

文章编号: 1674-5566(2020)02-0287-08

DOI:10.12024/jsou.20190102522

鱼类眼睛晶体信息分析与应用研究进展

刘必林^{1,2,3,4}, 桓梦瑶¹, 许巍¹, 陈新军^{1,2,3,4}

(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开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306)

摘要: 眼睛晶体作为鱼类的硬组织之一, 具有结构稳定、耐腐蚀、易获取的特性, 其含有大量的蛋白质, 蕴含着丰富的化学信息, 并在鱼类的年龄鉴定中得到了一定程度的应用。近年来, 随着生物地球化学技术的不断创新与进步, 鱼类眼睛晶体的微量元素、稳定同位素信息也越来越受到国内外学者的重视。本文将依据国内外学者的研究成果, 从眼睛晶体的直径与重量、微结构、微量元素和稳定同位素等方面, 对鱼类的年龄鉴定、栖息环境重建、摄食生态的追踪等方面的应用进行综述, 并通过分析鱼类眼睛晶体的组成成分与生长模式, 比较眼睛晶体与其他组织做稳定同位素分析的优势, 着重归纳总结了眼睛晶体碳氮稳定同位素在鱼类生活史信息, 尤其在摄食生态、栖息环境重建等方面的研究方法、应用现状及发展前景, 为以后开展相关的研究提供参考。

关键词: 眼睛晶体; 鱼类; 头足类; 年龄; 微量元素; 稳定同位素

中图分类号: S 931.1 **文献标志码:** A

眼睛晶体是海洋动物的重要视觉器官, 与耳石^[1]、鳞片^[2]、脊椎骨^[3]等其他硬组织一样, 具有稳定的形态特征、良好的信息储存以及耐腐蚀等特点。已有研究总结了眼睛晶体在头足类中的应用^[4-5], 认为眼睛晶体不适合作为年龄鉴定的理想介质, 而在摄食、栖息和洄游等方面有很大的研究优势。同时也有研究分析了眼柄在虾类年龄鉴定中的优势^[6], 认为在硬组织匮乏的物种中, 眼柄是分析物种生长的理想介质。在鱼类中, 眼睛晶体的直径和干重在年龄鉴定中已经得到了一定程度的应用, 但是眼睛晶体生长纹用于年龄鉴定的研究还较少。在微量元素应用上, 眼睛晶体在种群鉴定、栖息地重建中也起着很大的作用; 此外, 眼睛晶体中丰富的蛋白质含量, 使其较其他硬组织更适合碳氮稳定同位素分析。虽然关于鱼类眼睛晶体的相关研究较头足类多, 但目前还没有对其研究与应用进行总结与评述。

为此, 本文将依据国内外学者的研究成果, 在对眼睛晶体的结构组成进行简要概述的基础上, 从眼睛晶体大小、微结构、微量元素和稳定同位素等方面, 对鱼类的年龄、摄食、栖息环境重建等方面进行综述, 为以后开展相关研究提供参考。

1 眼睛晶体结构及其在年龄鉴定中的应用

1.1 晶体的结构与组成

从图 1 眼睛晶体的外形上看, 鱼类眼睛晶体呈球形, 由两个极点、一个赤道和层层叠加的纤维层包裹而形成, 晶体外表面分布有条纹, 中间有核心^[7]。晶体在原肠胚期发育为表面外胚层, 并分化为晶状体上皮细胞和纤维细胞^[8-9]。晶状体上皮细胞在晶状体的前表面形成单层, 并围绕整个晶状体表面分泌一层保护性的透明层。晶状体纤维细胞与上皮细胞相邻, 是合成晶体蛋白的主要场所^[10-11]。随着个体的生长, 在晶状体上

收稿日期: 2019-01-29 修回日期: 2019-07-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41876141, 41306127); 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位计划项目(0810000243); 上海市“浦江人才”计划项目(18PJ1404100); 国家重点研发计划(2019YFD0901404); 上海市科技创新行动计划(19DZ1207502)

作者简介: 刘必林(1980—), 男, 教授, 研究方向为渔业资源生物学、微量元素与稳定同位素生态学、鱼类年龄鉴定与生活史重塑。
E-mail: bl-liu@shou.edu.cn

皮细胞和相邻晶状体皮层之间产生新的晶状体纤维细胞,而这些纤维细胞最初具有完整的 DNA 和细胞器,并维持 DNA 修复和蛋白质合成的能

力^[10]。最终,晶状体纤维细胞聚集在有序的、重叠的几何形状中,形成不同的层,即图 B 中观察到的可见环^[7]。

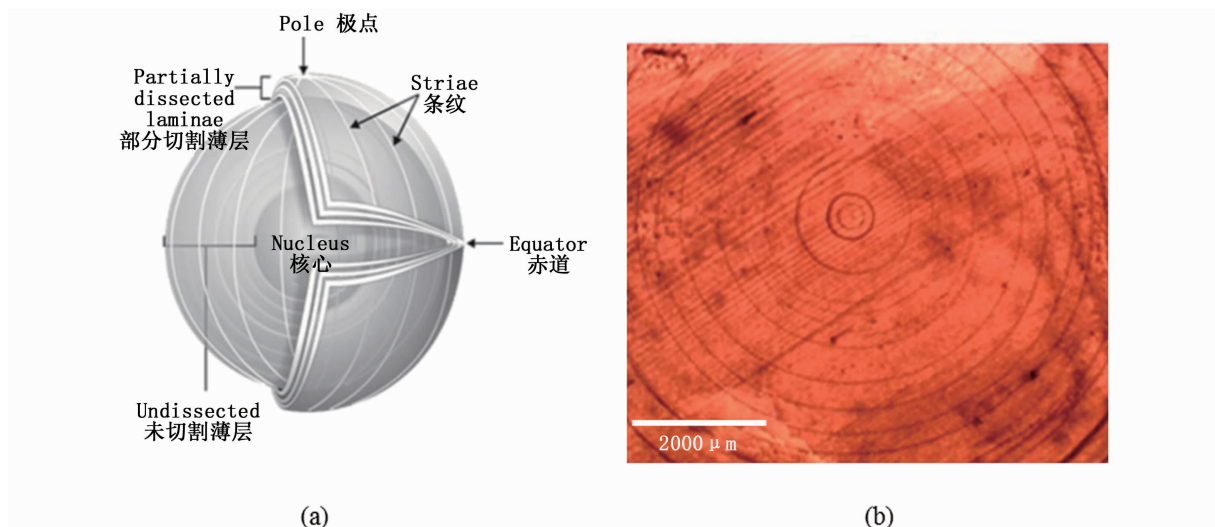


图 1 眼睛晶体的解剖图 (a) 和截面照片 (b)

Fig. 1 Anatomical diagram (panel a) and cross-sectional photograph (panel b) of an eye lens

1.2 眼睛晶体在年龄鉴定中的应用

1.2.1 晶体大小

眼睛晶体作为个体组织的一部分,其直径和干重的变化,除了可以反映晶体的生长之外,也可以反应鱼类个体的生长。鱼类眼睛晶体的直径、干重甚至晶体的折射率也逐渐被应用于年龄鉴定和生长分析。研究显示眼睛晶体在鱼类年龄鉴定中已经得到了广泛的应用,但只是在特定年龄范围内有效(表 1)。

1.2.2 晶体生长纹

尽管关于鱼类眼睛晶体生长纹用于年龄鉴定的报道很少,但还是有学者发现了两者之间潜在的关系。FERENBAUGH^[20]从海狮的胃含物中获取了单鳍多线鱼 (*Pleurogrammus monopterygius*) 和太平洋鲱 (*Clupea pallasii*) 的眼睛晶体,通过在显微镜下观察,发现两者的眼睛晶体由高度纤维质形成了同心圆层,但不像耳石中的环形纹路那样明显,依据这些层的分布,FERENBAUGH^[20]尝试着对眼睛晶体生长纹的计数,发现单鳍多线鱼和太平洋鲱的眼睛晶体生长纹与耳石年龄具有一定的相关关系,但不是对等

的。

2 眼睛晶体的微量元素及其应用

2.1 晶体主要微量元素

微量元素根据其含量可以分为少量元素 (minor element, 浓度 $> 100 \times 10^{-6}$, 如 Na、Sr、K、S、N、Cl、P 等) 和痕量元素 (trace element, 浓度 $< 100 \times 10^{-6}$, 如 Mg、Cu、Pb、Hg、Mn 等)^[21]。截至目前,在鱼类眼睛晶体中已测得的微量元素有 Ba、Co、Cu、Fe、Hg、Mn、Pb、Rb 和 Sr 等^[22]。但是晶体中所含微量元素的种类因物种和环境的不同而有所差异,DOVE 等^[23]通过检测小鳞盾豆娘鱼 *Parma microlepis* 的眼睛晶体,发现晶体微量元素在含量上为 $Hg > Sr \approx Rb > Pb > Ba$, POURANG 等^[24]检测了帕色拟鲤 *Rutilus kutum* 眼睛晶体,发现其晶体微量元素有 $S > Cl > K > Ca、P、Na、Fe$ 。另外,晶体蛋白的合成与降解也会造成晶体核心区与外围层微量元素含量的差异,如 DOVE 等^[23]发现 Cu、Mn 和 Fe 主要分布在晶体外围起辅酶的作用。

表 1 眼睛晶体在鱼类年龄鉴定中的研究
Tab.1 Study on eye lens in fish age determination

物种 Species	生物学参数 Biological parameter			
	晶体直径 Eye lens diameter	年龄鉴定范围 Age determined range	晶体干重 Eye lens dry weight	年龄鉴定范围 Age determined range
鲷科 Leiognathidae				
鲷属 <i>Leiognathus</i>				
短棘鲷 ^[12] <i>Leiognathus equulus</i>	√	1	*	*
篮子鱼科 Siganidae				
篮子鱼属 <i>Genus Siganus</i>				
长鳍篮子鱼 ^[13] <i>Siganus canaliculatus</i>	√	1~2	*	*
鲭科 Scombridae				
羽鳃鲷属 <i>Rastrelliger</i>				
羽鳃鲷 ^[14] <i>Rastrelliger kanagurta</i>	√	2	√	2
鲷科 Sparidae				
棘鲷属 <i>Acanthopagrus</i>				
黄鳍棘鲷 ^[15] <i>Acanthopagrus latus</i>	-	-	√	0~3
石颌鲷属 <i>Lithognathus</i>				
细条石颌鲷 ^[16] <i>Lithognathus mormyrus</i>	√	0~1	-	-
重牙鲷属 <i>Diplodus</i>				
项带重牙鲷 ^[16] <i>Diplodus vulgaris</i>	√	0~2	-	-
尾斑重牙鲷 ^[17] <i>Diplodus annularis</i>	√	1~3	√	*
牛眼鲷属 <i>Boops</i>				
牛眼鲷 ^[17] <i>Boops boops</i>	√	2~3	√	0~1
鲷科 Terapontidae				
鲷属 <i>Theraps</i>				
鲷鱼 ^[15] <i>Theraps therapon</i>	-	-	√	0~3
牙鲷属 <i>Pelates</i>				
四带牙鲷 ^[15] <i>Pelates quadrilineatus</i>	-	-	√	0~3
狗母鱼科 Synodontidae				
蛇鲷属 <i>Saurida</i>				
花斑蛇鲷 ^[18] <i>Saurida undosquamis</i>	√	1	*	*
鳀科 Sillaginidae				
鳀属 <i>Sillago</i>				
多鳞鳀 ^[18] <i>Sillago sihama</i>	√	1	*	*
鲤科 Cyprinidae				
鲤属 <i>Cyprinus</i>				
红白锦鲤 ^[19] <i>Cyprinus carpio</i> L.	-	-	√	0~3

注:“√”表示有相关研究,并能有效判断某范围内的年龄,“*”表示有相关研究,但不能有效判断年龄,“-”表示没有相关研究

Notes:“√”means there is relevant research and can effectively judge the age within a certain range,“*”means there is relevant research but cannot effectively judge the age,and“-”means there is no relevant research

2.2 晶体与其他硬组织微量元素的比较

鱼类各硬组织之间微量元素的浓度有着显著地差异性^[25],耳石、鳞片和脊椎骨的钙化程度较高,通常含有不同程度的 Ca、Sr、Mn、Cu、Ba、Pb 等^[25-26],尤其在耳石中,Ca 含量非常丰富,在鳞片、鳍条等羟基磷灰石含量高的硬组织中,Mn 和 Cu 的含量很高^[25];虽然眼睛晶体的钙化程度为零,不太适合作为微量元素分析,但研究者们还是检测到了一些微量元素,它们与其他硬组织中检测到的微量元素的种类与含量有所差异^[4,23,26-27],尤其是眼睛晶体中含有的 Rb 和 Hg,

是其他硬组织中不容易检测到的^[23]。

2.3 眼睛晶体微量元素的应用

在以往的研究中,耳石中的微量元素广泛应用于鱼类栖息环境重建,近年来,眼睛晶体中的微量元素也逐渐成为研究热点。GILLANDERS^[26]认为眼睛晶体中的微量元素可用于区分鱼类种群。但是 POURANG 等^[24]认为眼睛晶体中微量元素的含量与其他硬组织差别很大,在种群鉴定时可能不能提供准确的信息。KINGSFORD 等^[28]认为晶体中的微量元素与生活环境也有一定的关系。另外,虽然不像稳定同位

素分析那样普遍,但是微量元素和一些有机污染物也被用来追踪大量海洋生物的摄食偏好^[29]。

3 眼睛晶体的稳定同位素及其应用

3.1 晶体碳氮稳定同位素分布

在海洋环境中, $\delta^{15}\text{N}$ 在消费者的组织中反映了蛋白质的代谢,其值通常用于推断食物网交互的信息,并显示该物种在食物链中的位置^[30]。 $\delta^{13}\text{C}$ 存在于三种大分子(即蛋白质、脂肪和碳水化合物)中,反映了消费者组织的各种摄食来源^[31]。一般来说,可以通过追踪 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{15}\text{N}$ 这些元素的起源来组成食物网,也可利用碳、氮稳定同位素比值绘制物种所处的生态位图,更加直观准确地了解物种所处的营养层次^[32]。然而,在对样本进行同位素比较时,必须小心谨慎,因为不同的因素,如组织类型、年龄、体型、消费者的营养状况或食物质量,都有可能影响同位素特征的变异和鉴别的准确性^[30,33-35]。

鱼类硬组织中记录的稳定同位素可以用来重现动物摄食状况、营养级关系^[36]。然而稳定同位素分析需要足够的蛋白质含量。眼睛晶体中有 50% 是由未经更新的蛋白质组成的^[37],这些蛋白质沉积在连续的同心圆(层状结构)中,其方式与耳石中的环形形式非常相似,长期保存着 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的记录。在获取同位素样品时,只需要一对镊子和解剖镜对眼睛晶体进行分层解剖,就可以进行稳定同位素分析^[36]。

3.2 晶体与其他硬组织间碳氮稳定同位素的比较

鱼类耳石蛋白质含量极低(重量为 3% ~ 4%)^[38],因而无法满足碳氮稳定同位素测定需求。鱼类鳞片间断式的生长造成新生的部分与旧的部分之间发生部分重叠^[39-41],因此在鳞片中不能准确检测到不同时间段的碳氮稳定同位素。鱼类的脊椎骨、软骨中的胶原蛋白会随着个体的生长而发生代谢,因此这类硬组织与软体组织一样只适合分析一段时间内的稳定同位素信息^[42-43]。比较分析认为,眼睛晶体较慢的新陈代谢和同心圆式的生长模式,较全地记录了鱼类整个生命周期内不同生长阶段的稳定同位素信息,根据这些信息学者们可以准确的重塑鱼类的生命史过程。

3.3 眼睛晶体碳氮稳定同位素的应用

氮稳定同位素可以反映捕食者的摄食水平和营养层次。WALLACE 等^[36] 分析了黑缘石斑鱼 *Epinephelus morio*、小鳞喙鲈 *Mycteroperca microlepis* 和西大西洋笛鲷 *Lutjanus campechanus* 眼睛晶体中的氮稳定同位素,发现随着眼睛晶体直径的增加, $\delta^{15}\text{N}$ 的值逐渐增大,这说明其摄食水平随着个体的发育而逐渐升高;KATIE^[44] 分析了圆吻突吻鳕(*Coryphaenoides rupestris*)、狼牙等鳍叉尾带鱼(*Aphanopus carbo*)和鼠鲨(*Lamna nasus*)眼睛晶体各断面稳定同位素的值,发现这 3 个物种的 $\delta^{15}\text{N}$ 的值有很大的差别,结果认为 3 者处于不同的生态位中。除了以上应用,眼睛晶体 $\delta^{15}\text{N}$ 值也被用于分析物种各个生活史时期的摄食情况,如 SAMANTHA^[45] 比较了蒙鳕 *Raja montagui*,小眼斑鳕 *Raja microocellata*,短尾鳕 *Raja brachyura*,背棘鳕 *Raja clavata* 晶体核心与肌肉中 $\delta^{15}\text{N}$ 值,发现这 4 个物种晶体核心 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在显著性差异,而肌肉 $\delta^{15}\text{N}$ 值不存在显著性差异,结果认为这 4 个物种的母体在产卵时改变了摄食行为,从而导致个体胚胎期与成鱼期组织间 $\delta^{15}\text{N}$ 值的差异。

碳稳定同位素反映了捕食者的栖息地变化。WALLACE 等^[36] 测定了 3 条小鳞喙鲈眼睛晶体中的碳稳定同位素,发现晶体核心处的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异很大,而晶体最外围的 $\delta^{13}\text{C}$ 基本相等,结果认为这 3 条小鳞喙鲈出生在不同的地理位置,在被捕捞时汇聚在了同一个或相近的地理位置。BENJAMIN^[46-47] 检测了大西洋海鲢(*Atlantic trapon*)眼睛晶体中的 $\delta^{13}\text{C}$ 的值,发现体型较大的个体为了适应自身的生长,会不断地选择空间较大的栖息地,这与 KATIE^[44] 分析狼牙等鳍叉尾带鱼眼睛晶体 $\delta^{13}\text{C}$ 值的结果一致。此外,KATIE^[44] 将狮鬃水母(*Cyanea capillata*)中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值作为背景值,通过同位素图谱的形式分析了白斑角鲨(*Spiny dogfish*)的仔鱼、稚鱼和成鱼的栖息位置,以对其栖息地的动态变化有更精确地掌握。除了栖息地的应用之外,眼睛晶体 $\delta^{13}\text{C}$ 值也被用于判断物种间的亲体关系度,如 CHRISTOPHER^[48] 通过分析比较腔鳞荆鲨(*Centroscyrnus coelolepis*)眼睛晶体断面 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势,认为该物种会洄游到与母体产卵场环境相似的海域进行繁殖。

稳定同位素的测定也可被用于判断大型鱼类的年龄。如在 1960s, 由于核武器的使用导致了放射性碳在海水中被同化, 即增加了海洋中的碳元素值, 导致在此之后出生的鱼类个体中将携带的更多的碳含量, 眼睛晶体中也会如此。依据此现象, NIELSEN 等^[49]检测了大西洋格林兰鲨 (Greenland shark) 眼睛晶体不同层面中稳定同位素的值, 认为如果从晶体核心到外围, 即个体从出生到死亡, 鲨鱼生活史中出现 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的值急剧升高的现象, 说明该个体鲨鱼出生在 1960s 以前, 否则该个体出生在 1960s 之后。

4 展望

鱼类在海洋生态系统中扮演着重要的角色, 年龄鉴定是研究其生长的重要环节, 且年龄鉴定对捕捞政策的制定、种群生长特性分析、栖息地保护等有很大的帮助。目前为止, 鱼类的年龄鉴定和生长特性已经得到了广泛的研究, 技术已经非常成熟。但在有些耳石较难取的鱼种或者没有耳石的软骨鱼类, 越来越多的学者开始采用其他硬组织, 例如鳞片、脊椎骨等来代替^[2-3]。但对于眼睛晶体而言, 在年龄鉴定这方面还不是很有效。

随着微量元素探测技术的逐渐成熟, 对于长寿命或者近海鱼类的人为污染也可以快速地识别, 从而制定相应的保护政策, 拯救渔业资源; 通过个体耳石或其他硬组织中检测到的 Sr/Ca 值的变化, 可以分析其适宜生存的水温环境, 为栖息地重建提供有利的帮助。未来可以结合眼睛晶体等硬组织中的微量元素, 以便更全面、更精确的分析个体的生活环境。

近几年, 稳定同位素技术的快速发展, 使得不同物种的摄食水平和营养级水平的研究更加有利, 丰富了全球海洋生物食物网的研究方法。稳定同位素分析正在成为生态学研究中的一个强有力的工具。但研究材料的选取对稳定同位素测定有很大的影响, 既要有丰富的蛋白质含量, 又要能与年龄相对应, 像耳石因为个体小, 蛋白质含量极少, 不能满足稳定同位素分析的需求^[38]。鳞片间断式的生长造成新生的部分与旧的部分之间发生部分重叠, 因此在鳞片中不能准确检测到不同时间段的碳氮稳定同位素^[39-41]。脊椎骨、软骨中的胶原蛋白会随着个体的生长而

发生代谢^[42-43], 也不适宜作为稳定同位素分析的材料。通过鱼类各硬组织之间的比较, 认为眼睛晶体是测定稳定同位素的最佳材料, 它个体大, 蛋白质含量丰富且没有经过翻转或加工; 其次, 它的生长模式类似于“洋葱”, 是随着年龄的增加一层一层的包裹式生长的, 在与年龄拟合时也是比较有利的。目前为止, 对于鱼类眼睛晶体稳定同位素的研究也逐步成为热点, 除了用于物种的栖息地变化与摄食生态的研究之外, 物种的亲体关系度也成为鱼类生活史研究的新方向。因此, 在开展今后的研究过程中, 应将研究重点放在眼睛晶体稳定同位素上, 通过测定眼睛晶体不同层面中所含有的稳定同位素值, 可解读鱼类不同生活史阶段的栖息环境以及摄食生态的变化等, 它在研究鱼类基础生物学与生态学方面具有良好的前景。

参考文献:

- [1] RAYA C P, FERNÁNDEZ-N ÚÑEZ M M, BALGUERÍAS-GUERRA E, et al. Progress towards ageing cuttlefish *Sepia hiirredda* from the northwestern African coast using statoliths [J]. Marine Ecology Progress Series, 1994, 114 (1/2): 139-147.
- [2] RIFFLART R, MARCHAND F, RIVOT E, et al. Scale reading validation for estimating age from tagged fish recapture in a brown trout (*Salmo trutta*) population [J]. Fisheries Research, 2006, 78(2/3): 380-384.
- [3] CAMPANA S E, NATANSON L J, MYKLEVOLL S. Bomb dating and age determination of large pelagic sharks [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59(3): 450-455.
- [4] 许巍, 刘必林, 陈新军, 等. 眼睛晶体在头足类生活史分析中的研究进展 [J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(3): 408-412.
XU W, LIU B L, CHEN X J, et al. Research advancements on role of eye lens in reconstruction of cephalopod life history [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018, 33(3): 408-412.
- [5] 刘必林, 桓梦瑶, 许巍, 等. 秘鲁外海茎柔鱼眼睛晶体微结构分析 [J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 384-393.
LIU B L, HUAN M Y, XU W, et al. Microstructure analysis of eye lens of *Dosidicus gigas* off Peru [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 384-393.
- [6] 蒋瑞, 刘必林, 张虎, 等. 中国明对虾眼柄微结构与其生长的关系 [J]. 水产学报, 2019, 43(4): 928-934.
JIANG R, LIU B L, ZHANG H, et al. Growth of *Fenneropenaeus chinensis* based on eye stalk microstructure

- [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 928-934.
- [7] TZADIK O E, CURTIS J S, GRANNEMAN J E, et al. Chemical archives in fishes beyond otoliths: A review on the use of other body parts as chronological recorders of microchemical constituents for expanding interpretations of environmental, ecological, and life - history changes [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2017, 15(3): 238-263.
- [8] DAHM R, SCHONTHALER H B, SOEHN A S, et al. Development and adult morphology of the eye lens in the zebrafish [J]. *Experimental Eye Research*, 2007, 85(1): 74-89.
- [9] WRIDE M A. Lens fibre cell differentiation and organelle loss: Many paths lead to clarity [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 366(1568): 1219-1233.
- [10] BERMAN E R. Tears[M]//BERMAN E R. *Biochemistry of the Eye*. Boston: Springer, 1991: 63-88.
- [11] HORWITZ J. Alpha-crystallin[J]. *Experimental Eye Research*, 2003, 76(2): 145-153.
- [12] JAWAD L A, AL-MAMRY J M, AL-BIMANI S M H, et al. Ocular lens diameter and weight as an age indicator in *Leiognathus equulus* collected from the sea of Oman, sultanate of Oman[J]. *Ribarstvo*, 2011, 69(3): 95-100.
- [13] MAMRY J A, JAWAD L A, BUSAIDI J A, et al. The use of eye lens diameter and weight in age determination in *Siganus canaliculatus* (Park, 1797) (Perciformes, Siganidae) collected from the Arabian sea coasts of Oman[J]. *Natura Montenegrina*, 2012, 11(1): 73-78.
- [14] JAWAD L, AL-MAMRY J, AL-HASSANI L, et al. The feasibility of using eye lens diameter and weight as an age indicator in the Indian Mackerel *Rastrelliger kanagurta* (Cuvier, 1817) collected from the sea of Oman[J]. *Water Research and Management*, 2012, 2(3): 43-46.
- [15] AL-DUBAKEL A Y, ABDULLAH J N. Relationship of body size with some body structures of three young marine fish species collected from Khor Al-Zubair, Iraq[J]. *Anales De Biologia*, 2006, 28: 95-99.
- [16] CONIDES A J, AL-HASSAN L A J. Using eye lens diameter as age indicator of young *Lithognathus mormyrus* and *Diplodus vulgaris*[J]. *Naga*, 2000, 23(3): 21-22.
- [17] AL-HASSAN L A J, EI-TOUMY F F, EI-SILINI O A, et al. Eye lens diameter and weight as an age indicator in two sparid fishes off Benghazi coasts, Libya [J]. *Journal of Fisheries*, 1999, 46(4): 345-349.
- [18] JAWAD L A. Ocular lens diameter and weight as age indicators in two teleost fishes collected from the Red Sea of Yemen[J]. *Zoology in the Middle East*, 2003, 29(1): 59-62.
- [19] CRIVELLI A. The eye lens weight and age in the common carp, *Cyprinus carpio* L. [J]. *Journal of Fish Biology*, 1980, 16(5): 469-473.
- [20] FERENBAUGH J. Elemental analysis of otoliths and eye lenses in the assessment of steller sea lion diets[J]. *Journal of Machine Design*, 2007, 4(4): 637-643.
- [21] 陈新军, 刘必林. 渔业资源生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1-248.
- CHEN X J, LIU B L. *Fishery resources biology* [M]. Beijing: Science Press, 2017: 1-248.
- [22] LAND M F, NILSSON D E. *Animal eyes*[M]. New York: Oxford University Press, 2002: 83-86.
- [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] POURANG N, HAGHIGHI F P, MOAZAMI H R. Hard parts chemical composition as a potentially valuable tool for kutum, *Rutilus kutum* stock discrimination: A case study of the Southern Caspian Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 207: 194-202.
- [25] KIRCHMAIER L, IRRGEHER J, PROHASKA T, et al. Comparison of the elemental composition of different hard parts (otoliths, scales, fin rays, vertebrae and eye lenses) of freshwater fish using ICPMS [C]//EGU General Assembly. Vienna, Austria: EGU, 2013.
- [26] 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.
- [27] DOVE S G. The incorporation of trace metals into the eye lenses and otoliths of fish [D]. Sydney: University of Sydney, 1997.
- [28] 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.
- [29] FISK A T, TITTELMIER S A, PRANSCHKE J L, et al. Using anthropogenic contaminants and stable isotopes to assess the feeding ecology of greenland sharks[J]. *Ecology*, 2002, 83(8): 2162-2172.
- [30] CAUT S, ANGULO E, COURCHAMP F. Variation in discrimination factors ($\Delta^{15}\text{N}$ and $\Delta^{13}\text{C}$): the effect of diet isotopic values and applications for diet reconstruction [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(2): 443-453.
- [31] RAMOS R, GONZÁLEZ-SOLÍS J. Trace me if you can: the use of intrinsic biogeochemical markers in marine top predators[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(5): 258-266.
- [32] 林静远, 刘必林, 桓梦瑶, 等. 我国几种常见头足类角质碳氮稳定同位素分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(3): 394-401.
- LIN J Y, LIU B L, HUAN M Y, et al. Carbon and nitrogen stable isotopes analysis of the common cephalopods beaks in the offshore of China [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(3): 394-401.
- [33] CHEREL Y, HOBSON K A, BAILLEUL F, et al. Nutrition, physiology, and stable isotopes: new information from fasting

- and molting penguins[J]. *Ecology*, 2005, 86(11): 2881-2888.
- [34] FORERO M G, GONZÁLEZ-SOLÍS J, HOBSON K A, et al. Stable isotopes reveal trophic segregation by sex and age in the southern giant petrel in two different food webs [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 296(1): 107-113.
- [35] BOECKLEN W J, YARNES C T, COOK B A, et al. On the use of stable isotopes in trophic ecology[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2011, 42(1): 411-440.
- [36] WALLACE A A, HOLLANDER D J, PEEBLES E B. Stable isotopes in fish eye lenses as potential recorders of trophic and geographic history[J]. *PLoS One*, 2014, 9(10): e108935.
- [37] DE JONG W W. Evolution of lens and crystallins[M]// BLOEMENDAL H. *Molecular and Cellular Biology of the Eye Lens*. New York: John Wiley, 1981: 221-278.
- [38] CAMPANA S E. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 188: 263-297.
- [39] HUTCHINSON J J, TRUEMAN C N. Stable isotope analyses of collagen in fish scales: limitations set by scale architecture [J]. *Journal of Fish Biology*, 2006, 69(6): 1874-1880.
- [40] TRUEMAN C N, MOORE A. Use of the stable isotope composition of fish scales for monitoring aquatic ecosystems [J]. *Terrestrial Ecology*, 2007, 1: 145-161.
- [41] WOODCOCK S H, WALTHER B D. Trace elements and stable isotopes in Atlantic tarpon scales reveal movements across estuarine gradients [J]. *Fisheries Research*, 2014, 153: 9-17.
- [42] HOBSON K A, CLARK R G. Assessing avian diets using stable isotopes I: Turnover of ^{13}C in tissues [J]. *The Condor*, 1992, 94(1): 181-188.
- [43] HOBSON K A, CLARK R G. Assessing avian diets using stable isotopes II: Factors influencing diet-tissue fractionation [J]. *The Condor*, 1992, 94(1): 189-197.
- [44] QUAECK K. Stable isotope analysis of fish eye lenses; reconstruction of ontogenetic trends in spatial and trophic ecology of elasmobranchs and deep-water teleosts [D]. Southampton: University of Southampton, 2017.
- [45] SIMPSON S J. Spatial ecology and fisheries interactions of Rajidae in the UK [D]. Southampton: University of Southampton, 2018.
- [46] KURTH B N. Trophic ecology and habitat use of Atlantic Tarpon (*Megalops atlanticus*) [D]. South Florida: University of South Florida, 2016.
- [47] KURTH B N, PEEBLES E B, STALLINGS C D. Atlantic Tarpon (*Megalops atlanticus*) exhibit upper estuarine habitat dependence followed by foraging system fidelity after ontogenetic habitat shifts [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 225: 106248.
- [48] BIRD C S. The tropho-spatial ecology of deep-sea sharks and chimaeras from a stable isotope perspective [D]. Southampton: University of Southampton, 2017.
- [49] NIELSEN J, HEDEHOLM R B, HEINEMEIER J, et al. Eye lens radiocarbon reveals centuries of longevity in the Greenland shark (*Somniosus microcephalus*) [J]. *Science*, 2016, 353(6300): 702-704.

Review of the information analysis and its application in fish eye lens

LIU Bilin^{1,2,3,4}, HUAN Mengyao¹, XU Wei¹, CHEN Xinjun^{1,2,3,4}

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

Abstract: As one of the hard tissues of fish, eye lens has the characteristics of stable structure, resistance to erosion, and easily accessible. It contains a large amount of protein, which records much chemical information, and has been applied to a certain extent in the age determination of fish. In recent years, with the continuous innovation and progress of geobiochemical technology, the trace element and stable isotope information of fish eye lens has been paid more and more attention to by scholars at home and abroad. Here, the application of determined age, habitat reconstruction and feeding ecological tracking were reviewed in terms of the diameter and weight, microstructure, trace elements and stable isotope of the eye lens, after analyzing the composition and growth pattern of fish eye lens and comparing the advantages of eye lens and other tissues for stable isotope analysis, the research methods, application status and development prospects for stable isotope of eye lens in fish life history information, especially in feeding ecological tracking and habitat reconstruction were summarized to provide reference for future research.

Key words: eye lens; fish; Cephalopoda; age; trace element; stable isotope