Ommastrephidae) on the Patagonian Shelf[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2021, 255: 107343.
- [21] Lin D M, Chen X J, Fang Z. Preliminary study on reproductive biology of summer spawning stock of *Illex argentinus* in the southwestern Atlantic Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(6): 843-852. [林东明, 陈新军, 方舟. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼夏季产卵种群繁殖生物学的初步研究[J]. 水产学报, 2014, 38(6): 843-852.]
- [22] Miyahara K, Ota T, Goto T, et al. Age, growth and hatching season of the diamond squid *Thysanoteuthis rhombus* estimated from statolith analysis and catch data in the western Sea of Japan[J]. Fisheries Research, 2006, 80(2-3): 211-220.
- [23] Chen C S, Chen J Y, Lin C W. Variation in life-history traits for micro-cohorts of *Sepioteuthis lessoniana* in the waters off northern Taiwan[J]. Fisheries Science, 2015, 81(1): 53-64.
- [24] Arkhipkin A. Age, growth, stock structure and migratory rate of pre-spawning short-finned squid *Illex argentinus* based on statolith ageing investigations[J]. Fisheries Research, 1993, 16(4): 313-338.
- [25] Paton C, Hellstrom J, Paul B, et al. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(12): 2508-2518.
- [26] Lipinski M R. The deposition of statoliths: A working hypothesis[J]. Recent Advances in Cephalopod Fisheries Biology, 1993: 241-262.
- [27] Hanlon R T, Bidwell J P, Tait R. Strontium is required for statolith development and thus normal swimming behaviour of hatchling cephalopods[J]. Journal of Experimental Biology, 1989, 141(1): 187-195.
- [28] Lea D W, Shen G T, Boyle E A. Coralline barium records temporal variability in equatorial Pacific upwelling[J]. Nature, 1989, 340(6232): 373-376.
- [29] Arkhipkin A I, Campana S E, Fitzgerald J, et al. Spatial and temporal variation in elemental signatures of statoliths from the Patagonian longfin squid (*Loligo gahi*)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2004, 61(7): 1212-1224.
- [30] Liu B L, Chen X J, Chen Y, et al. Trace elements in the statoliths of jumbo flying squid off the Exclusive Economic Zones of Chile and Peru[J]. Marine Ecology Progress Series, 2011, 429: 93-101.
- [31] Morris C C. Statocyst fluid composition and its effects on calcium carbonate precipitation in the squid *Alloteuthis subulata* (Lamarck, 1798): Towards a model for biomineralization[J]. Bulletin of Marine Science, 1991, 49(1-2): 379-388.
- [32] Zumholz K, Klügel A, Hansteen T, et al. Statolith microchemistry traces the environmental history of the boreoatlantic armhook squid *Gonatus fabricii*[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 333: 195-204.
- [33] Woodcock S H, Munro A R, Crook D A, et al. Incorporation of magnesium into fish otoliths: Determining contribution from water and diet[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 94: 12-21.
- [34] Hüsey K, Limburg K E, de Pontual H, et al. Trace element patterns in otoliths: The role of biomineralization[J]. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 2021, 29(4): 445-477.
- [35] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing, version 4.3.0[Z]. R Foundation for Statistical Computing, 2023, Vienna, Austria.
- [36] Liu B L, Chen X J, Tian S Q, et al. Sex maturity of *Illex argentinus* in the high sea waters of southwest Atlantic[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(6): 721-725. [刘必林, 陈新军, 田思泉, 等. 西南大西洋公海阿根廷滑柔鱼性成熟的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(6): 721-725.]
- [37] Ikeda Y, Arai N, Sakamoto W, et al. Relationship between statoliths and environmental variables in cephalopod[J]. International Journal of PIXE, 1996, 6(1-2): 339-345.

- [38] Jones J B, Arkhipkin A I, Marriott A L, et al. Using statolith elemental signatures to confirm ontogenetic migrations of the squid *Doryteuthis gahi* around the Falkland Islands (Southwest Atlantic)[J]. Chemical Geology, 2018, 481: 85-94.
- [39] Hosono S, Irie T, Yamamoto J, et al. Negative temperature dependence of statolith Sr/Ca and its intraspecific variability in experimentally maintained spear squid *Heterololigo bleekeri*[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2022, 102(5): 315-321.
- [40] Rodhouse P G K, Arkhipkin A I, Laptikhovsky V, et al. *Illex argentinus*, argentine shortfin squid[M]/Rosa R, Pierce G, O'dor R. Advances in Squid Biology, Ecology and Fisheries. Part II-Oegopsid squids. New York: Nova Science Publishers, 2013: 109-148.
- [41] de Almeida Fernandes L D, Quintanilha J, Monteiro-Ribas W, et al. Seasonal and interannual coupling between sea surface temperature, phytoplankton and meroplankton in the subtropical south-western Atlantic Ocean[J]. Journal of Plankton Research, 2012, 34(3): 236-244.
- [42] Chiu T Y, Chiu T S, Chen C S. Movement patterns determine the availability of Argentine shortfin squid *Illex argentinus* to fisheries[J]. Fisheries Research, 2017, 193: 71-80.
- [43] Rivas A L. Spatial and temporal variability of satellite-derived sea surface temperature in the southwestern Atlantic Ocean[J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(7): 752-760.
- [44] Crespi-Abril A C, Barón P J. Revision of the population structuring of *Illex argentinus* (Castellanos, 1960) and a new interpretation based on modelling the spatio-temporal environmental suitability for spawning and nursery[J]. Fisheries Oceanography, 2012, 21(2-3): 199-214.
- [45] He S J, Xu Y J. Spatiotemporal distributions of Sr and Ba along an estuarine river with a large salinity gradient to the gulf of Mexico[J]. Water, 2016, 8(8): Article No.323.
- [46] Martin G B, Thorrold S R, Jones C M. Temperature and salinity effects on strontium incorporation in otoliths of larval spot (*Leiostomus xanthurus*)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2004, 61(1): 34-42.
- [47] Artana C, Provost C, Poli L, et al. Revisiting the malvinas current upper circulation and water masses using a high-resolution ocean reanalysis[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(6): e2021JC017271.
- [48] Sturrock A M, Trueman C N, Milton J A, et al. Physiological influences can outweigh environmental signals in otolith microchemistry research[J]. Marine Ecology Progress Series, 2014, 500: 245-264.
- [49] Sturrock A M, Hunter E, Milton J A, et al. Quantifying physiological influences on otolith microchemistry[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2015, 6(7): 806-816.
- [50] Chan L H, Drummond D, Edmond J M, et al. On the Barium data from the Atlantic GEOSECS expedition[J]. Deep Sea Research, 1977, 24(7): 613-649.
- [51] Liu B L, Chen Y, Chen X J. Spatial difference in elemental signatures within early ontogenetic statolith for identifying Jumbo flying squid natal origins[J]. Fisheries Oceanography, 2015, 24(4): 335-346.
- [52] Boyle P R, Boletzky S V. Cephalopod populations: Definition and dynamics[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1996, 351(1343): 985-1002.
- [53] Santos R A, Haimovici M. Food and feeding of the short-finned squid *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) off southern Brazil[J]. Fisheries Research, 1997, 33(1-3): 139-147.
- [54] Lu H J, Chen X J, Liu B L, et al. Review on fishery biology of Argentinean short-finned squid *Illex argentinus* in the southwest Atlantic ocean[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2010, 30(4): 91-98. [陆化杰, 陈新军, 刘必林, 等. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔业生物学研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2010, 30(4): 91-98.]
- [55] Lin D M. Spawning strategy of Argentine shortfin squid, *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the southwest Atlantic[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [林东明. 阿根廷滑柔鱼的产卵策略研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [56] Rocha F, Guerra Á, González Á F. A review of reproductive strategies in cephalopods[J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2001, 76(3): 291-304.
- [57] Lin D M, Chen X J, Chen Y, et al. Ovarian development in Argentinean shortfin squid *Illex argentinus*: Group-synchrony for corroboration of intermittent spawning strategy[J]. Hydrobiologia, 2017, 795(1): 327-339.
- [58] Sakai M, Bruneiti N E, Elena B, et al. Embryonic development and hatchlings of *Illex argentinus* derived from artificial fertilization[J]. South African Journal of Marine Science, 1998, 20(1): 255-265.
- [59] Arkhipkin A I. Reproductive system structure, development and function in cephalopods with a new general scale for maturity stages[J]. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science, 1992, 12: 63-74.
- [60] Brandini F P, Boltovskoy D, Piola A, et al. Multiannual trends in fronts and distribution of nutrients and chlorophyll in the southwestern Atlantic (30–62°S)[J]. Deep Sea Research

- arch Part I: Oceanographic Research Papers, 2000, 47(6): 1015-1033.
- [61] Arkhipkin A I. Intrapopulation structure of winter-spawned Argentine shortfin squid, *Illex argentinus* (Cephalopoda, Ommastrephidae), during its feeding period over the Patagonian Shelf[J]. Fishery Bulletin, 2000, 98(1): 1-13.
- [62] Ruttenberg B I, Hamilton S L, Hickford M J, et al. Elevated levels of trace elements in cores of otoliths and their potential for use as natural tags[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 297: 273-281.
- [63] Warner R R, Hamilton S L, Sheehy M S, et al. Geographic variation in natal and early larval trace-elemental signatures in the statoliths of the market squid *Doryteuthis* (formerly *Loligo*) *opalescens*[J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 379: 109-121.
- [64] Martino J C, Doubleday Z A, Fowler A J, et al. Identifying physiological and environmental influences on otolith chemistry in a coastal fishery species[J]. Marine and Freshwater Research, 2020, 72(6): 904-921.
- [65] Limburg K E, Walther B D, Lu Z L, et al. In search of the dead zone: Use of otoliths for tracking fish exposure to hypoxia[J]. Journal of Marine Systems, 2015, 141: 167-178.
- [66] Li N, Fang Z, Chen X J, et al. Preliminary study on the migration characteristics of swordtip squid (*Uroteuthis edulis*) based on the trace elements of statolith in the East China Sea[J]. Regional Studies in Marine Science, 2021, 46: 101879.
- [67] Brophy D, Jeffries T E, Danilowicz B S. Elevated manganese concentrations at the cores of clupeid otoliths: Possible environmental, physiological, or structural origins[J]. Marine Biology, 2004, 144(4): 779-786.
- [68] Zumholz K, Hansteen T H, Klügel A, et al. Food effects on statolith composition of the common cuttlefish (*Sepia officinalis*)[J]. Marine Biology, 2006, 150(2): 237-244.
- [69] Fedulov P, Remeslo A, Burykin S, et al. Variabilidad de la corriente de Malvinas[J]. Frente Marítimo, 1990, 6: 121-127.
- [70] Crespi-Abril A C, Trivellini M M. Diet of spring and summer spawning groups of *Illex argentinus* inhabiting coastal waters in San Matias Gulf (northern Patagonia, Argentina)[J]. Aquatic Biology, 2011, 14(1): 99-103.
- [71] Lin D M, Song W, Feng Y X. Diet composition and ecological role of Argentine shortfin squid *Illex argentinus* during energy accumulation: A review[J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 162-172. [林东明, 宋维, 冯艺璇. 阿根廷滑柔鱼能量积累的食物组成及其生态角色的研究进展[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 162-172.]

A comparative study on elements in the statolith core and edge of *Illex argentinus*

CHEN Zhaokai¹, LIN Dongming^{1, 2, 3, 4}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
3. National Distant-Water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: The elements in the hard tissues of organisms are important natural markers for reconstructing their life history and habitat. The present study aimed to explore the changes in the elements present inside the statolith core and edge of Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) by using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). The element content was determined in the core and edge of statoliths, and the ratios of Sr, Ba, Mg, Mn to Ca were analyzed. Thereafter, mixed-effects models were used to analyze the relationship between these four elements and Ca ratios in the edge and core of statoliths. Ba/Ca values were found significant differences in the core of statoliths between female and male individuals, so did in the edge of statoliths. Significant differences were also observed in the Ba/Ca values of statolith core among different hatching months. Additionally, in male individuals, the Ba/Ca values in the statolith edge exhibited notable variations across different sampling months. The Sr/Ca values in the core of statoliths and the Ba/Ca values in the edge showed significant differences between different sampling latitudinal centroids. The Sr/Ca, Ba/Ca, and Mg/Ca values in the core of statoliths were significantly higher than the corresponding element ratios in the edge, while no significant difference was observed in the Mn/Ca values between the core and edge of statoliths. The results of the mixed-effects model showed that there was no relationship between the element ratios in the edge of statoliths and the corresponding element ratios in the core for females, whereas the Ba/Ca and Mn/Ca values in the edge of statoliths increased with the increasing Ba/Ca and Mn/Ca values in the core for males. These findings suggest notable variations in Sr, Ba, and Mg elements between the core and edge of *I. argentinus* statoliths. Additionally, they highlight sex-specific differences, specifically in the Ba element. This study provides a basis for further revealing the environmental selection adaptability and life history of *I. argentinus* and can provide data reference for mastering the species resource fluctuations.

Key words: *Illex argentinus*; statolith; elements; marine environment; southwest Atlantic

Corresponding author: LIN Dongming. E-mail: dmlin@shou.edu.cn