

金枪鱼类耳石微化学研究进展*

朱国平^{1,2**}

(¹上海海洋大学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; ²大洋生物资源开发和利用上海市高校重点实验室,上海 201306)

摘要 近年来,基于鱼类钙化物质中微量元素和同位素等微化学成分分析已成为分析鱼类种群结构、生活史及洄游环境史等的一种新兴手段。随着鱼类耳石微化学研究及应用的日渐成熟与完善,该手段也日益成为金枪鱼类生态学研究的良好工具。目前金枪鱼类耳石微化学的研究内容主要包括微量元素和同位素等,其中微量元素是应用研究的重点和热点,其在金枪鱼类,尤其是蓝鳍金枪鱼种群划分、出生源、洄游环境史和生活史分析等方面发挥了重要的作用。但多数研究集中在耳石锶钙比率(Sr/Ca)的变化上,且关于耳石碳氧同位素分馏与温度之间的关系尚无定论。为了开发耳石微化学的巨大价值,有必要加强对其沉积机理的研究,并采用综合研究方法从时空角度分析耳石中多种微量元素的含量及其变化。

关键词 金枪鱼类 耳石 微量元素 同位素 微化学

文章编号 1001-9332(2011)08-2211-08 **中图分类号** Q954.53;S917 **文献标识码** A

Otolith microchemistry of tuna species: Research progress. ZHU Guo-ping^{1,2} (¹Ministry of Education Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; ²Key Laboratory of Shanghai Education Commission for Oceanic Fisheries Resources Exploitation, Shanghai 201306, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(8): 2211-2218.

Abstract: Microchemistry analysis of trace elements and isotopes in fishes' calcified substances is an emerging approach to analyze the population structure, life history, and migration environmental history of fishes. With the increasing improvement of the researches and applications of otolith microchemistry, this approach has been a good tool for studying the ecology of tuna species. Currently, the research contents of tuna species' otolith microchemistry mainly include trace elements and isotopes, and the former is the emphasis and hotspot in applied research, playing a vital role in the researches of population partitioning, natal origin, migration environmental history, and life history of tuna species, especially bluefin tuna. However, most of the researches are focusing on the variation of otolith's Sr/Ca ratio, and there is no final conclusion on the relationships between the fractionation of isotopes C and O in otolith and the temperature. For the sake of exploiting the huge value of otolith microchemistry, it would be necessary to strengthen the researches on the deposition mechanisms of trace elements in otolith, and to analyze the spatio-temporal variations of various trace elements in otolith by comprehensive research methods.

Key words: tuna species; otolith; trace element; isotope; microchemistry.

硬骨鱼类的内耳具有检测音波的听觉系统与维持生物体平衡的前庭系统。内耳的膜性迷路系统位

于头盖骨两侧接近中脑的位置,且分为上下两部分,上半部包含3个相互垂直的半规管与椭圆囊,其功能为运动与平衡;而下半部则包含球囊与壶囊,主要为听觉功能。内耳中有3对耳石,即砾石、扁平石与星状石,分别位于椭圆囊、球囊与壶囊内^[1]。

耳石常被用于鱼类年龄和生长方面的研究^[2]。近些年来,基于鱼类钙化物质中微量元素和同位素等微化学成分的分析已成为研究和分析鱼类种群结

* 国家“863”计划项目(2007AA092202)、国家自然科学基金项目(41006106)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金新教师基金项目(20093104120005)、上海市青年科技启明星计划项目(11QA1403000)、上海市重点学科建设项目(S30702)、上海市教委创新项目(09Y2275)和海洋渔业科学与技术浙江省重中之重学科开放课题(20100124)资助。

** 通讯作者。E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

2011-01-24 收稿,2011-05-13 接受。

构、生活史及洄游环境史等的一种新兴手段^[3],该手段也日益成为金枪鱼类(包括类金枪鱼)生态学研究的有效工具.本文拟从微量元素及稳定同位素等方面对金枪鱼类耳石的研究进行总结,并着重分析针对金枪鱼类耳石微化学分析的研究方法、常规操作过程、研究内容和应用现状,为国内学者开展金枪鱼类耳石微化学的应用研究提供基础.

1 耳石的化学组成

耳石是一种角霏石结晶(aragonite),主要由碳酸钙(CaCO_3)与有机质交互堆积形成.碳酸钙占耳石总质量的90%以上,有机质则占1%~9%不等^[4].耳石中还包含不到1%的微量元素,这些微量元素会伴随碳酸钙或有机质一同沉积于耳石上,其沉积量的多少与外界环境中的含量有关^[5],因此耳石微量元素组成可以用来重建鱼类的洄游环境史^[6].

耳石中可检测到的元素约有30种之多,依浓度的不同分为:主要元素,如钙(Ca)、氧(O)与碳(C);次要元素($>100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),如钠(Na)、锶(Sr)、钾(K)、硫(S)、氮(N)、氯(Cl)与磷(P)等;以及微量元素($<100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),如镁(Mg)、锰(Mn)、钡(Ba)与铅(Pb)等20种.虽然微量元素占耳石组成不到1%,但能提供许多环境信息,是鱼类种群生活史与栖息地利用研究中的重要指标^[5].

2 耳石微量元素的研究方法

耳石最特别的地方,莫过于它会随着鱼体的生长呈日、年周期性的增大,因而可以用它来判定鱼类年龄(或日龄).同时,耳石会确切地纪录外界环境的变化^[5],不会像其他年龄形质(鳞片、脊椎骨等)有再吸收及重组的现象产生,因此通过耳石上微量元素浓度随年龄的变化可回推鱼类所经历的洄游环境史.目前,耳石微量元素分析已广泛用在鱼类洄游环境史^[7]、洄游路径^[8]、回推陆地上古气候的变化^[9]、长寿命鱼类的年龄验证^[10]、种群划分^[11]等研究.耳石微量元素组成是研究鱼类洄游环境与生活史的一项可靠的生物地化指标^[12-13].

2.1 研究原理

硬骨鱼类的耳石,位于耳石囊内淋巴液中,不像其他软体动物或珊瑚的外骨骼直接暴露在外界环境中,但是鱼类的内淋巴液与体液相通,鱼类从水中摄取的元素会经由体液沉积在耳石中^[14-15],但其过程较为复杂.元素从外在水体环境进入耳石沉积时,是

经由鳃的吸收过滤、血液与内淋巴液的运输,以及细胞膜上的离子通道所控制,因此水中微量元素到达耳石时,比例会发生变化,甚至不同元素在通过耳石囊时所利用的通道(主动运输的离子通道或是被动运输的扩散)均会造成水体及耳石中微量元素吸收或沉积的比例有所差异,其变化程度可用分布系数(coefficient of distribution, D)表示^[16].虽然各个元素在环境水体及耳石中的分布系数不尽相同,但耳石中大多数微量元素均能忠实还原其生活的环境水体微化学组成差异(如Sr、Ba和Mg等),耳石微量元素含量与鱼类生活环境中的微量元素含量有一定的相关关系^[5,17].该关系除了受环境因子的影响(如水温、盐度等)之外^[18],也受鱼类生理的调控(如发育阶段的变化、生长和变态等).因此,耳石微量元素分析,除了可回推鱼类洄游环境史,还可回推个体发生学的变化^[5,19].

血浆和淋巴液中的Sr、Ca含量变化与季节及生理的改变有关,各种生物因子(如个体发生学、生理学、种群、压力、生长、大小、摄食、群系发生、生殖和迁移等)以及非生物因子(如水温、pH值、盐度、水化学、水中含氧量和污染等)^[19]均可能影响耳石中微量元素的变化^[20-21].因此,为了避免基于微量元素绝对量估计可能产生的误差,在试验数据分析方面,均采用元素与耳石中最稳定的钙的比值予以探讨,从而符合组分恒定定律^[22].

2.2 主要仪器及操作过程

分析仪器在耳石微量元素的研究中发挥着重要作用,元素指纹研究(trace element fingerprint)在很大程度上受到分析仪器分析能力的制约,研究中的每项重大进展均与新型仪器的发明有关.20世纪90年代,高性能激光剥蚀-电感耦合等离子质谱仪的使用,使得分析灵敏度比80年代提高了几个数量级^[23].随着灵敏度更高、精密度更佳的测试仪器的出现,对鱼类耳石元素指纹的认识也更深入、全面.

金枪鱼耳石微量元素研究通常使用两种测试仪器,分别为电感耦合等离子质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)和电子探针微量法(electron probe microanalysis/electron microprobe analysis, EPMA),其中ICP-MS又分为激光剥蚀(laser-ablation ICP-MS, LA-ICPMS)以及溶液态进样(solution-based ICP-MS, SB-ICPMS)两种系统,针对不同样品的特性与研究目的,选择适合的进样系统来分析耳石的微量元素.具体操作过程可参见窦硕增^[3]和高永华等^[24]的研究.

2.3 应用现状

2.3.1 洄游环境史研究 耳石微化学信息可作为研究鱼类栖息地标志的基础,并以此重建其洄游环境史。究其原因主要有3个:首先是耳石微量元素的沉积速率会受到环境因子的影响(如水温、盐度及水中微量元素的浓度等),而生理因子也对元素在耳石中沉积产生不同的调控机制;其次,耳石会永久保留沉积的微量元素,这些微量元素可能代表不同的栖息地标志;第三,因为耳石以生长带或成长轮纹形式沉积,使得微量元素的解读具有时间意义^[25]。

有关生物学、个体发生学以及气候变异对于金枪鱼类洄游路径影响方面的认识可作为种群评估的依据并应用于未来的渔业管理^[26-27]。目前,有学者根据渔业数据分析鱼类的洄游模式^[28],但更多的则是利用先进的标识技术追踪鱼类洄游路径与行为模式^[29-31]。但对于金枪鱼类复杂的洄游路径的了解至今仍不完整^[32],这是由于金枪鱼类的生活史及洄游路径广阔,从而造成利用传统标识技术会有许多限制因子,且不能针对发育阶段加以探讨。而利用耳石微量元素的差异性可以区分来自不同空间内的鱼群^[6,33-34]。Arai等^[35]利用EMPA技术对西太平洋鲣鱼(*Katsuwonus pelamis*)耳石中的Sr和Ca浓度进行了测量,得出西太平洋鲣鱼耳石Sr/Ca存在的差异主要是由于孵化场海洋环境中化学元素不同所造成,但其认为这仍需要得到进一步的证实。林育廷^[36]利用SB-ICPMS和LA-ICPMS测量了南方蓝鳍金枪鱼(*Thunnus maccoyii*)耳石微量元素的组成,SB-ICPMS的分析结果显示耳石微量元素组成在不同年龄群之间存在显著性差异,表明南方蓝鳍金枪鱼随着生长而改变栖息环境,而LA-ICPMS所测到的耳石核心至边缘的微量元素时间序列变化显示中印度洋及印度尼西亚海域的南方蓝鳍金枪鱼耳石边缘的元素组成有显著性差异,但两者核心部位的元素组成有较高的相似性。这些证据证明两个不同海域的南方蓝鳍金枪鱼源自相同产卵场。由此可见,耳石微量元素指纹图是研究金枪鱼类洄游环境史的一项有利工具。

2.3.2 种群划分 目前有几种方法用于量化金枪鱼类种群的混合程度,包括电子标记、基因和耳石微化学等。尽管这些方法所提供的数据对于正确校准种群模型和确定混合水平均有必要,但在确定补充群体对孵化场的贡献率方面,耳石微化学则是最有用的手段^[37]。耳石化学元素指示与环境条件存在一定的联系,鱼类出生首年在耳石中沉积的物质可作为

“出生证明”或孵化场栖息地的自然标记。之前的研究显示,耳石中微量元素可用于确定高度洄游鱼种的出生源,但区分能力有待进一步提高,且分类函数所存在的年际变化仍要求采用具体年级个体的元素指示^[6]。作为应对,利用耳石中的备选化学元素指标,如稳定同位素指示将有效区分不同孵化场来源的金枪鱼种群^[38]。

耳石微化学技术在蓝鳍金枪鱼种群划分上得到了较为广泛的应用。Proctor等^[32]利用两种探针微区分析设备(波长色散电子探针微区分析和电子探针X射线微区分析——PIXE)分析了南方蓝鳍金枪鱼洄游路线不同地点幼鱼的耳石化学元素组成情况,认为鱼类钙化组织的化学成分分析可为研究鱼类种群结构和环境史提供有用的信息。Secor等^[39]利用ICPMS分析了地中海北方蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)幼鱼全耳石的微结构及微化学,表明耳石中的微量元素Na、Mg、Mn和Zn可明显区分地中海和太平洋两个海域收集的样本。Secor等^[40]利用ID ICP-MS和ICP-MS分析大西洋蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)幼体(0龄和1龄)耳石元素组成,结果显示各孵化场样本耳石中的某些元素浓度存在差异。同时他们还评估了两个实验室(一个是利用更为准确的方法——ID ICP-MS,另一个是利用更为方便的方法——ICP-MS)测量耳石元素组成的精确性,同时采用可重复的耳石材料(左或右矢耳石)确定两个独立的实验室分析结果是否可以决定两个样本区分水平的相似程度。Rooker等^[41]利用ICP-MS测量了来自大西洋东部和西部孵化场的蓝鳍金枪鱼幼鱼(0龄和1龄)全耳石中的6种元素(Li、Mg、Ca、Mn、Sr和Ba)浓度,分析了地中海水域3个孵化场0龄鱼的耳石微化学时空变化。结果显示,不同孵化场及同一孵化场内的不同海域收集的蓝鳍金枪鱼幼鱼耳石微化学存在差异,元素指纹分析显示了一定程度上的时间持续性,表明该技术在将来的种群连通性评估及资源结构分析中具有较大的应用潜力。Rooker等^[6]利用SB-ICPMS技术测量了整个耳石中的6种微量元素(Li、Mg、Ca、Mn、Sr和Ba),从地中海和西大西洋获取的1龄样本耳石微化学出现明显的不同,地中海水域3个孵化场获取的0龄样本耳石微化学时空变化也存在显著的差异。与此同时,不同孵化场获取的大西洋蓝鳍金枪鱼幼体样本耳石微化学存在较为明显的差异,而化学指示也显示了时间尺度上的持续性。

Rooker等^[34]利用耳石内的Li、Mg、Ca、Mn、Sr

及 Ba 等微量元素组成的差异性判定太平洋蓝鳍金枪鱼 (*Thunnus thynnus orientalis*) 来自于太平洋 (日本四国岛东侧) 或是边缘海 (日本海与东中国海) 等不同孵化场, 该研究可以清楚地反映出捕获自边缘海 (日本海与东中国海) 与太平洋水域的个体, 其耳石元素组成存在明显差异, 而这可能是由水文条件的差异性, 也就是水团微量元素组成差异所造成。然而, Rooker 等^[34] 的研究结果仅能够明确区分来自太平洋区域孵化场的蓝鳍金枪鱼与其他两个孵化场间的差别, 日本海与东中国海两处孵化场的蓝鳍金枪鱼的耳石元素组成则因相似性较高而无法清楚区分, 且来自东中国海孵化场的蓝鳍金枪鱼也是孵化于黑潮区, 因此, 耳石微量元素组成分析法尚无法完全正确地判别蓝鳍金枪鱼的产卵场。Rooker 等^[34] 发现, 盐度是造成不同水域太平洋蓝鳍金枪鱼耳石元素组成差异的主要因素。耳石作为环境史示踪物在某种程度上由化学指示在时间尺度上的稳定性决定。一些研究分析了其时间稳定性问题, 结果显示具体种群元素指标均有年际变化。Rooker 等^[34] 发现, 东中国海水域收集的 3 个年龄级太平洋蓝鳍金枪鱼幼体样本耳石中的 3 种微量元素 (Mn、Mg 和 Ba) 存在差异。太平洋蓝鳍金枪鱼耳石微量元素指示显示出重要的应用前景, 其可用于准确描述个体的孵化场来源。孵化场来源或种群结构的确定将依赖于隔离和量化耳石中幼体阶段的化学组成程序 (利用 LA-ICPMS 和 SB-ICPMS)。这类信息将提供辨别次成体和成体来源, 并用于评估不同孵化场的相对贡献。相应地, 关于种群联系及混合等基本问题应在将来的调查中得到解决。

除了在蓝鳍金枪鱼上的应用外, 耳石微化学划分种群在其他金枪鱼类上也有应用。Humphreys 等^[42] 分析了剑鱼 (*Xiphias gladius*) 当年幼鱼耳石中的微量元素组成, 检查耳石元素指纹值, 从而确定中太平洋剑鱼孵化场来源。Shuford 等^[43] 针对几内亚湾、加勒比海东南部及太平洋水域产卵场/孵化场捕获的黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 幼鱼, 在 3 个尺度上 (时间上、空间上和区域上) 利用 SB-ICPMS 和 ICP-AES 技术分析了其整个耳石, 确定了该方法可用于描述出生源, 并认为耳石微化学方法具有种群结构和种群动态鉴定方面的潜力。量化成鱼耳石中幼体阶段的元素组成并将其与已知来源的幼鱼耳石元素指纹进行比较, 可提供一套经验方法用于确定成鱼个体的出生源。该分析将有助于解决尚不明确的鱼类洄游行为, 并可用于评估不同产卵场对整个

种群的贡献。反过来, 其可确定各产卵场对不同渔业的相对重要性及估计不同种群的混合率情况。

2.3.3 生活史分析 Arai 等^[44] 利用 PIXE 技术分析了西太平洋鲑鱼耳石的 Sr 与 Ca 含量。热带水域 (马绍尔群岛) 的鲑鱼耳石 Sr/Ca 在其生命史的各个阶段保持恒定。相反, 温带水域 (日本三陆外海) 大多数鲑鱼的耳石 Sr/Ca 由核心区向外从低到高在 1100 ~ 1800 μm 间波动。类似的情况也存在于三陆外海释放并在帕劳群岛水域重捕的鲑鱼个体中。由此可知, 鲑鱼至少有两种生命史模式, 一种是向北部温带水域开展大范围洄游的鲑鱼种群, 一种是热带产卵场的本地定居种。大量鲑鱼并非向南或向北温带水域开展长距离洄游, 而是定居在热带产卵场附近^[45]。这也表明鲑鱼在其整个生命史过程中的洄游模式存在变化, 且非常复杂。

3 碳氧同位素研究

稳定同位素在海洋生态系统研究中得到了广泛应用^[46], 同时也是研究食物网传统手段的一个有利补充^[47]。特定化合物同位素分析 (compound-specific isotopic analysis, CSIA) 可反映整个组织或整个动物个体的同位素结果, 也能将新陈代谢和食物网营养级关系从食物网底层同位素组成变化中区分开来^[48-50]。鱼类耳石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素成分研究在渔业和海洋环境科学方面有着广泛的应用前景^[51-52]。从目前发表的文献资料来看, 近年来有关鱼类耳石同位素方面的研究日益增多, 目前已发表相关论文 118 篇, 2000 年以前有 16 篇, 而仅 2010 年就有 18 篇 (www.isiknowledge.com, 关键词为 otolith 和 stable isotope)。

3.1 研究依据

鱼类耳石由 CaCO_3 组成, 故其中 C 和 O 元素的稳定同位素组成被广泛利用为研究工具。同位素为同一个化学元素的不同核种, 具有相同的质子数及不同的中子数, 因此使得同位素分子间的质量有微小差异, 造成同位素表现出不同的物理性质。同位素依其稳定状况分成稳定性同位素及放射性同位素, 其主要差异在半衰期的长短, 稳定性同位素含量随着时间的增加改变程度很小, 可作为良好的示踪剂^[53]。

对鱼类耳石同位素的研究工作始于 1967 年 Devereux^[54] 对化石鱼类耳石和现生鱼类耳石氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 的研究, 其研究依据是 Urey^[55] 对生物组织中碳酸钙中氧同位素比值的测定。Urey^[55] 在测定了

包括软体动物壳、有孔虫等的碳酸钙中的氧同位素比值后,认为沉积在某种海生动物壳或者骨骼的碳酸钙中的氧同位素比值可以反映其栖息地环境温度。Devereux^[54]指出氧同位素在耳石与周围海水间保持分馏平衡,即耳石中的氧同位素比值与水环境中的氧同位素比值之比为一定值,而这种平衡受温度制约,因此可以用耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 含量推断鱼类的栖息地环境温度。

3.2 应用现状

鱼类耳石中的碳稳定同位素可影响鱼类的新陈代谢、摄食和营养级^[20,56-57]。耳石稳定碳和氧同位素分析提供金枪鱼类洄游生活史的连续性信息,并可为研究金枪鱼类的洄游周期性提供帮助。研究显示,耳石稳定同位素分析在研究南方蓝鳍金枪鱼洄游生活史上具有一定的价值,尤其是在该鱼种热存储能力完全形成之前的幼鱼阶段。进一步研究显示,了解金枪鱼进行体温的生理调节所需要的时间及收集海水中 $\delta^{18}\text{O}$ 浓度等相关信息,将有助于改善利用耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 解释金枪鱼生活史问题。Rooker 和 Secor^[38]利用耳石中稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)区分地中海和西大西洋孵化场捕获的 1 龄蓝鳍金枪鱼,并指出耳石稳定同位素分析将成为鉴定鱼类种群的一个有效工具,在区分蓝鳍金枪鱼种群方面具有较大的发展前景,并在预测孵化来源方面比耳石微量元素^[6,40]具有更为可靠的预测效果。而且,稳定同位素几乎不会在钻孔过程中被污染,因此在解释过程中不存在微量元素被污染而带来的复杂性。但解释稳定同位素数据时仍需持谨慎态度。这是因为,在描述不同孵化场来源对渔业的种群混合及相对贡献率时应具备足够的样本量,同时要保证样本来自于主要渔业。最为关键的是,从短期上看,需要对核心隔离程序的潜在误差进行评估。如果核心不足以代表 1 龄鱼(出生后 12~18 个月)的整个耳石,则切割和研磨将会引入误差。作为应对措施,应对研磨效应进行评估(即比较同一个体的切割或研磨耳石与整个耳石),并将其拓展至稳定同位素浓度的年际记录图书馆中,而该记录与金枪鱼的孵化场存在着联系。但后者需要不同地区 1 龄鱼的稳定同位素指标的时空变动数据。一旦上述问题得到解决,相信该稳定同位素方法将有效地区分不同地区鱼类的种群来源,并可全面调查种群结构和混合情况。

Rooker 和 Secor^[38]与 Rooker 等^[37]分析大西洋蓝鳍金枪鱼耳石的稳定性碳氧同位素组成,发现孵化于地中海与大西洋西侧海域(加勒比海)的 1 龄

蓝鳍金枪鱼,其整颗耳石的稳定性氧同位素存在明显的差异,孵化于地中海的大西洋蓝鳍金枪鱼个体,其耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 介于 -1.08‰ 与 -1.30‰ (VPDB scale) 之间,而孵化于大西洋西侧海域的大西洋蓝鳍金枪鱼个体,其耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 则介于 -2.09‰ 与 -2.39‰ (VPDB scale) 之间,其判别率可以高达 98%。王士玮^[58]及 Wang 等^[59]利用耳石稳定性碳氧同位素组成探讨了印度洋南方蓝鳍金枪鱼的生活史。Shia 等^[60]利用耳石中储存的碳氮同位素指示物研究了南方蓝鳍金枪鱼的洄游生活史,认为对耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的解释非常复杂,但结果可用于蓝鳍金枪鱼个体发生学、新陈代谢和营养水平分析。Schloesser 等^[61]利用耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素对加拿大水域捕捞的蓝鳍金枪鱼样本的孵化源进行了预测,其结果可用于判别以渔获率作为丰度指标的可行性。

除了蓝鳍金枪鱼以外,Wells^[62]等利用 0 龄黄鳍金枪鱼和大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)耳石中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素对太平洋水域(夏威夷群岛)两个鱼种的孵化源进行了研究,结果发现不同水域收集的两个鱼种的耳石微量元素组成存在明显差异,并认为耳石稳定同位素技术在鉴别中西太平洋两个鱼种不同孵化场来源方面较大的应用前景。Wells 等^[63]对太平洋水域(夏威夷群岛)黄鳍金枪鱼的孵化源进行进一步研究,预测了夏威夷群岛水域 1 龄黄鳍金枪鱼的出生源。

目前尚无专门为金枪鱼所推导的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度关系的公式,Radtke 等^[64]早在 1987 年提出大西洋蓝鳍金枪鱼耳石内的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受到生理作用影响,并没有与环境水文达到均衡。Radtke 等^[64]利用约 20 龄的成鱼,饲养约 4 个月,期间持续记录盐度、海水与鱼体温度,结果显示成鱼 4 个月内增加的耳石 $\delta^{18}\text{O}$ 所反映的温度($19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $21\text{ }^{\circ}\text{C}$)明显高于实际测量的水温($12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $15\text{ }^{\circ}\text{C}$),其可能原因为:不同于其他鱼种,金枪鱼为了维持高强度的游泳能力,演化出一种保温系统——逆流热量交换系统,在大洋低温环境下,体内依旧能够保持较高体温^[65]。因此 Radtke 等^[64]认为由 $\delta^{18}\text{O}$ 回推的温度不能代表水温而可能是调节后的体温,这也说明了利用氧同位素研究金枪鱼经历的水温环境会产生高估的现象。然而,Shiao 等^[60]认为 Radtke 等^[64]的结论只适用于成鱼阶段,并不能完全代表全生活史。

4 结 语

利用耳石测定年龄,在鱼类的生活史、生物学及

种群动态的研究中极为重要,配合微化学分析,可对鱼类的生态及栖息环境有进一步的认识.今后耳石微化学分析在鱼类生活史的研究中还会有更多的发现.但耳石微化学在研究金枪鱼类上仍存在以下问题:首先,目前的研究集中在 Sr、Ca、Na、Ba、C 和 O 等少数几种元素上,其他痕量元素则较少涉及;其次,耳石上 Sr/Ca 比率的变化常被用作研究环境条件的指标,但现有研究显示,Sr/Ca 比率与环境温度的关系不能简单套用,两者的关系还有待进一步深入研究^[66];第三,耳石稳定氧同位素分析对于估计鱼类生活史经历的环境水温是一项很有前途的技术,但目前仍缺乏关于不同鱼类耳石氧同位素分馏与温度关系比较一致的方程;第四,在实验室分析过程中,往往因试验不当或其他不可预计的原因致使耳石被污染,从而造成耳石微化学分析结果存在不确定性,这也影响了该手段的有效性,为此需开展耳石清洗程序及污染程度方面的评估^[34, 67].此外,耳石中化学元素沉积的机制还不完全清楚,对于耳石中化学元素的变动规律了解得也很少.因此,为了开发耳石微化学的巨大价值,有必要加强其沉积机理方面的研究.

参考文献

- [1] Lowenstein O. The labyrinth// Hoar WS, Randall DJ, eds. Fish Physiology. New York: Academic Press, 1971: 207-240
- [2] Song Z-B (宋昭彬), Cao W-X (曹文宣). The studies and application of fish otolith microstructure. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), 2001, **25** (6): 613-619 (in Chinese)
- [3] Dou S-Z (窦硕增). An introduction to fish otolith research: Techniques and applications. *Studia Marina Sinica* (海洋科学集刊), 2007, **48**: 93-113 (in Chinese)
- [4] Degens ET, Deuser WG, Haedrich RL. Molecular structure and composition of fish otoliths. *Marine Biology*, 1969, **2**: 105-113
- [5] Campana SE. Chemistry and composition of fish otoliths: Pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, **188**: 263-297
- [6] Rooker JR, Secor DH, Zdanowicz VS, et al. Identification of Atlantic bluefin tuna stocks from putative nurseries using otolith chemistry. *Fisheries Oceanography*, 2003, **12**: 75-84
- [7] Secor DH. Application of otolith microchemistry analysis to investigate anadromy in Chesapeake Bay striped bass *Morone saxatilis*. *Fishery Bulletin*, 1992, **90**: 798-806
- [8] Thresher RE, Proctor CH, Gunn JS, et al. An evaluation of electron probe microanalysis of otoliths for stock delineation and identification of nursery areas in a southern temperate groundfish, *Nemadactylus macropterus* (Cheilodactylidae). *Fishery Bulletin*, 1994, **92**: 817-840
- [9] Patterson WP, Smith GR, Lohmann KC. Continental paleothermometry and seasonality using the isotopic composition of aragonitic otoliths of freshwater fishes// Swart PK, Lohmann KC, McKenzie J, eds. Climate Change in Continental Isotopic Records. *American Geophysical Union Monograph*, 1993, **78**: 191-202
- [10] Kalish JM. Pre- and post-bomb radiocarbon in fish otoliths. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, **114**: 549-554.
- [11] Edmonds JS, Moran MJ, Caputi N, et al. Trace element analysis of fish sagittae as an aid to stock identification: Pink snapper (*Chrysophrys auratus*) in Western Australia waters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, **46**: 50-54
- [12] Thorrold SR, Jones CM, Campana SE. Response of otolith microchemistry to environmental variations experience by larval and juvenile Atlantic croaker (*Micropogonias undulatus*). *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**: 102-111
- [13] Thorrold SR, Jones CM, Swart PK, et al. Accurate classification of juvenile weakfish *Cynoscion regali* estuarine nursery areas based on chemical signatures in otoliths. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, **173**: 253-265
- [14] Johnson MG. Metals in fish scales collected in Lake Openogo, Canada from 1939 to 1979. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1989, **118**: 331-335
- [15] Pender PJ, Griffin RK. Habitat history of barramundi *Lates calcarifer* in a North Australian river system based on barium and strontium levels in scales. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1996, **125**: 679-689
- [16] Morse JW, Bender ML. Partition coefficients in calcite-examination of factors influencing the validity of experimental results and their application to natural systems. *Chemical Geology*, 1990, **82**: 265-277
- [17] Wells BK. Relationships between water, otolith, and scale chemistries of westslope cutthroat trout from the Coeur d'Alene River, Idaho: The potential application of hard-part chemistry to describe movements in freshwater. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2003, **132**: 409-424.
- [18] Luo J-Y (罗军燕), Li S-R (李胜荣), Shen J-F (申俊峰). The influential factors of strontium and barium enrichment in otolith and their response to the environment. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 2008, **15** (6): 18-24 (in Chinese)
- [19] Mayer Jr FL, Marking LL, Bills TD, et al. Physico-chemical factors affecting toxicity in freshwater: Hardness, pH, and temperature// Hamelink JL, Landrum PF, Bergman HL, eds. Bioavailability: Physical, Chemical and Biological Interactions. London: Lewis Publishers, 1994: 5-21
- [20] Kalish JM. ¹³C and ¹⁸O isotopic disequilibria in fish otoliths: Metabolic and kinetic effects. *Marine Ecology*

- Progress Series*, 1991, **75**: 191–203
- [21] Radtke RL, Shafer DJ. Environmental sensitivity of fish otolith microchemistry. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 1992, **43**: 935–951
- [22] Riley JP, Chester R. Introduction to Marine Chemistry. New York: Academic Press, 1971
- [23] Campana SE, Fowler AJ, Jones CM. Otolith elemental fingerprint for stock identification of Atlantic cod (*Gadus morhua*) using laser ablation ICPMS. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, **51**: 1942–1950
- [24] Gao Y-H (高永华), Li S-R (李胜荣), Ren D-N (任冬妮), *et al.* An overview of focuses of research on otolith element characteristics and general testing methods. *Earth Science Frontiers (地学前缘)*, 2008, **15**(6): 11–17 (in Chinese)
- [25] Brown JA. Using the chemical composition of otoliths to evaluate the nursery role of estuaries for English sole *Pleuronectes vetulus* populations. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, **306**: 269–281
- [26] Hunter JR, Argue AW, Bayliff WH, *et al.* The dynamics of tuna movements: An evaluation of past and future research. *FAO Fisheries Technical Paper*, 1986, **277**: 1–78
- [27] Gunn J, Block BA. Advances in acoustic, archival & satellite tagging of tunas// Block BA, Stevens ED, eds. Tuna Physiology, Ecology and Evolution. New York: Academic Press, 2001: 121–160
- [28] Xu Z-L (徐兆礼), Chen J-J (陈佳杰). Population division of *Larimichthys polyactis* in China Sea. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(11): 2856–2864 (in Chinese)
- [29] Block BA, Teo SLH, Walli A, *et al.* Electronic tagging and population structure of Atlantic bluefin tuna. *Nature*, 2005, **434**: 1121–1127
- [30] Itoh T, Tsuji S, Nitta A. Migration patterns of young Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) determined with archival tags. *Fishery Bulletin*, 2003, **101**: 514–534.
- [31] Stokesbury M, Teo S, Seitz A, *et al.* Movement of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) as determined by satellite tagging experiments initiated off New England. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, **61**: 1976–1987
- [32] Proctor CH, Thresher RE, Gunn JS, *et al.* Stock structure of the southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii*: An investigation based on probe microanalysis of otolith composition. *Marine Biology*, 1995, **122**: 511–526
- [33] Gillanders BM, Kingsford MJ. Elemental fingerprints of otoliths of fish may distinguish estuarine ‘nursery’ habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, **201**: 273–286
- [34] Rooker JR, Secor DH, Zdanowicz VS, *et al.* Discrimination of northern bluefin tuna from nursery areas in the Pacific ocean using otolith chemistry. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, **218**: 275–282
- [35] Arai T, Kotake A, Kayama S, *et al.* Movements and stock discrimination of skipjack tuna, *Katuwonus pelamis*, in the Western Pacific by otolith Sr:Ca ratios. 17th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, Majuro, Marshall Islands, 2004: Bio-7
- [36] Lin Y-T (林育廷). Age, Growth and Migratory Environmental History of Southern Bluefin Tuna (*Thunnus maccoyii*) in the Indian Ocean. Master Thesis. Taipei: National Taiwan University, 2006 (in Chinese)
- [37] Rooker JR, Secor DH, Metrio GD, *et al.* Evaluation of population structure and mixing rates of Atlantic bluefin tuna from chemical signatures in otoliths. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 2006, **59**: 813–818
- [38] Rooker JR, Secor DH. Stock structure and mixing of Atlantic Bluefin tuna: Evidence from stable $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in otoliths. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 2004, **56**: 1115–1120
- [39] Secor DH, Ota T, Tanaka M. Use of otolith microanalysis to determine estuarine migrations of Ariake Sea Japanese sea bass *Lateolabrax japonicus*. *Fisheries Science*, 1998, **64**: 740–743
- [40] Secor DH, Campana SE, Zdanowicz VS, *et al.* Interlaboratory comparison of Atlantic and Mediterranean bluefin tuna otolith microconstituents. *Journal of Marine Science*, 2002, **59**: 1294–1304
- [41] Rooker JR, Secor DH, Zdanowicz VS, *et al.* Otolith elemental fingerprints of Atlantic bluefin tuna from eastern and western nurseries. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 2002, **54**: 498–506
- [42] Humphreys Jr RL, Campana SE, DeMartini EE. Otolith elemental fingerprints of juvenile Pacific swordfish *Xiphias gladius*. *Journal of Fish Biology*, 2005, **66**: 1660–1670
- [43] Shuford RL, Dean JM, Stéquent B, *et al.* Age and growth of yellowfin tuna in the Atlantic Ocean. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 2007, **60**: 330–341
- [44] Arai T, Kotake A, Kayama S, *et al.* Movements and life history patterns of the skipjack tuna *Katuwonus pelamis* in the western Pacific, as revealed by otolith Sr:Ca ratios. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2005, **85**: 1211–1216
- [45] Hilborn R, Sibert J. Is international management of tuna necessary? *Marine Policy*, 1998, **12**: 31–39
- [46] Popp BN, Graham BS, Olson RJ, *et al.* Insight into the trophic ecology of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from compound-specific nitrogen isotope analysis of proteinaceous amino acids. *Terrestrial Ecology*, 2007, **1**: 173–190
- [47] Peterson BJ, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, **18**: 293–320
- [48] Fantle MS, Dittel AI, Schwalm SM, *et al.* A food web analysis of the juvenile blue crab *Callinectes sapidus*, using stable isotopes in whole animals and individual amino acids. *Oecologia*, 1999, **120**: 416–426
- [49] McClelland JW, Montoya JP. Trophic relationships and the nitrogen isotope composition of amino acids in plankton. *Ecology*, 2002, **83**: 2173–2180

- [50] Uhle ME, Macko SA, Spero HJ, *et al.* Sources of carbon and nitrogen in modern planktonic foraminifera: The role of algal symbionts as determined by bulk and compound specific stable isotopic analyses. *Organic Geochemistry*, 1997, **27**: 103–113
- [51] Li S-R (李胜荣), Shen J-F (申俊峰), Luo J-Y (罗军燕), *et al.* The genetic mineralogical attribute of fish otoliths: Environmental typomorphism and some new investigation methods. *Acta Mineralogica Sinica* (矿物学报), 2007, **27**(3/4): 241–248 (in Chinese)
- [52] Gao Y-W (高永文), Lu A-H (鲁安怀), Song Y-G (宋玉国). The studies of C and O stable isotope composition in otolith. *Nature Science Progress* (自然科学进展), 2004, **14**(3): 269–272 (in Chinese)
- [53] Hoef J. Stable Isotope Geochemistry. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 3–11
- [54] Devereux I. Temperature measurements from oxygen isotope ratios of fish otoliths. *Science*, 1967, **155**: 1684–1685
- [55] Urey HC. The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society*, 1947: 562–581
- [56] Schwarcz HP, Gao YW, Campana S, *et al.* Stable carbon isotope variations in otoliths of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998, **55**: 1798–1806
- [57] Sherwood GD, Rose GA. Influence of swimming form on otolith $\delta^{13}\text{C}$ in marine fish. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, **258**: 283–289
- [58] Wang S-W (王士玮). Study of Tuna Life History by Otolith Stable Carbon and Oxygen Isotope Composition. Master Thesis. Taipei: National Taiwan University, 2008 (in Chinese)
- [59] Wang CH, Lin YT, Shiao JC, *et al.* Spatio-temporal variation in the elemental compositions of otoliths of southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii* in the Indian Ocean and its ecological implication. *Journal of Fish Biology*, 2009, **75**: 1173–1193
- [60] Shiao J, Yui TF, Høie H, *et al.* Otolith O and C stable isotope compositions of southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii* (Pisces: Scombridae) as possible environmental and physiological indicators. *Zoological Studies*, 2009, **48**: 71–82
- [61] Schloesser RW, Neilson JD, Secor DH, *et al.* Natal origin of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) from Canadian waters based on otolith $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2010, **67**: 563–569
- [62] Wells RJD, Rooker JR, Itano DG. Nursery origin of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Hawaiian Islands. Proceedings of the 60th International Tuna Conference. Lake Arrowhead, California, 2009
- [63] Wells RJD, Rooker JR, Itano DG. Nursery origin of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Hawaiian Islands: An otolith chemistry approach. Proceedings of the 61st International Tuna Conference. Lake Arrowhead, California, 2010
- [64] Radtke RL, Williams DF, Hurley PCF. The stable isotopic composition of Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) otolith: Evidence for physiological regulation. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 1987, **87**: 791–801
- [65] Dizon AE, Brill RW. Thermoregulation in Tunas. *American Zoologist*, 1979, **19**: 249–265
- [66] Hans H, Otterlei E, Folkvord A. Temperature-dependent fractionation of stable oxygen isotopes in otoliths of juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science*, 2004, **61**: 243–251
- [67] Davies CA, Brophy D, Jeffries T, *et al.* Trace elements in the otoliths and dorsal spines of albacore tuna (*Thunnus alalunga*, Bonnaterre, 1788): An assessment of the effectiveness of cleaning procedures at removing post-mortem contamination. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, **396**: 162–170

作者简介 朱国平,男,1976年生,博士,副教授.主要从事渔业生态学、渔业生物学和渔业海洋学研究,发表论文60余篇. E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

责任编辑 肖红
