

许巍, 刘必林, 陈新军, 等. 茎柔鱼眼睛晶体微量元素地理差异及其与水温关系[J]. 海洋学报, 2021, 43(6): 90–97, doi:10.12284/hyxb2021102
Xu Wei, Liu Bilin, Chen Xinjun, et al. Geographical differences and their relationship with sea surface temperature of trace elements in the eye lenses of Jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*)[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(6): 90–97, doi:10.12284/hyxb2021102

茎柔鱼眼睛晶体微量元素地理差异及其与水温关系

许巍¹, 刘必林^{1,2,3,4*}, 陈新军^{1,2,3,4}, 陈勇^{1,5}, 操亮亮¹, 桓梦瑶¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续发展教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 本研究以 2015 年和 2017 年我国远洋鱿钓渔船在东南太平洋的厄瓜多尔、秘鲁和智利公海生产时采集的茎柔鱼眼睛晶体为研究材料, 采用 LA-ICPMS 测定了眼睛晶体外缘的微量元素, 比较微量元素地理区域间差异, 分析微量元素浓度与茎柔鱼栖息水温的关系。结果显示, 厄瓜多尔、秘鲁和智利公海的茎柔鱼眼睛晶体外缘 Mg²⁵、Ni⁶⁰、Cu⁶³、Sr⁸⁸ 和 Ba¹³⁷ 等元素在 3 个海区之间存在显著差异 ($p < 0.05$), Na²³、Al²⁷、Si²⁹、P³¹、Ca⁴³、Mn⁵⁵、Zn⁶⁶ 和 Pb 等元素在两两海区之间均不存在显著差异 ($p > 0.05$)。除了 Sr⁸⁸、Ba¹³⁷、Fe⁵⁷ 和 Ni⁶⁰ 与海表面温度呈显著的线性负相关, 其他元素与海表面温度均无显著的相关关系。分析认为, Sr⁸⁸、Ba¹³⁷、Fe⁵⁷ 和 Ni⁶⁰ 均可以看作茎柔鱼生活水温的指示元素, Ba¹³⁷ 元素还可以看作茎柔鱼生活水深以及上升流的指示元素。研究认为, 眼睛晶体微量元素可用于头足类栖息环境的重建。

关键词: 茎柔鱼; 眼睛晶体; 微量元素; 海表面温度; 东南太平洋

中图分类号: S917; S931

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)06-0090-08

1 引言

茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*) 是广泛洄游的大洋性浅海种, 主要分布于东太平洋 30°N~40°S 的海域, 近年来, 其分布区域逐步向两极扩散, 最北可达到阿拉斯加 60°N, 最南可达到智利南部 50°S^[1]。茎柔鱼资源丰富, 其丰度与补充量和环境息息相关^[2-4], 在秘鲁已形成了重要的近岸手工性渔业和公海工业性渔业^[5-6]。20 世纪 90 年代初, 日本和韩国开始对秘鲁海域的茎柔鱼进行大规模商业性捕捞^[7]。2001 年我国渔船在秘鲁公海开始捕捞^[7], 目前已开发厄瓜多尔、秘鲁和智利公海 3 大渔场, 近年来最高年产量超过 30 万 t。

鱼类眼睛晶体的生长是上皮细胞由“前极”开始

不断纤维化并延长至“后极”以及一层层累积的过程^[8]。由于仅上皮细胞层和新形成的纤维层存在蛋白质合成的细胞器以及其他代谢和分解过程^[9], 眼睛晶体内部成熟纤维细胞层的蛋白质代谢不活跃, 其中的微量元素一旦沉积将不会被替换, 因此可反映鱼类所对应成长阶段的生活史信息^[10-11]。

目前, 耳石^[12-15]、内壳^[16-17]、角质颚^[18-19]等硬组织中的微量元素已被广泛用于头足类种群结构^[16, 20]、栖息环境^[21]和迁徙路线^[22]等方面的研究。有研究报告^[10, 23-25]称, 由于鱼类眼睛晶体记录了其整个生命周期内的生活史信息, 因此可视为判定鱼类种群的硬组织材料的有力补充。然而, 截至目前关于头足类眼睛晶体微量元素的报道见到的仅有 1 篇^[26]。本研究采

收稿日期: 2021-01-31; 修订日期: 2021-02-27。

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901404); 国家自然科学基金 (41876141); 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位计划项目 (0810000243); 上海市科技创新行动计划 (19DZ1207502)。

作者简介: 许巍 (1980—), 男, 江苏省镇江市人, 博士, 从事渔业资源学研究。E-mail: wxu@shou.edu.cn

* 通信作者: 刘必林, 男, 教授, 主要从事渔业资源学研究。E-mail: bl-liu@shou.edu.cn

用 LA-ICPMS 测定厄瓜多尔、秘鲁和智利公海茎柔鱼眼睛晶体外缘的微量元素, 比较微量元素地理区域间差异, 分析微量元素浓度与茎柔鱼栖息水温的关系。

2 材料与方法

2.1 样本采集和处理

本文从 2015 年和 2017 我国鱿钓生产船在东南太平洋公海(图 1)生产时捕捞的渔获物中随机选取 28 尾茎柔鱼作为实验样本, 其中厄瓜多尔公海 10 尾(3°21'~8°26'S, 84°07'~91°52'W, 胴长范围为 210~357 mm, 体质量为 264~1 295 g), 秘鲁公海 13 尾(9°16'~15°22'S, 79°45'~85°03'W, 胴长范围为 226~352 mm, 体质量为 280~1 301 g), 智利公海 5 尾(37°06'~40°00'S, 79°00'~83°00'W, 胴长范围为 301~470 mm, 体质量为 538~3 012 g)(表 1)。所有样品在船上冷冻保存, 在实验室解冻后进行生物学测定、性别鉴定和性成

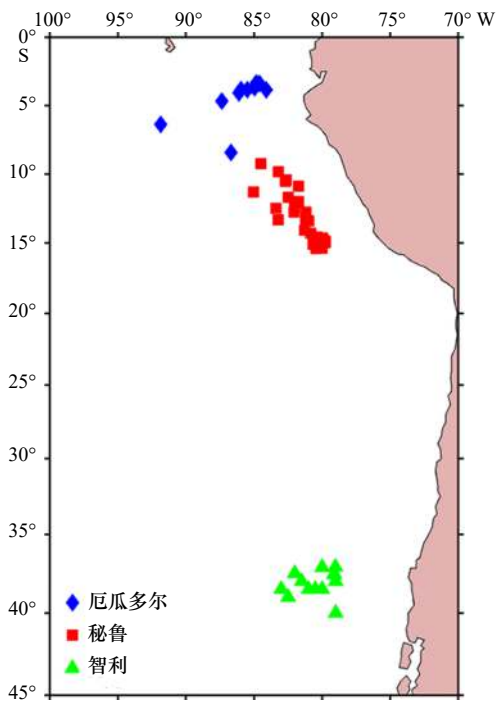


图 1 厄瓜多尔、秘鲁和智利公海茎柔鱼采样站点分布
Fig. 1 Sampling locations of *Dosidicus gigas* in the high seas of Ecuador, Peru and Chile

表 1 厄瓜多尔、秘鲁和智利公海茎柔鱼样本信息

Table 1 Sampling information of *Dosidicus gigas* in the high seas of Ecuador, Peru and Chile

海区	采样日期	采样地点	样本量/尾	胴长/mm	体质量/g
厄瓜多尔	2017年7-8月	3°21'~8°26'S, 84°07'~91°52'W	10	210~357	264~1 295
秘鲁	2015年6-9月	9°16'~15°22'S, 79°45'~85°03'W	13	226~352	280~1 301
智利	2015年11-12月	37°06'~40°00'S, 79°00'~83°00'W	5	301~470	538~3 012

熟划分。测定胴长精确至 1 mm, 体质量精确至 1 g。用手术刀将眼睛角膜切口, 用镊子取出眼睛晶体, 然后用去离子水冲洗、去污之后置于 75% 乙醇中保存。

2.2 眼睛晶体的处理

取出保存于 75% 酒精中的眼睛晶体, 用游标卡尺测定晶体最大直径, 精确至 0.01 mm。由于眼睛晶体是由前后两个部分组成(图 2), 取出后将两者分离, 保存体积较大的后半部分(图 3a), 使其平放于塑料模具中(图 3b), 倒入配置好的冷埋树脂溶液进行包埋(图 3c), 在常温避光处放置待其硬化; 将硬化后的树脂块用强力热熔胶黏于载玻片上, 先将底部磨平(图 3d), 然后倒转 180°研磨另一面(图 3e), 研磨时先后以 120 目、600 目、1 200 目、2 500 目水磨砂纸研磨成厚度约为 0.5 mm 的薄片, 然后再用 0.05 μm 氧化铝剂对薄片进行抛光(图 3f)。

2.3 晶体微量元素的测定

为减少污染物对元素测试带来的干扰, 研磨后的晶体切片在电阻率大于 18 Ω 的去离子水中清洗 5 min 后在 Class-100 层流柱中晾干。在晶体的外缘选取 1 个取样点(图 4)。

晶体微量元素浓度在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICPMS 完成。详细的仪器参数和分析流程见文献 [27]。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 Micro-Las 光学系统组成, ICPMS 型号为 Agilent 7700 e。激光剥蚀过程中采用氦气(流速: 0.7 L/min)作载气, 氩气(流速: 0.8 L/min)为补偿气以调节灵敏度, 二者在进入 ICPMS 之前通过一个 T 型接头混合, 激光剥蚀系统配置有信号平滑装置。本次分析的激光束斑直径和频率分别为 44 μm 和 5 Hz。微量元素浓度处理中采用玻璃标准物质 BHVO-2G、BCR-2G、BIR-1G 和 SRM610 进行多外标无内标校正。每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。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以及元素浓度计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成。

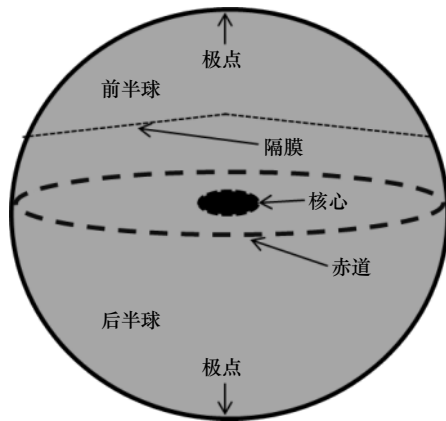


图 2 茎柔鱼眼睛晶体示意图

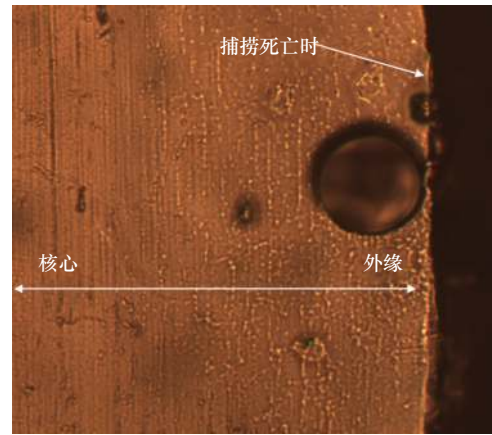
Fig. 2 Diagram of eye lens of *Dosidicus gigas*

图 4 茎柔鱼眼睛晶体外缘取样点

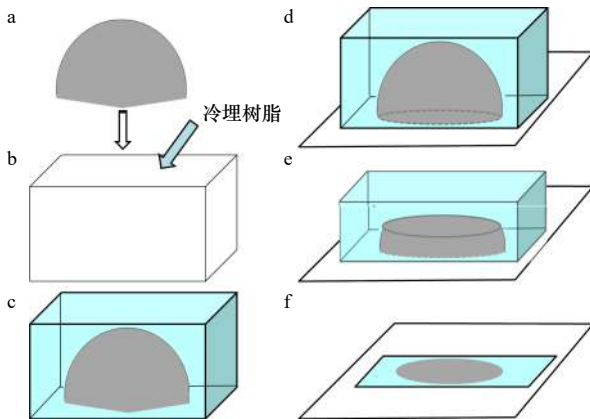
Fig. 4 Spot in peripheral part of eye lens formed at newly ontogenetic phase of *Dosidicus gigas*

图 3 眼睛晶体切片制作流程

Fig. 3 Flow charts of eye lens preparation

- a. 眼睛晶体后部; b. 塑料磨具; c. 经过冷埋树脂包埋的眼睛晶体;
d-f. 切割后的树脂块黏于载玻片上并研磨至赤道面
a. Posterior eye lens; b. plastic moulding; c. posterior eye lens embedded
in the resin; d-f. the resin block is adhered to the slide and ground to the
equatorial surface

2.4 水温数据的获取

在 <http://iridl.ldeo.columbia.edu> 下载各采样站点 1 周前海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 均值数据, 空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

2.5 数据统计与分析

采用 ANOVA 分析各元素海区间差异, 利用线性回归方程拟合各元素与 SST 关系。

3 结果

3.1 微量元素浓度

茎柔鱼眼睛晶体全元素测定实验结果显示, 在仪器有效检测范围内的元素有 Na^{23} 、 Mg^{25} 、 Al^{27} 、 Si^{29} 、 P^{31} 、 K^{39} 、 Ca^{43} 、 Mn^{55} 、 Fe^{57} 、 Ni^{60} 、 Cu^{63} 、 Zn^{66} 、 Sr^{88} 、 Ba^{137} 和 Pb 共 15 种, 其中 P^{31} 浓度最高, 之后从高到低

依次为 Al^{27} 、 Ca^{43} 、 Si^{29} 、 Na^{23} 、 K^{39} 、 Mg^{25} 、 Zn^{66} 、 Cu^{63} 、 Fe^{57} 、 Mn^{55} 、 Ni^{60} 、 Sr^{88} 、 Ba^{137} 和 Pb (表 2)。按海区分析显示 (表 2), 厄瓜多尔公海 P^{31} 浓度最高, 之后依次为 Al^{27} 、 Ca^{43} 、 Si^{29} 、 Na^{23} 、 K^{39} 、 Mg^{25} 、 Cu^{63} 、 Zn^{66} 、 Fe^{57} 、 Ni^{60} 、 Mn^{55} 、 Sr^{88} 、 Ba^{137} 和 Pb ; 秘鲁公海 P^{31} 浓度最高, 之后由高到低依次为 Al^{27} 、 Ca^{43} 、 Si^{29} 、 Na^{23} 、 K^{39} 、 Mg^{25} 、 Zn^{66} 、 Fe^{57} 、 Cu^{63} 、 Mn^{55} 、 Sr^{88} 、 Ni^{60} 、 Pb 和 Ba^{137} ; 智利公海 P^{31} 浓度最高, 之后由高到低依次为 Ca^{43} 、 Al^{27} 、 Na^{23} 、 Si^{29} 、 K^{39} 、 Mg^{25} 、 Zn^{66} 、 Fe^{57} 、 Cu^{63} 、 Mn^{55} 、 Ni^{60} 、 Sr^{88} 、 Ba^{137} 和 Pb 。

3.2 微量元素地理区域间差异

厄瓜多尔、智利和秘鲁公海茎柔鱼眼睛晶体浓度前 5 的微量元素均为 P^{31} 、 Al^{27} 、 Ca^{43} 、 Si^{29} 、 Na^{23} , 其中 P^{31} 在 3 海区中浓度均为最高, 其余 4 种元素在 3 海区中的浓度高低排序有所不同。ANOVA 分析显示, Mg^{25} 、 Ni^{60} 、 Cu^{63} 、 Sr^{88} 和 Ba^{137} 等元素在 3 海区之间存在显著差异 ($p < 0.05$, 表 3), 然而在这些显著差异的元素中至少在某两个海区之间无差异 ($p > 0.05$, 表 2); Na^{23} 、 Al^{27} 、 Si^{29} 、 P^{31} 、 Ca^{43} 、 Mn^{55} 、 Zn^{66} 和 Pb 等元素在两两海区之间均不存在显著差异 ($p > 0.05$, 表 3)。

3.3 微量元素浓度与温度的关系

线性回归拟合分析显示, Sr^{88} 、 Ba^{137} 、 Fe^{57} 和 Ni^{60} 浓度与 SST 呈显著的线性递减关系 ($p < 0.05$), 除此之外, 其他元素与 SST 均无显著的线性关系 (图 5), 其关系式分别如下:

$$\begin{aligned} \text{Sr}^{88} &= -22.242 \text{ SST} + 570.87 \quad (R^2 = 0.2349, p = 0.009), \\ \text{Ba}^{137} &= -29.787 \text{ SST} + 658.92 \quad (R^2 = 0.3125, p = 0.002), \\ \text{Fe}^{57} &= -205.49 \text{ SST} + 5181.8 \quad (R^2 = 0.1903, p = 0.0203), \\ \text{Ni}^{60} &= -68.867 \text{ SST} + 1608.7 \quad (R^2 = 0.2715, p = 0.0045). \end{aligned}$$

表2 厄瓜多尔、秘鲁和智利公海茎柔鱼眼睛晶体外缘微量元素浓度

Table 2 Concentration of trace elements in peripheral eye lenses of *Dosidicus gigas* in the high seas of Ecuador, Peru and Chile

元素	浓度/ 10^{-6}			
	三海区总体	厄瓜多尔	秘鲁	智利
Na ²³	28 397±23 103	19 991±14 855 ^a	31 662±28 466 ^a	36 720±19 430 ^a
Mg ²⁵	10 629±9 992	3 843±4 420 ^a	13 875±11 586 ^b	15 762±6 707 ^b
Al ²⁷	96 260±125 462	131 503±133 837 ^a	75 553±140 866 ^a	79 615±39 657 ^a
Si ²⁹	33 878±19 111	31 156±19 894 ^a	39 253±20 382 ^a	25 348±11 186 ^a
P ³¹	247 985±111 951	221 034±140 584 ^a	268 912±109 203 ^a	247 474±33 373 ^a
K ³⁹	15 484±12 565	8 167±5 436 ^a	20 487±1 585 ^b	17 110±5 166 ^{ab}
Ca ⁴³	68 303±95 317	90 218±155 137 ^a	43 776±20 838 ^a	88 240±47 102 ^a
Mn ⁵⁵	510±971	188±286 ^a	534±1 241 ^a	1 091±933 ^a
Fe ⁵⁷	1 169±1 272	1 099±757 ^{ab}	790±834 ^a	2 296±234 ^b
Ni ⁶⁰	264±357	218±216 ^a	131±210 ^a	701±567 ^b
Cu ⁶³	1 177±1 122	1 836±1 494 ^a	623±604 ^b	1 302±523 ^{ab}
Zn ⁶⁶	2 051±1 601	1 195±1 203 ^a	2 404±1 895 ^a	2 845±492 ^a
Sr ⁸⁸	137±124	75±71 ^a	138±109 ^a	257±170 ^b
Ba ¹³⁷	77±144	56±80 ^a	29±49 ^a	245±273 ^b
Pb	34±21	27±13 ^a	37±27 ^a	45±14 ^a

注: 以a、b表示海区元素浓度差异水平 ($p < 0.05$)。

表3 厄瓜多尔、秘鲁和智利公海茎柔鱼眼睛晶体外缘微量元素方差分析结果

Table 3 ANOVA results of trace elements in peripheral eye lenses of *Dosidicus gigas* in the high seas of Ecuador, Peru and Chile

元素	方差平方和	均方差	自由度1	自由度2	F	p
Na ²³	1.19×10 ⁹	5.96×10 ⁸	2	26	1.127	0.34
Mg ²⁵	7.29×10 ⁸	3.65×10 ⁸	2	26	4.635	0.019
Al ²⁷	1.94×10 ¹⁰	9.69×10 ⁹	2	26	0.597	0.558
Si ²⁹	8.14×10 ⁸	4.07×10 ⁸	2	26	1.124	0.341
P ³¹	1.30×10 ¹⁰	6.48×10 ⁹	2	26	0.498	0.614
K ³⁹	8.74×10 ⁸	4.37×10 ⁹	2	26	3.224	0.057
Ca ⁴³	1.46×10 ¹⁰	7.31×10 ⁹	2	26	0.792	0.464
Mn ⁵⁵	2 734 390.992	1 367 195.496	2	26	1.506	0.241
Fe ⁵⁷	8 268 121.63	4 134 060.815	2	26	2.917	0.073
Ni ⁶⁰	1 207 061.18	603 530.59	2	26	6.755	0.005
Cu ⁶³	8 410 317.756	4 205 158.878	2	26	4.112	0.029
Zn ⁶⁶	12 099 595.63	6 049 797.816	2	26	2.649	0.09
Sr ⁸⁸	110 045.401	55 022.701	2	26	4.513	0.021
Ba ¹³⁷	174 712.54	87 356.27	2	26	5.679	0.009
Pb	1 397.56	698.78	2	26	1.589	0.224

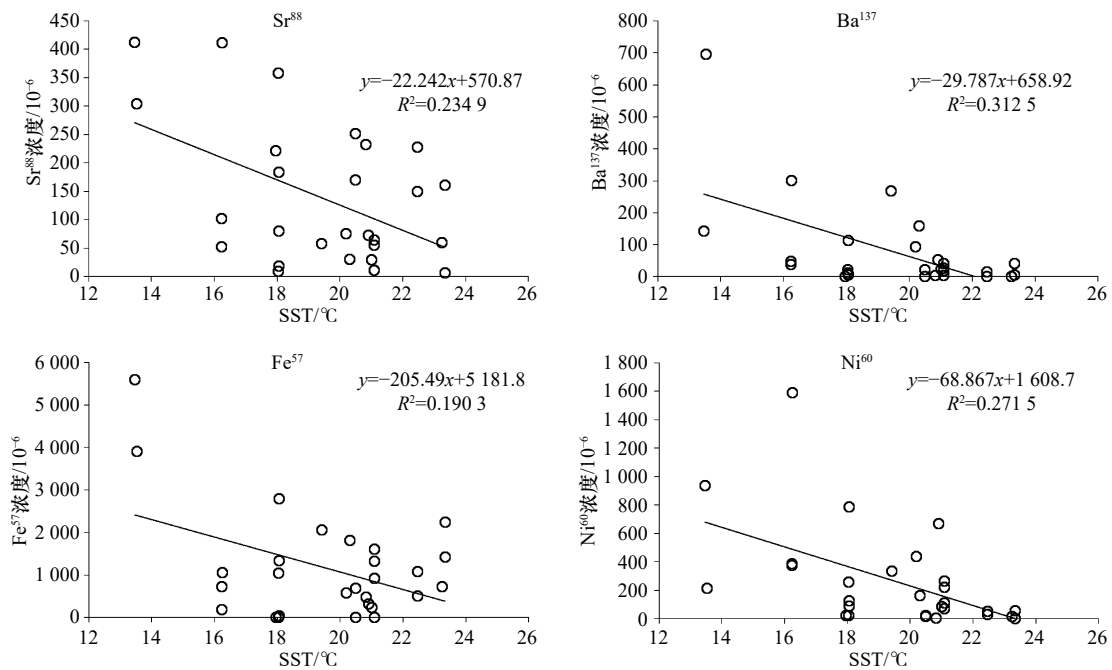


图5 Sr⁸⁸、Ba¹³⁷、Fe⁵⁷ 和 Ni⁶⁰ 浓度与海表面温度呈显著的负相关关系
Fig. 5 The negative relationships between SST with concentration of Sr⁸⁸、Ba¹³⁷、Fe⁵⁷ and Ni⁶⁰

4 讨论

4.1 微量元素与环境的关系

海洋生物硬组织微量元素的沉积是个复杂的过程,它受海水物理、化学特性,生物体年龄、生长、生理、代谢以及遗传等因素影响^[28]。近年来,有关头足类耳石微量元素的报道比较多,研究认为,耳石微量元素的富集与头足类生活的水环境特性,如温度、盐度和食物等有关^[13, 29]。本研究发现,茎柔鱼眼睛晶体外缘(捕捞死亡时)部分微量元素存在显著的地理区域差异,类似的研究在茎柔鱼^[6]、蓝旗金枪鱼 *Thunnus orientalis*^[30]、巴塔哥尼亚犬牙鱼 *Dissostichus eleginoides*^[31] 和太平洋鲱 *Clupea pallasii*^[32] 的耳石中也有报道。因此,眼睛晶体中微量元素的变化可以用来指示海洋生物生活水域的物理、化学特性。

海洋生物硬组织中的微量元素被广泛用于重建其生活水温。Swart 等^[33] 报道,环圆菊珊瑚 *Montastraea annularis* 骨格中的 Sr/Ca 与 SST 关系显著。Zacherl^[34] 研究发现,克萊特峨螺 *Kelletia Kelletii* 耳石中 Sr 和 Ba 与生活水温呈反比关系。Campana^[35] 认为,鱼类耳石的微量元素可用来重建其栖息水温。过去有相关研究是根据耳石中的微量元素浓度,重建了一些头足类的栖息水温^[13, 14, 36-38]。本研究对茎柔鱼眼睛晶体外缘的微量元素与捕捞地点的 SST 进行了相关性分析,结果显示, Sr⁸⁸、Ba¹³⁷、Fe⁵⁷ 和 Ni⁶⁰ 浓度与

SST 呈显著的线性递减关系 ($p < 0.05$), 这为通过眼睛晶体的微量元素推测茎柔鱼的栖息水温提供了基础。

4.2 Sr、Ba 与栖息水温的关系

Sr 元素被认为是头足类栖息水温重建的重要元素之一。Ikeda 等^[13, 36] 研究发现,太平洋褶柔鱼 *Todarodes pacificus* 和水蛸 *Octopus dofleini* 耳石微量元素与栖息水温呈明显的负相关。Arkhipkin 等^[14] 认为,巴塔哥尼亚枪乌贼 *Doryteuthis gahi* 耳石中的微量元素与历史综合水温呈反比例关系。日本海域长枪乌贼 *Loligo bleekeri* 耳石 Sr/Ca 明显高于安达曼海和泰国湾的热带枪乌贼^[38]。本研究中,水温偏高的厄瓜多尔海域茎柔鱼眼睛晶体 Sr 浓度明显低于水温偏低的秘鲁和智利海域(表 2),且线性回归显示, Sr⁸⁸ 浓度与 SST 呈明显的负相关(图 5, $p < 0.05$),同样的结果在茎柔鱼的耳石中也有报道^[6]。然而也有报道^[39] 称,尽管厄尔尼诺年份水温比正常年份高 2.5 °C,但是茎柔鱼耳石中的微量元素却没有明显差异。

本研究发现,茎柔鱼眼睛晶体中 Ba¹³⁷ 浓度与 SST 呈显著的负相关关系,这在茎柔鱼^[12]、巴塔哥尼亚枪乌贼^[14] 和贻乌贼 *Gonatus fabricii*^[37] 的耳石也有报道。过去的研究认为, Ba¹³⁷ 浓度不仅与水温呈负相关^[40-41], 而且可反映水体中营养盐的分布,即 Ba 浓度随着水深的增加而增大^[42]。因此, Ba 被看作是上升流以及头足类垂直移动的指示元素^[14]。Arkhipkin 等^[14] 认为,福克兰群岛大陆架水域巴塔哥尼亚枪乌贼耳石中

Ba¹³⁷ 浓度高与该海域强烈的上升流有关。然而, Liu 等^[6] 在茎柔鱼耳石中却没有发现与此相匹配的 Ba¹³⁷ 地理区域间变化, 这是因为该研究采用的是耳石整体微量元素, 它是茎柔鱼整个生命周期内获取的 Ba¹³⁷ 浓度的均值。本研究眼睛晶体外缘的微量元素代表其捕捞时的所经历的环境信息, Ba¹³⁷ 浓度能够反映其捕捞地点的环境信息。因此, 水温偏低、上升流发达的智利海域, 茎柔鱼眼睛晶体的 Ba¹³⁷ 浓度比厄

瓜多尔和秘鲁公海明显偏高。研究还发现, 茎柔鱼眼睛晶体 Fe⁵⁷ 和 Ni⁶⁰ 浓度与 SST 呈明显的线性负相关, 这与在茎柔鱼耳石中的研究结果一致^[6]。

除此之外, 其他元素浓度与 SST 无显著的相关关系。综合分析认为, Sr⁸⁸、Ba¹³⁷、Fe⁵⁷ 和 Ni⁶⁰ 均可以看作茎柔鱼生活水温的指示元素, Ba¹³⁷ 元素还可以看作茎柔鱼生活水深以及上升流的指示元素。眼睛晶体微量元素可用来重建头足类栖息环境。

参考文献:

- [1] Jereb P, Roper C F E. Cephalopods of the World: an Annotated and Illustrated Catalogue of Cephalopod Species Known to Date[M]. Rome: FAO, 2010: 315–318.
- [2] Keyl F, Argüelles J, Mariátegui L, et al. A hypothesis on range expansion and spatio-temporal shifts in size-at-maturity of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in the eastern Pacific Ocean[J]. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report, 2008, 49: 119–128.
- [3] Zeidberg L D, Robison B H. Invasive range expansion by the Humboldt squid, *Dosidicus gigas*, in the eastern North Pacific[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 104(31): 12948–12950.
- [4] Waluda C M, Yamashiro C, Rodhouse P G. Influence of the ENSO cycle on the light-fishery for *Dosidicus gigas* in the Peru Current: an analysis of remotely sensed data[J]. Fisheries Research, 2006, 79(1/2): 56–63.
- [5] Argüelles J, Rodhouse P G, Villegas P, et al. Age, growth and population structure of the jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in Peruvian waters[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 51–61.
- [6] Liu Bilin, Chen Xinjun, Chen Yong, et al. Geographic variation in statolith trace elements of the Humboldt squid, *Dosidicus gigas*, in high seas of Eastern Pacific Ocean[J]. Marine Biology, 2013, 160(11): 2853–2862.
- [7] Taipe A, Yamashiro C, Mariategui L, et al. Distribution and concentrations of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) off the Peruvian coast between 1991 and 1999[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 21–32.
- [8] Nicol J A C. The Eyes of Fishes[M]. Oxford: Oxford University Press, 1989.
- [9] Horwitz J. The function of alpha-crystallin[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 1993, 34(1): 10–22.
- [10] Gillanders B M. Trace metals in four structures of fish and their use for estimates of stock structure[J]. Fishery Bulletin-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2001, 99(3): 410–419.
- [11] Ferenbaugh J K. Elemental analysis of otoliths and eye lenses in the assessment of Steller Sea lion diets[D]. Texas: Texas Tech University, 2007.
- [12] Liu Bilin, Chen Xinjun, Chen Yong, 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Yatsu A, Mochioka N, Morishita K, et al. Strontium/calcium ratios in statoliths of the neon flying squid, *Ommastrephes bartramii* (Cephalopoda), in the North Pacific Ocean[J]. Marine Biology, 1998, 131(2): 275–282.
- [16] Doubleday Z A, Pecl G T, Semmens J M, et al. Stylet elemental signatures indicate population structure in a holobenthic octopus species, *Octopus pallidus*[J]. Marine Ecology Progress Series, 2008, 371: 1–10.
- [17] Napoleão P, Pinheiro T, Reis C S. Element characterization of the vestigial shell of *Octopus vulgaris* Cuvier, 1797[J]. Boletín, Instituto Español de Oceanografía, 2003, 19(1/4): 509–512.
- [18] Northern T J. Investigating the post mortem applications of hard parts from two common New Zealand Squid Species: *Onykia ingens* and *Nototodarus sloanii*[D]. Dunedin, New Zealand: University of Otago, 2016.
- [19] 方舟. 基于角质颚的北太平洋柔鱼渔业生态学[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
Fang Zhou. Fisheries ecology of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in North Pacific Ocean based on beak[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [20] Liu Bilin, Chen Yong, Chen Xinjun. Spatial difference in elemental signatures within early ontogenetic statolith for identifying Jumbo flying squid natal origins[J]. Fisheries Oceanography, 2015, 24(4): 335–346.
- [21] Zumholz K, Hansteen T H, Hillion F, et al. Elemental distribution in cephalopod statoliths: NanoSIMS provides new insights into nano-scale structure[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2007, 17(2): 487–491.
- [22] Ikeda Y, Arai N, Kidokoro H, et al. Strontium: calcium ratios in statoliths of Japanese common squid *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) as indicators of migratory behaviour[J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 251: 169–179.

- [23] Dove S G, Kingsford M J. Use of otoliths and eye lenses for measuring trace-metal incorporation in fishes: a biogeographic study[J]. *Marine Biology*, 1998, 130(3): 377–387.
- [24] Kingsford M J, Gillanders B M. Variation in concentrations of trace elements in otoliths and eye lenses of a temperate reef fish, *Parma microlepis*, as a function of depth, spatial scale, and age[J]. *Marine Biology*, 2000, 137(3): 403–414.
- [25] Sturm M. Migration studies of fish by measurement of strontium isotope ratios and multi-elemental patterns in otoliths using LA-ICP-MS[D]. Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2008.
- [26] 金岳. 基于硬组织的中国近海枪乌贼渔业生物学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
Jin Yue. Fishery biology of Loliginidae in China Seas based on hard tissues[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [27] Zong Keqing, Klemd R, Yuan Yu, et al. The assembly of Rodinia: the correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. *Precambrian Research*, 2017, 290: 32–48.
- [28] Soto-Jiménez M F. Trace element trophic transfer in aquatic food webs[J]. *Hidrobiológica*, 2011, 21(3): 239–248.
- [29] 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.
- [30] Rooker J R, Secor D H, Zdanowicz V S, et al. Discrimination of northern bluefin tuna from nursery areas in the Pacific Ocean using otolith chemistry[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 218: 275–282.
- [31] Ashford J R, Jones C M, Hofman E, et al. Can otolith elemental signatures record the capture site of Patagonian toothfish (*Dissostichus eleginoides*), a fully marine fish in the southern ocean?[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 62(12): 2832–2840.
- [32] Yamane K, Shirai K, Nagakura Y, et al. Spatial variation of otolith elemental composition of the Pacific herring *Clupea pallasii* in northern Japan[J]. *Aquatic Biology*, 2010, 10: 283–290.
- [33] Swart P K, Elderfield H, Greaves M J. A high-resolution calibration of Sr/Ca thermometry using the Caribbean coral *Montastraea annularis*[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(11): 1–11.
- [34] Zacherl D C. Spatial and temporal variation in statolith and protoconch trace elements as natural tags to track larval dispersal[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 290: 145–163.
- [35] Campana S E. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 188: 263–297.
- [36] Ikeda Y, Arai N, Sakamoto W, et al. Preliminary report on PIXE analysis for trace elements of *Octopus dofleini* statoliths[J]. *Fisheries Science*, 1999, 65(1): 161–162.
- [37] Zumholz K, Klügel A, Hansteen T H, et al. Statolith microchemistry traces the environmental history of the boreoatlantic armhook squid *Gonatus fabricii*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 333: 195–204.
- [38] Ikeda Y, Arai N, Sakamoto W, et al. Comparison on trace elements in squid statoliths of different species' origin: as available key for taxonomic and phylogenetic study[J]. *International Journal of PIXE*, 1997, 7(3/4): 141–146.
- [39] Ikeda Y, Yatsu A, Arai N, et al. Concentration of statolith trace elements in the jumbo flying squid during El Niño and non-El Niño years in the eastern Pacific[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2002, 82: 863–866.
- [40] Zacherl D C, Manríquez P H, Paradis G, et al. Trace elemental fingerprinting of gastropod statoliths to study larval dispersal trajectories[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 248: 297–303.
- [41] Bath G E, Thorrold S R, Jones C M, et al. Strontium and barium uptake in aragonitic otoliths of marine fish[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(10): 1705–1714.
- [42] 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]. *Marine Biology*, 2007, 151(4): 1321–1330.

Geographical differences and their relationship with sea surface temperature of trace elements in the eye lenses of Jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*)

Xu Wei¹, Liu Bilin^{1,2,3,4}, Chen Xinjun^{1,2,3,4}, Chen Yong^{1,5}, Cao Liangliang¹, Huan Mengyao¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: Samples of Jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) were collected from Chinese squid jigging vessels in the high seas of Ecuador, Peru and Chile in the southeast Pacific Ocean in 2015 and 2017. The trace elements in the eye lenses of *D. gigas* were measured to study the geographical differences and their relationship with sea surface temperature. The results showed that elements such as Mg²⁵, Ni⁶⁰, Cu⁶³, Sr⁸⁸ and Ba¹³⁷ in the peripheral part of eye lenses of *D. gigas* in the high seas of Ecuador, Peru and Chile were significant difference, while there were no significant differences between each two sea areas in the elements of Na²³, Al²⁷, Si²⁹, P³¹, Ca⁴³, Mn⁵⁵, Zn⁶⁶ and Pb. Except for Sr⁸⁸, Ba¹³⁷, Fe⁵⁷ and Ni⁶⁰, which showed significantly linear negative correlations with SST ($p < 0.05$), there were no significant correlations with SST in the other elements ($p > 0.05$). Sr⁸⁸, Ba¹³⁷, Fe⁵⁷ and Ni⁶⁰ could be regarded as indicator elements of the ambient temperature of *D. gigas*, and Ba¹³⁷ could also be regarded as indicator element of the water depth and upwelling. Consequently, trace elements in eye lenses could be used to reconstruct the habitat environment of cephalopod.

Key words: Jumbo flying squid; eye lenses; trace elements; sea surface temperature; Southeastern Pacific Ocean