

南海鳶乌贼耳石微量元素差异性分析

刘 玉^{1,2,3}, 王雪辉^{1,3,4}, 杜飞雁^{1,3}, 刘必林², 张 鹏^{1,4}, 刘梦娜^{1,2}, 邱永松¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
3. 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300; 4. 农业农村部北海渔业开发重点实验室, 广东 广州 510300)

摘要: 文章通过激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法 (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, LA-ICP-MS) 测量南海鳶乌贼 (*Sthenoteuthis oualaniensis*) 耳石微量元素浓度, 分析鳶乌贼耳石微量元素组成及与钙 (Ca) 元素比值的变化, 探讨其存在的差异和与栖息环境之间的关系。结果表明, 鳶乌贼耳石主要微量元素为 Ca、锶 (Sr)、钠 (Na)、铁 (Fe)、钡 (Ba)、锰 (Mn)。方差分析表明, 鳶乌贼中型群和微型群及其性别间耳石微量元素浓度差异不显著 ($P>0.05$)。除 Fe/Ca 外, 不同耳石区域微量元素浓度与 Ca 比值存在显著性差异 ($P<0.01$)。核心区 Sr/Ca 最高, 随后逐渐降低, 不同产卵群体和地理区域耳石 Sr/Ca 无显著差异 ($P>0.05$)。幼体期 Sr/Ca 与温度呈正相关性, 与盐度呈负相关性, 可以作为良好的温度指标。Na/Ca 先增大后减小, 暗区最高, 核心区 and 后核心区 Na/Ca 在不同产卵群体间差异显著 ($P<0.01$)。Mn/Ca 和 Ba/Ca 先减小后增大, 暗区最低, 随后分别在边缘区和外围区增大。成体期耳石 Ba/Ca 与盐度呈正相关, 可以作为垂直移动的指标。Fe/Ca 在不同产卵群体和地理区域中差异显著 ($P<0.01$)。分析认为, Na/Ca 和 Fe/Ca 较为适合研究南海鳶乌贼不同群体的划分, Sr/Ca 和 Ba/Ca 可用于推测鳶乌贼的栖息环境。

关键词: 鳶乌贼; 耳石; 微量元素; 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法; 南海

中图分类号: Q 958.8; S 917.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Difference analysis of trace elements in statolith of *Sthenoteuthis oualaniensis* in South China Sea

LIU Yu^{1,2,3}, WANG Xuehui^{1,3,4}, DU Feiyan^{1,3}, LIU Bilin², ZHANG Peng^{1,4}, LIU Mengna^{1,2}, QIU Yongsong¹

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, China Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China; 4. Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) was used to measure the concentration of trace elements in the otolith of the South China Sea squid (*Sthenoteuthis oualaniensis*). The composition of trace elements in the otolith and the change of the ratio of trace elements to calcium (Ca) were analyzed. The differences and the relationship between the otolith and habitat were discussed. The results show that the main trace elements are Ca, Sr, Na, Fe, Ba and Mn. Analysis of variance

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-05-21

资助项目: 国家科技支撑计划项目“南海海外捕捞技术与新资源开发”(2013BAD13B06); 国家科技基础资源调查专项 (2017FY201405, 2018FY100105); 广东省科技计划项目 (2014A020217011); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项资金 (2019HY-JC0203, 2019GH02, 2019HY-XKQ03)

作者简介: 刘 玉 (1994—), 男, 硕士研究生, 从事海洋生物学研究。E-mail: liuyu199406@163.com

通信作者: 王雪辉 (1975—), 男, 博士, 副研究员, 从事渔业资源评估与管理、渔业生物学研究。E-mail: wxhsacs@163.com

(ANOVA) reveals no significant difference between populations and genders ($P>0.05$). There was significant difference in the ratio of trace elements to calcium among different regions of statolith ($P<0.01$) except for Fe/Ca. The Sr/Ca ratio was the highest in the nucleus and then decreased. There was no significant difference in Sr/Ca ratios among different spawning groups and geographical regions ($P>0.05$). There was a positive relationship between Sr/Ca and temperature, and a negative relationship with salinity at the larval stage. Sr/Ca can be used as a good temperature indicator. Na/Ca first increased and then decreased, highest at the dark zone. Na/Ca is significantly different among different spawning populations at the nuclear and post nuclear zones ($P<0.01$). Mn/Ca and Ba/Ca, which first decreased and then increased (lowest in the dark region), increased at the edge zone and peripheral zone. There was a positive relationship between Ba/Ca and salinity at adult stage, and Ba/Ca can be used as an indicator of vertical movement. Fe/Ca was significantly different among different spawning populations and geographic areas ($P<0.01$). It is shown that Na/Ca and Fe/Ca are suitable for distinguish of different groups of squid, and Sr/Ca and Ba/Ca can be used to estimate the habitat environment of squids in the South China Sea.

Key words: *Sthenoteuthis oualaniensis*; statolith; trace element; LA-ICP-MS; South China Sea

鸢乌贼 (*Sthenoteuthis oualaniensis*) 隶属于头足纲、柔鱼科、鸢乌贼属, 在印度洋、太平洋热带和亚热带海域广泛分布^[1]。南海鸢乌贼资源量较丰富, 声学方法评估其资源量达 2.36×10^6 t^[2], 是当前中国南海外海最具开发潜力的大洋性渔业资源之一。国内外学者对鸢乌贼的研究主要集中在日龄生长^[3-4]、渔场资源状况^[5-6]和种群结构^[7-8]等方面。耳石是位于头足类平衡囊内的一对钙化组织, 起着感应加速度和控制身体平衡的作用^[9]。通过分析栖息水环境因子和耳石微量元素的关系, 可以了解头足类不同物种间的生长差异^[10]以及洄游、产卵^[11]等生活史状况, 划分种群结构^[12], 进一步可以重建温度、盐度等环境因子^[13]。耳石微量元素组成受栖息环境物理和化学性质的影响, 例如通常情况下锶 (Sr)/钙 (Ca)^[14]和钡 (Ba)/Ca^[15]与温度呈负相关, 所以 Sr/Ca 和 Ba/Ca 常用作栖息环境的温度指标。目前, 有关南海鸢乌贼的耳石微化学研究较少, 对不同群体间的微量元素差异性分析未见报道, 耳石微量元素与环境因子之间的关系尚未明确。本文通过激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法 (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, LA-ICP-MS), 测定南海鸢乌贼耳石微量元素的浓度、量化微量元素在耳石中的组成及在不同耳石区域中的分布、计算耳石微量元素浓度与 Ca 元素的比值及变化、比较不同产卵季节和地理区域鸢乌贼耳石微量元素的差异、结合微量元素与环境因子间的关系推测其栖息环境的变化, 从而为更好地利用和开发南海鸢乌贼资源提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 材料来源

鸢乌贼样本采集时间及海区, 东沙海域 (2017

年 3—5 月) $17^{\circ}50'N \sim 19^{\circ}10'N$ 、 $112^{\circ}44'E \sim 116^{\circ}10'E$; 西沙海域 (2017 年 4 月) $17^{\circ}20'N \sim 17^{\circ}40'N$ 、 $110^{\circ}50'E \sim 111^{\circ}10'E$; 南沙海域 (2016 年 10—11 月和 2017 年 3—5 月) $9^{\circ}30'N \sim 13^{\circ}40'N$ 、 $110^{\circ}40'E \sim 116^{\circ}10'E$ (图 1)。作业方式为灯光罩网, 每个站位随机抽取鸢乌贼 100~200 尾, 冷冻保存。运至实验室后进行生物学测定及相关实验处理, 记录各取样站位的地理坐标和采集时间。

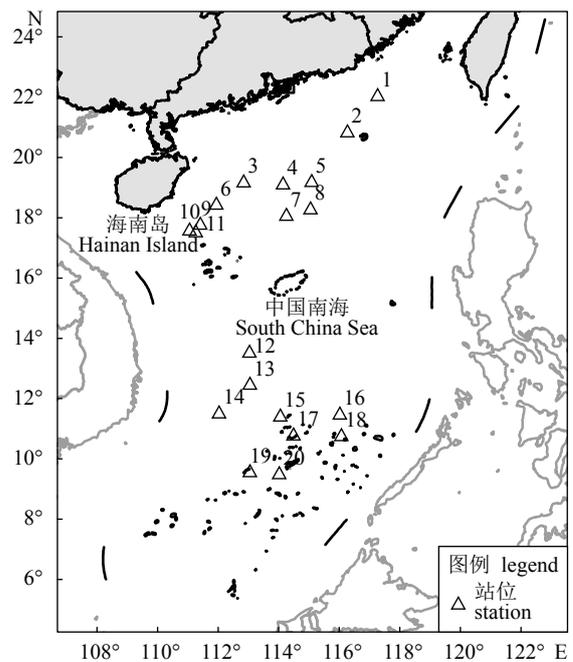


图1 样品采集站位示意图

Fig.1 Sampling sites in South China Sea

1.2 实验方法

样品解冻后对鸢乌贼进行生物学测定, 包括胴长 (mantle length, ML, 精确至 1 mm)、体质量 (body weight, BW, 精确至 1 g)、性别、性成熟度等参数。中型群鸢乌贼背部具有发光器, 微型群鸢

乌贼背部无发光器, 结合性腺发育的快慢, 将鸢乌贼分成中型和微型 2 个种群^[7]。

将耳石从平衡囊内轻轻取出, 置于 1.5 mL 的离心管中编号, 加入 95% 的乙醇后冷冻保存。耳石研磨的具体方法参考刘必林等^[9], 共选取耳石切片 103 枚 (东沙海域 40 枚、西沙海域 36 枚、南沙海域 27 枚)。耳石切片抛光后在 Olympus EX51 显微镜 (×400) 下拍照, 图像经 PhotoShop 5.0 软件叠加处理。轮纹数由 2 人分别读取, 计数值与均值的差值低于 5%, 则认为计数准确, 否则再计数 2 次求平均值^[16]。通过读取样本耳石的轮纹数, 结合捕捞时间, 推算孵化时间, 并划分不同季节的产卵群体 (表 1)。

测定前将研磨好的耳石切片置于超声波震荡仪中清洗 5 min, 以清除切片上的污染物。在耳石研磨平面的核心区 (N)、后核心区 (PN)、暗区 (DZ)、外围区 (PZ) 以及边缘区 (EZ) 分别各选取 1 个取样

点 (图 2), 这些区域依次代表着鸢乌贼发育的胚胎期、幼虫期、幼年期、亚成体和成体期。耳石微量元素浓度测定在上海海洋大学元素分析实验室完成。激光剥蚀系统为 NEW WAVE 213, ICP-MS 为 Agilent 7700x。激光能量密度 16~20 MJ·cm⁻³, 频率 5 Hz, 激光束斑直径 40 μm。激光剥蚀过程中以氦气为载气、氩气为补偿气调节灵敏度, 两者在 1 个 T 型接头中混合后进入 ICP。该系统配置了 1 个信号平滑装置, 当激光脉冲频率低至 1 Hz 时, 采用该装置也能获得光滑的分析信号。每个数据分析的时间段包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号^[17]。采用多外标, 无内标法对元素浓度进行定量计算, 对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素浓度) 采用软件 ICPMS Data Cal 完成^[18]。微量元素校正标准样品有 NIST 610、BHVO-2G、BIR-1G 和

表 1 鸢乌贼样本生物学信息

Tab.1 Biological information of *S. oualaniensis*

站位 station	胴长/mm ML	体质量/g BW	性成熟度 maturity stage	日龄/d age	孵化时间 hatching month	季节 season
1	95	26	I	56	2017.01	冬
2	121~189	67~344	II~IV	71~125	2016.11—2017.01	秋、冬
3	89~154	18~153	II~III	62~80	2017.01—02	冬
4	131~175	107~256	II~III	77~84	2017.01	冬
5	110~139	35~104	I~III	69~91	2016.12—2017.01	冬
6	130~157	95~149	II	74~90	2016.11	秋
7	122~133	63~96	I~II	73~84	2017.01	冬
8	112~159	53~184	I~IV	74~119	2016.12—2017.01	冬
9	111~155	44~159	I~III	64~84	2017.01—02	冬
10	110~171	40~166	I~IV	70~92	2017.01	冬
11	87~182	7~199	I~IV	63~99	2016.12—2017.02	冬
12	80~117	16~51	II~IV	55~68	2016.08—09	夏、秋
13	81~100	17~38	II~III	60~73	2016.08—09	夏、秋
14	66~92	10~24	I~IV	52~65	2016.08	夏
15	86~110	19~48	I~III	66~73	2016.08	夏
16	96~112	23~43	I~III	69~73	2016.08	夏
17	141	128	IV	84	2017.01	冬
18	117~120	55~71	I~II	65~69	2017.02	冬
19	120~128	74~91	II~III	80~83	2016.08	夏
20	117~135	66~103	II~IV	75~87	2016.08	夏

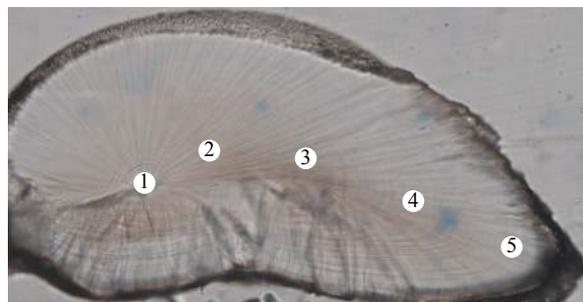


图2 鸢乌贼耳石微量元素采集点

1~5 分别代表核心、后核心区、暗区、外围区、边缘区

Fig.2 Collection points in statolith of *S. oualaniensis*

1-5. N, PN, DZ, PZ and EZ, respectively.

MACS-3, 以上样品均为国际标准物质。测定完成后, 对取样点的日龄时间段进行估算, 获取不同时间段的耳石微量元素浓度。以 20 d 间隔为一组对鸢乌贼日龄进行划分, 并在各年龄段中随机选取一定尾数的鸢乌贼分析耳石微量元素浓度与日龄间的变化趋势。

不同水层温度和盐度数据采集仪器为 RBR concert (configuration: C.T.D; depth rating: 500 m; serial number: 60481), 测定水深 0~100 m, 选取表层、50 m、100 m 共 3 个水层, 温盐数据采用入水和出水时测定的平均值 (表 2)。假设鸢乌贼早期主要生活在 0~50 m 的水层中, 对应的生长阶段为胚胎期、幼虫期和幼体期, 在此之后进行较远距离的垂直移动, 对应的生长阶段为亚成体和成体期。分析幼虫期和幼体期耳石微量元素与 0~50 m 水层温度、盐度的关系以及亚成体和成体期与 100 m 水层温度、盐度的关系。

1.3 数据分析

1) 统计南海鸢乌贼耳石主要微量元素组成和分布, 选取变异系数较小 (CV) 和存在差异性的微量元素进行分析。

2) 利用多因素方差分析 (MANOVA) 分别比较南海鸢乌贼不同种群、性别及耳石区域间微量元素浓度及其与钙元素比值的差异。

3) 两两比较不同产卵群体和地理区域耳石微量元素与 Ca 元素比值的差异。

4) 分析耳石微量元素与钙元素比值和温度、盐度的关系。

5) 分析软件采用 SPSS 21.0。

2 结果

2.1 耳石微量元素组成

耳石微量元素中 Ca 元素浓度最高 $[(3.77\sim 3.94)\times 10^5 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}]$, 不同耳石区域间的 Ca 元素浓度无显著性差异 ($P>0.05$), 约占元素总量的 97%。其次是 Sr 和钠 (Na), 分别约占元素总量的 1.5% 和 1.0%。此外, 依次为铁 (Fe)、Ba、锰 (Mn, 表 3)。方差分析表明, 南海鸢乌贼中型群和微型群及雌雄群体间耳石微量元素组成无显著性差异 ($P>0.05$)。不同耳石区域间除 Ca、Fe 元素浓度无显著性差异外 ($P>0.05$), 其余微量元素皆存在显著性差异 ($P<0.01$, 表 4)。

2.2 不同耳石区域微量元素与 Ca 的比值

Sr/Ca 在核心区最高, 随后不断下降, 在边缘区最低 (图 3-a)。核心区和后核心区 Sr/Ca 明显高

表2 不同水层温度和盐度数据

Tab.2 Temperature and salinity data at different water layers

站位 station	温度/°C temperature			盐度 salinity		
	表层 surface	50 m	100 m	表层 surface	50 m	100 m
2	24.5	24.3	23.9	32.8	33	33.1
3	27	25.5	22	31.8	32.3	32.9
4	27.3	24.4	23.6	31.8	33.2	33.3
5	25.3	24.3	24	32.7	33.1	33.2
7	26.3	24.8	19.7	31.7	32.5	33
8	24.9	24.1	20.5	32.2	32.5	33.2
9	26.8	24.6	19.6	32.2	33	33.3
10	26.5	25.5	20.4	32.3	32.4	33
11	26.6	25.1	20.9	32.4	32.5	32.8

表3 南海鸢乌贼耳石微量元素浓度及与钙元素比值

Tab.3 Element concentrations and element/Ca ratios in statoliths of *S. oualaniensis*

元素 element	元素浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ element concentration		元素/Ca element/Ca	
	范围 range	均值 \pm 标准差 $\bar{X}\pm\text{SD}$	范围 range	均值 \pm 标准差 $\bar{X}\pm\text{SD}$
钠 Na	370~5 501	4 115 \pm 474	$(1\sim 14.1)\times 10^{-3}$	$(10.5\pm 1.2)\times 10^{-3}$
锰 Mn	0.03~21.6	2.8 \pm 2	$(0.08\sim 57.3)\times 10^{-6}$	$(7.2\pm 5.3)\times 10^{-6}$
铁 Fe	2.3~189.5	39.7 \pm 31	$(5.8\sim 502)\times 10^{-6}$	$(102\pm 79.7)\times 10^{-6}$
锶 Sr	443~7 475	6 076 \pm 595	$(1.2\sim 19.1)\times 10^{-3}$	$(15.5\pm 1.5)\times 10^{-3}$
钡 Ba	2.4~30.8	6.1 \pm 2	$(6.1\sim 79.8)\times 10^{-6}$	$(15.6\pm 5.2)\times 10^{-6}$

表4 南海鸢乌贼耳石不同区域微量元素浓度及差异

Tab.4 Difference of trace element concentrations at different growth zones of statoliths

元素 element	元素浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ element concentration					P
	核心区 N	后核心区 PN	暗区 DZ	外围区 PZ	边缘区 EZ	
钠 Na	2 919~4 722	2 802~5 091	2 625~5 146	2 310~5 238	370~5 501	0
锰 Mn	0.03~8.3	0.03~10.6	0.1~13.9	0.11~12.4	0.11~21.6	0
铁 Fe	2.3~151.3	9.6~164.7	12.2~159.4	12~154	9~189.5	0.1
锶 Sr	4 971~7 446	4 296~7 059	3 356~6 622	3 187~6 829	443~7 475	0
钡 Ba	3.3~10.7	2.7~11.8	2.5~18.9	2.4~9.4	2.7~30.8	0

于其他区域, 不同耳石区域 Sr/Ca 差异显著 ($P < 0.05$)。Na/Ca 先增大后减小 (图 3-b), 暗区最高, 各相邻区域间差异极显著 ($P < 0.01$), 而核心区和边缘区差异不显著 ($P > 0.05$)。Mn/Ca 在核心区

最高, 随后减小, 外围区最低, 在边缘区增大 (图 3-c), 核心区与后核心区和外围区差异显著, 与边缘区差异不显著。Ba/Ca 先减小后增大, 在暗区最低, 核心区与后核心区和边缘区无显著性

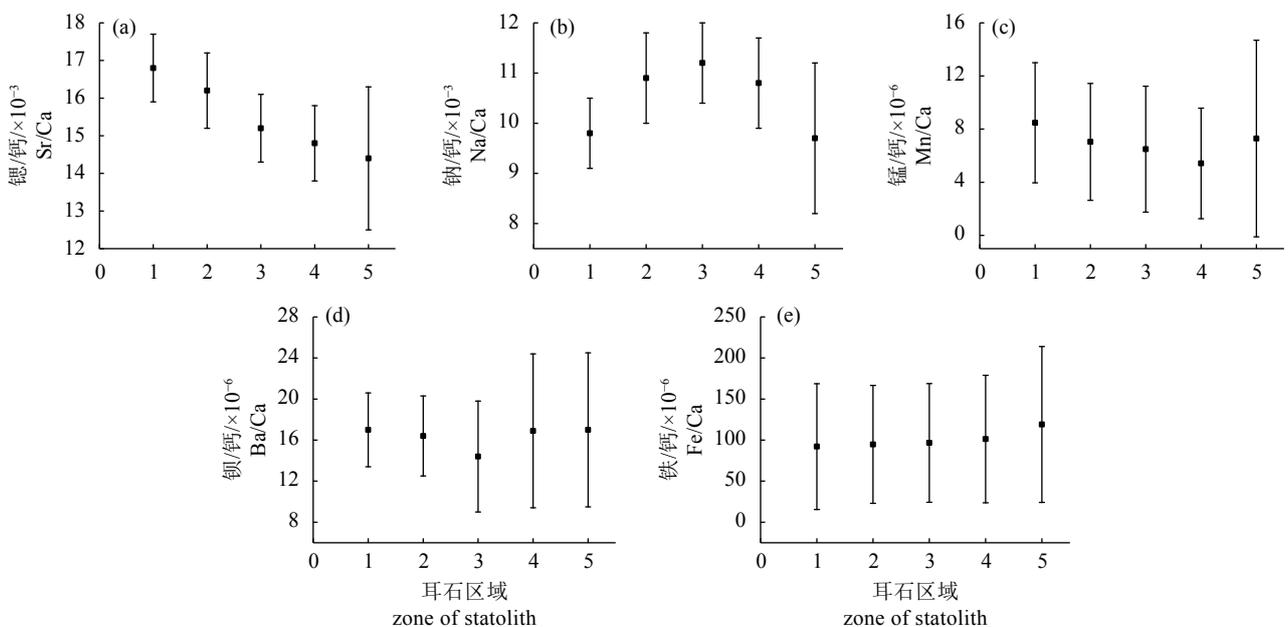


图3 不同耳石区域耳石微量元素与钙的比值

Fig.3 Ratios of elements to Ca at different statolith zones of *S. oualaniensis*

差异(图 3-d)。Fe/Ca 在不同耳石区域无显著性差异(图 3-e)，两两比较发现，核心区、后核心区和暗区与边缘区存在显著差异 ($P<0.05$)。耳石微量元素 Sr/Ca、Na/Ca、Mn/Ca、Ba/Ca、Fe/Ca 随着鸬乌贼日龄的增加其变化趋势与耳石区域的微量元素变化较一致(图 4)。

2.3 不同产卵群体耳石微量元素与 Ca 的比值

不同产卵群体鸬乌贼耳石微量元素除 Na/Ca 和 Fe/Ca 有显著性差异外 ($P<0.01$)，其余元素无显著性差异 ($P>0.05$)。在不同耳石区域，夏季和冬季产卵群体 Fe/Ca 差异显著，冬季最高、秋季次之、夏季最低(图 5-e)。Na/Ca 先增大后减小，夏季和

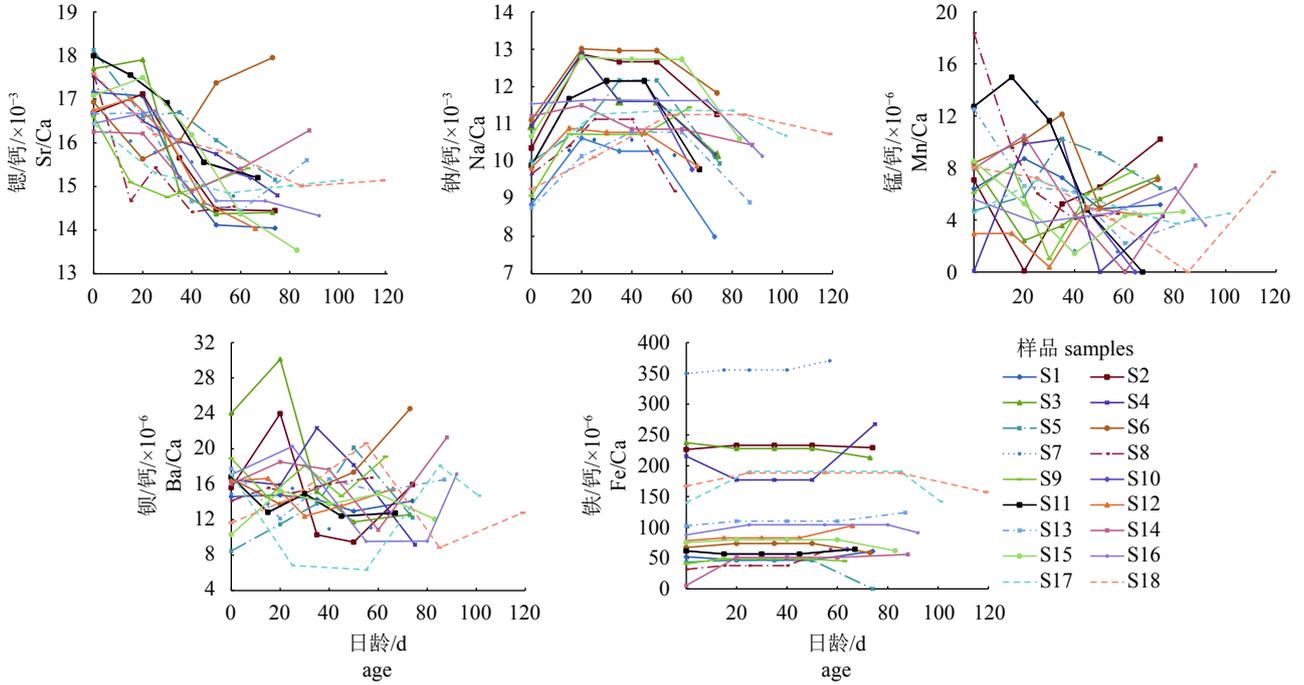


图4 不同日龄阶段耳石微量元素与钙的比值

Fig.4 Ratios of elements to Ca of different ages of *S. oualaniensis*

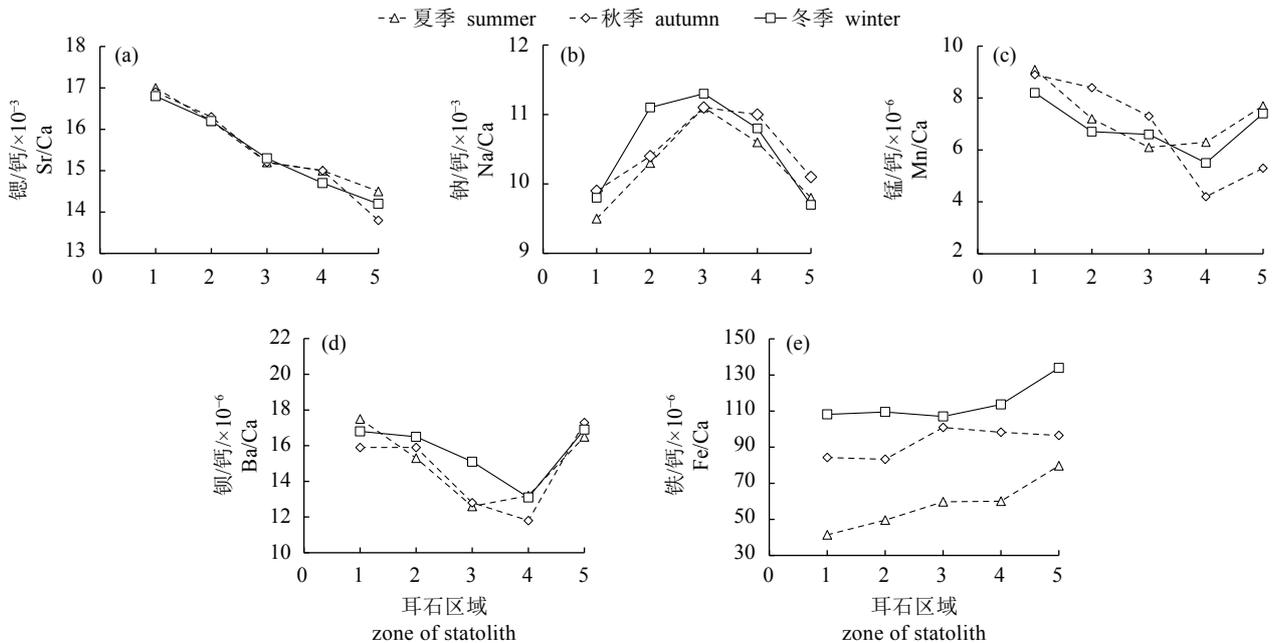


图5 不同产卵群体耳石元素与钙的比值

Fig.5 Ratios of elements to Ca in different hatching groups

冬季产卵群体的 Na/Ca 在耳石核心区与后核心区差异性显著, 其他区域差异性不显著 (图 5-b)。耳石微量元素 Sr/Ca、Mn/Ca、Ba/Ca 在不同耳石区域间不存在季节性差异 (图 5-a, c, d)。

2.4 不同地理区域耳石微量元素与 Ca 的比值

根据采样站位, 将南海鸢乌贼划分为东沙、西

沙和南沙 3 个地理群体。耳石 Fe/Ca 在东沙海域最高、西沙海域次之、南沙海域最低。东沙与南沙海域存在显著性差异 ($P < 0.01$), 与西沙海域不存在显著性差异; 西沙和南沙海域不存在显著性差异 ($P > 0.05$)。耳石 Sr/Ca、Na/Ca、Ba/Ca 和 Mn/Ca 在不同海域间差异性不显著 (图 6)。

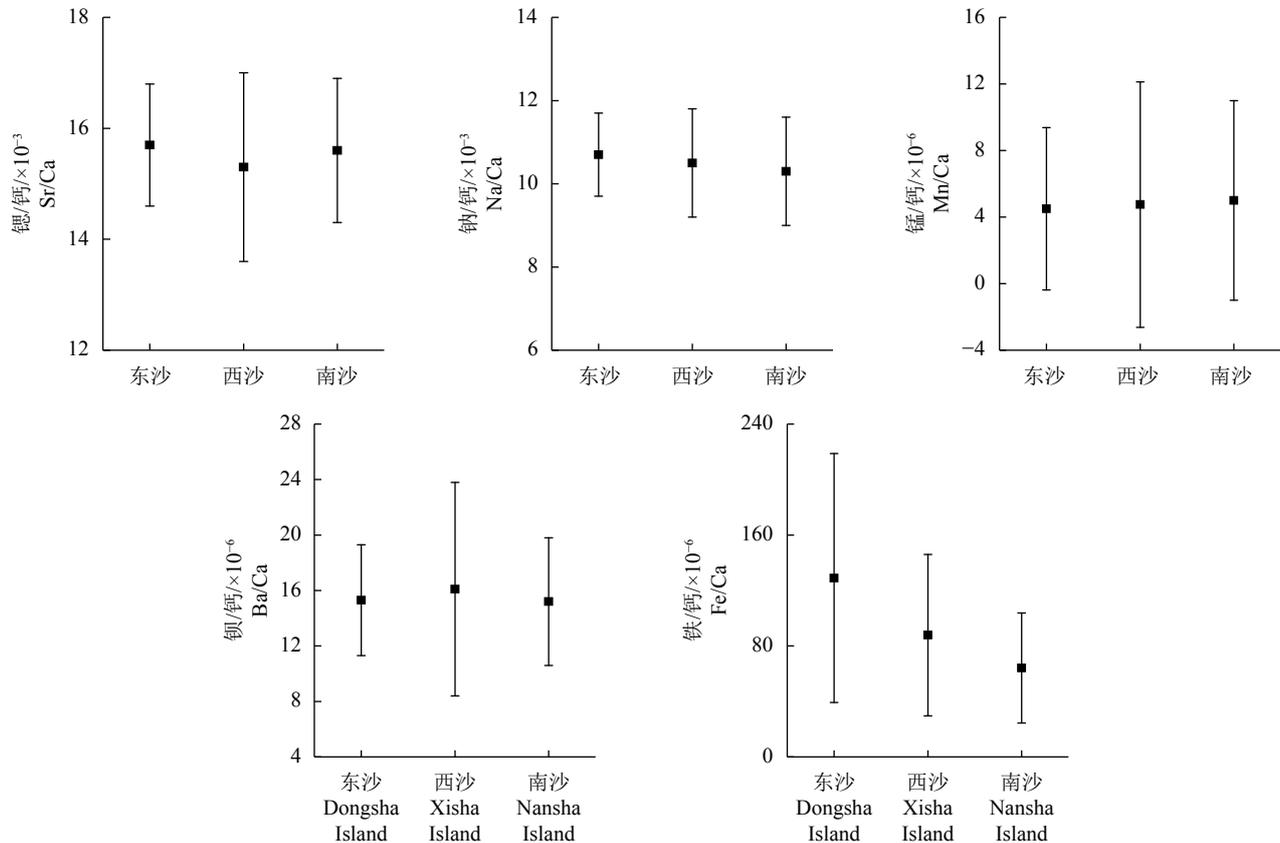


图6 不同地理区域耳石微量元素与钙的比值

Fig.6 Ratios of elements to Ca in different geographical areas

2.5 微量元素与环境因子

在 0~50 m 水层中, 幼虫和幼体期的鸢乌贼耳石 Sr/Ca 与温度呈正相关、与盐度呈负相关 (图 7), 其余微量元素/Ca 与温度、盐度无明显的相关性。线性方程为 $R_{Sr/Ca} = 0.40T + 5.86$ ($R^2 = 0.50$); $R_{Sr/Ca} = -0.57x + 34.51$ ($R^2 = 0.21$)。亚成体和成体期的鸢乌贼耳石微量元素 Ba/Ca 与盐度有微弱的正相关性 (图 8), 其余元素/Ca 与温度、盐度无明显的相关性。线性方程为 $R_{Ba/Ca} = 2.65x - 72.66$ ($R^2 = 0.20$)。

3 讨论

3.1 不同耳石区域微量元素分析

鸢乌贼耳石微结构一般划分为核心区、后核心区、暗区和外围区^[19]。这些生长区对应着不同的个

体发育阶段, 其中耳石零轮以内的为核心区, 代表胚胎期, 后核心区代表幼虫期, 暗区代表幼年期, 外围区则代表亚成体和成体期^[20]。耳石核心区的微量元素浓度与其他区域有很大差别。Yatsu 等^[21] 研究认为头足类 Sr/Ca 在胚胎期可能受到不同方式的影响, 在胚胎期, 由于胚胎外膜的保护, 卵内的发育环境与外界的水环境隔离开, 其营养物质主要来源于自身携带的卵黄囊。Bustamante 等^[22] 研究表明墨鱼 (*Sepia officinalis*) 卵外的保护膜可以使胚胎免受痕量金属如锌 (Zn) 和镉 (Cd) 的影响。分析卵黄囊以及卵内液体的微量元素组成, 可以进一步了解耳石核心区微量元素与它们之间的关系。Sr 元素在耳石微量元素中的浓度仅次于 Ca 元素, 是耳石发育过程中不可或缺的元素之一, 在头足类的耳

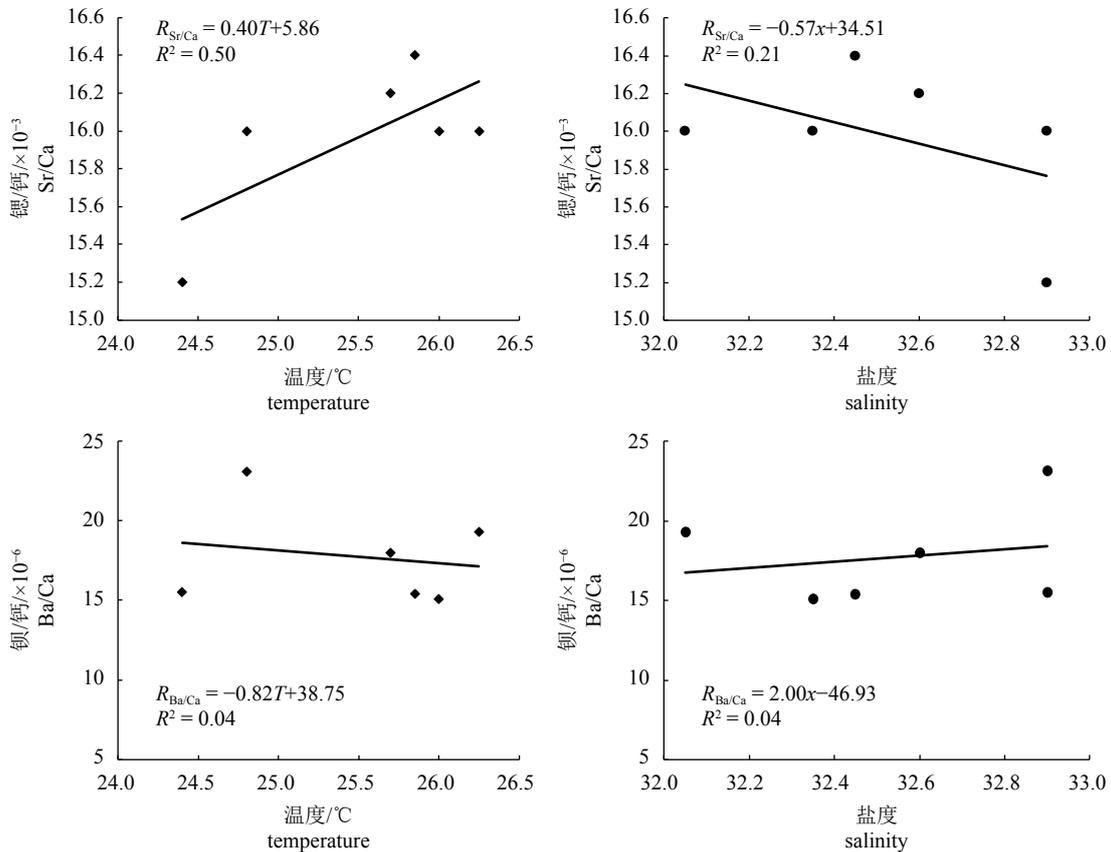


图7 幼体期鸢乌贼耳石微量元素比值与温度、盐度的关系

Fig.7 Relationship trace element ratio and temperature and salinity of statolith of larvae

石生物矿化过程中扮演着重要的角色^[13]。南海鸢乌贼耳石 Sr/Ca 在核心区最高, 随后逐渐降低, 在边缘区最低, Na/Ca 在暗区最高, 呈倒置“U”型分布, Ba/Ca 在暗区最低, 呈“U”型分布。哥斯达黎加外海茎柔鱼不同耳石区域的微量元素均值变化与本研究相同^[17], 而迪斯科湾贻乌贼 (*Gonatus fabricii*)^[23] 和北太平洋柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*)^[21] 核心区至外围区耳石 Sr/Ca 均值呈“U”型分布。南海鸢乌贼 Mn/Ca 核心区最高, 随后逐渐降低, 在边缘区增大。智利外海茎柔鱼耳石 Mn/Ca 从核心到外围区先减少后增加^[24], 而迪斯科湾贻乌贼耳石 Mn/Ca 呈倒“U”型分布^[23]。Arkhipkin 等^[25] 分析认为 Mn/Ca 产生差异的原因可能来源于物种特定的吸收机制或仪器误差, 而非环境因素, 并观察发现随着鱿鱼胴长的增加, Mn/Ca 减小, 本研究中 Mn/Ca 随着个体日龄的增加整体呈减小趋势。

3.2 不同群体耳石微量元素分析

3 个产卵群体中, 耳石核心区、后核心区和暗区的 Sr/Ca 几乎相同, 在外围区及边缘区出现微小的变化, 外围区夏季群体 Sr/Ca 较高, 而在边缘区

最低。虽然 Sr/Ca 在不同产卵群体中无显著差异, 但是可以得出鸢乌贼在亚成体和成体期经历了不同的水环境变化, 因为此时的鸢乌贼具有较强的游泳能力。

南海鸢乌贼耳石 Na/Ca 为 $(10.5 \pm 1.2) \times 10^{-3}$ 、茎柔鱼 Na/Ca 为 $(8.6 \sim 12.8) \times 10^{-3}$ ^[26], 两者相近, 低于迪斯科湾贻乌贼 $[(15 \sim 22) \times 10^{-3}]$ ^[23]。耳石 Na/Ca 先增大后减小, 在幼体期到成体期不断下降, 在耳石核心区和后核心区, Na/Ca 在夏季和冬季产卵群体中差异显著, 可用于不同产卵群体的划分。而 Liu 等^[26] 分析认为茎柔鱼 Na/Ca 在不同产卵群体中无显著性差异, 不能用于产卵群体的划分。

Ba/Ca 在不同产卵群体中无显著性差异。而 Fe 元素是海洋初级生产力高低的主要限制因子^[27]。徐红云^[28] 研究表明南海北部海域海洋净初级生产力由北向南递减, 在南部海域沿海区域较高, 而在南部深水海盆存在低值中心。由此判断东沙海域的净初级生产力高于西沙海域、南沙海域较低, 与耳石 Fe/Ca 在东沙海域最高、西沙海域次之、南沙海域最低相对应。Fe/Ca 在不同群体中存在显著性差

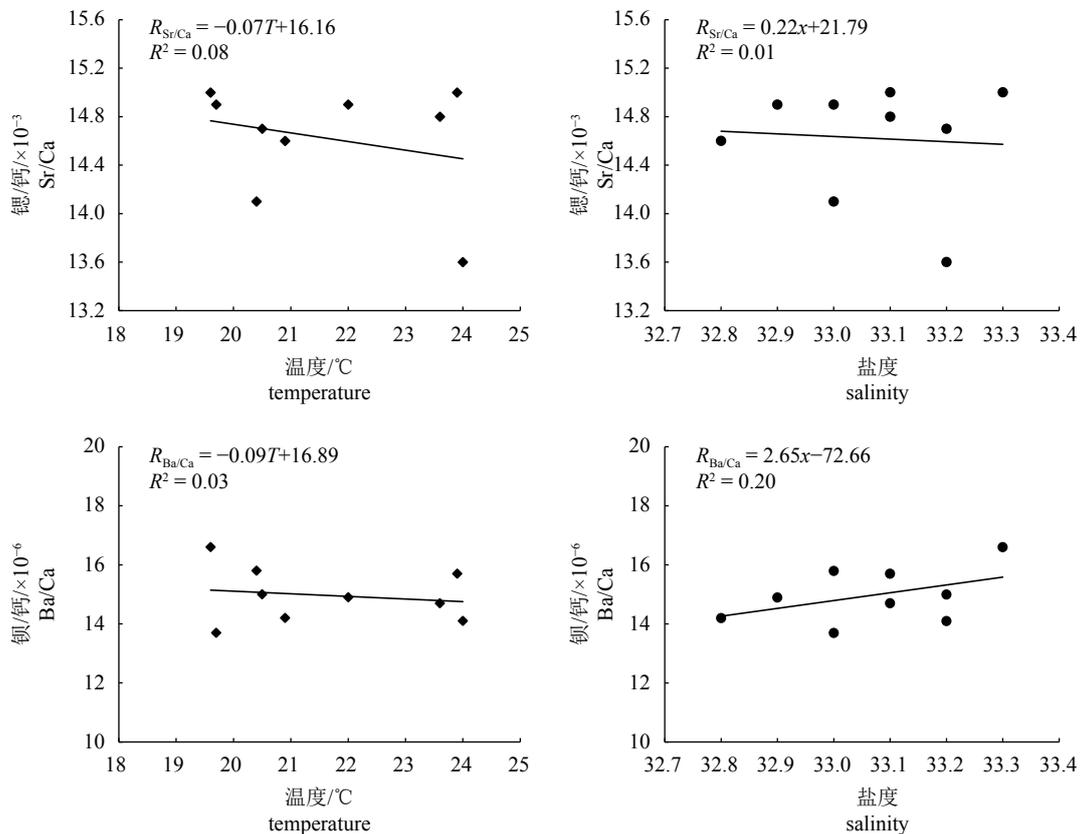


图8 成体期耳石微量元素比值与温度、盐度的关系

Fig.8 Relationship among trace element ratio and temperature and salinity of statolith of adult

异，因此可用于南海鳶乌贼不同群体的划分。

3.3 耳石微量元素与环境因子的关系

本研究表明南海海域鳶乌贼幼体期耳石 Sr/Ca 与温度呈正相关、与盐度呈负相关，但鳶乌贼成体期耳石 Sr/Ca 与温度和盐度均无相关性。耳石 Sr/Ca 在胚胎期最高，随后逐渐降低，这与鳶乌贼早期生活在海洋表层，随着个体发育和游泳能力的增强，不断向海洋水层下方移动相对应。成体期的柔鱼类昼夜垂直移动，白天生活在深层冷水区、晚上在表层暖水区活动，生活环境的温度变化较大^[17]。南海鳶乌贼耳石 Sr/Ca 在不同地理区域差异不显著，可以排除水平迁移带来的环境变化。鳶乌贼的昼夜垂直移动可能是导致成体期耳石 Sr/Ca 与温度无相关性的原因。所以，鳶乌贼幼体期耳石 Sr/Ca 浓度可以作为温度的指示剂。而随着海水深度的增加，盐度也在增加，鳶乌贼幼体期耳石 Sr/Ca 与盐度存在微弱的负相关性，进一步佐证了鳶乌贼早期生活阶段栖息环境的变化。

Ba 浓度随着海水深度增加而升高^[23]，南海鳶乌贼耳石 Ba/Ca 在成体期与盐度呈弱相关，而深水

层的盐度值高，可以推断鳶乌贼成体期生活在较深的海域。南海鳶乌贼耳石 Ba/Ca 在幼体期最低，成体期最高，这与幼体生活在海洋表层、成体生活在深水层相对应。因而，可以把 Ba/Ca 作为头足类垂直移动的有效指标。

致谢：中国水产科学研究院南海水产研究所江艳娥在耳石提取方面给予的指导，钟智辉和陈盟基等在样品采集方面提供的帮助，徐亮、王守信和柯兰香等在实验过程中的协作，广东海洋大学侯刚老师在论文写作方面给予的启发和建议，谨此致谢！

参考文献：

- [1] 董正之. 世界大洋经济头足类生物学 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991: 91-94.
- [2] 李斌, 陈国宝, 郭禹, 等. 南海中部海域渔业资源时空分布和资源量的水声学评估 [J]. 南方水产科学, 2016, 12(4): 28-37.
- [3] 刘必林, 陈新军, 钟俊生. 采用耳石研究印度洋西北海域鳶乌贼的年龄、生长和种群结构 [J]. 大连水产学院学报, 2009, 24(3): 206-212.
- [4] 招春旭, 陈昭澎, 何雄波, 等. 基于耳石微结构的南海春季鳶乌贼日龄、生长与种群结构的研究 [J]. 水生生物学报, 2017, 41

- (4): 884-890.
- [5] 徐红云, 崔雪森, 周为峰, 等. 基于海洋遥感的南海外海鸢乌贼最适栖息环境分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3080-3085.
- [6] 余景, 胡启伟, 李纯厚, 等. 西沙—中沙海域春季鸢乌贼资源与海洋环境的关系[J]. 海洋学报, 2017, 39(6): 62-73.
- [7] 张鹏, 晏磊, 杨炳忠, 等. 春季南沙海域鸢乌贼种群结构特征的研究[J]. 南方水产科学, 2015, 11(5): 11-19.
- [8] 朱凯, 杜飞雁, 王雪辉, 等. 南海中南部鸢乌贼中型种群群体结构[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1370-1376.
- [9] 刘必林. 头足类耳石[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 28-30.
- [10] GILLANDERS B M, WILKINSON L M, MUNRO A R, et al. Statolith chemistry of two life history stages of cuttlefish: effects of temperature and seawater trace element concentration[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 101: 12-23.
- [11] LIU B L, CAO J, TRUESDELL S B, et al. Reconstructing cephalopod migration with statolith elemental signatures: a case study using *Dosidicus gigas*[J]. *Fish Sci: FS*, 2016, 82(3): 425-433.
- [12] ARKHIPKIN A I, ALEXANDER I. Statoliths as 'black boxes' (life recorders) in squid[J]. *Mar Freshw Res*, 2005, 56(5): 573-583.
- [13] 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.
- [14] LIU B L, CHEN X J, CHEN Y, et al. Geographic variation in statolith trace elements of the Humboldt squid, *Dosidicus gigas*, in high seas of Eastern Pacific Ocean[J]. *Mar Biol*, 2013, 160(11): 2853-2862.
- [15] ZUMHOLZ K, HANSTEEN T H, PIATKOWSKI U, et al. Influence of temperature and salinity on the trace element incorporation into statoliths of the common cuttlefish (*Sepia officinalis*)[J]. *Mar Biol*, 2007, 151(4): 1321-1330.
- [16] CHEN X J, LU H J, LIU B L, et al. Age, growth and population structure of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas*, based on statolith microstructure off the EEZ of Chilean waters[J]. *J Mar Biol Ass UK*, 2010, 91(1): 229-235.
- [17] 李建华, 陈新军, 刘必林, 等. 哥斯达黎加外海茎柔鱼耳石的微量元素[J]. 水产学报, 2013, 37(4): 502-511.
- [18] LIU Y, HU Z, GAO S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chem Geol*, 2008, 257(1): 34-43.
- [19] ARKHIPKIN A I, BJORKE H. Statolith shape and microstructure as indicators of ontogenetic shifts in the squid *Gonatus fabricii* (Oegopsida, Gonatidae) from the Norwegian Sea[J]. *Polar Biol*, 2000, 23(1): 1-10.
- [20] ARKHIPKIN A I, BJORKE H. Ontogenetic changes in morphometric and reproductive indices of the squid *Gonatus fabricii* (Oegopsida, Gonatidae) in the Norwegian Sea[J]. *Polar Biol*, 1999, 22(6): 357-365.
- [21] 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]. *Mar Biol*, 1998, 131(2): 275-282.
- [22] BUSTAMANTE P, TEYSSIE J L, FOWLER S W, et al. Biokinetics of zinc and cadmium accumulation and depuration at different stages in the life cycle of the cuttlefish *Sepia officinalis*[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2002, 231(1): 167-177.
- [23] ZUMHOLZ K, ANDREAS K, HANSTEEN T, et al. Statolith microchemistry traces the environmental history of the boreoatlantic armhook squid *Gonatus fabricii*[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2007, 333(1): 195-204.
- [24] 陆化杰, 刘必林, 陈新军, 等. 智利外海茎柔鱼耳石微量元素研究[J]. 海洋渔业, 2013, 35(3): 269-277.
- [25] ARKHIPKIN A I, CAMPANA S E, FITZGERALD J, et al. Spatial and temporal variation in elemental signatures of statoliths[J]. *Can J Fish Aqua Sci*, 2004, 61(7): 1212-1224.
- [26] 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]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2011, 429(93): 93-101.
- [27] 沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1990: 122-123.
- [28] 徐红云. 南海外海鸢乌贼栖息地分布与关键环境因子分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 32-33.