

文章编号: 1674-5566(2025)02-0320-13

DOI: 10.12024/jsou.20240304440

西北太平洋公海加利福尼亚标灯鱼年龄和生长

张伊宁¹, 刘必林^{1,2,3,4}, 淡雅婷¹, 李建华^{1,2,3,4}

(1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 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可持续利用重点实验室, 上海 201306)

摘要: 为探究加利福尼亚标灯鱼(*Symbolphorus californensis*)的基础生物学信息, 本研究根据2022年6—7月在西北太平洋公海海域采集的175尾样本, 通过耳石微结构的观察, 对其年龄和生长进行研究分析。结果表明, 加利福尼亚标灯鱼的矢耳石呈卵圆形, 背缘有波状浅沟, 听沟明显, 纵截面微观结构显示出3个生长区: 中心区(CZ)、中间区(MZ)和外部区(EZ), 轮纹数分别为41~62、38~45和157~465; 根据生长纹计数, 计算日龄为242~550 d, 优势日龄组为301~400 d, 占91.46%; 根据捕获时间推算样本孵化时间约为2021年3—8月, 其中高峰孵化日期约为2021年5—6月; 赤池信息准则分析显示, 最适生长方程为贝塔朗非模型(von Bertalanffy): $L_t = 146.325 \times [1 - \exp[-0.01 \times (t - 229.392)]]$; 此外, 研究还表明加利福尼亚标灯鱼的生长纹具有明显的月球周期性, 即在满月期间具有更窄的生长纹宽度。研究结果揭示了加利福尼亚标灯鱼的生活史特征, 为日后资源利用提供科学依据。

关键词: 加利福尼亚标灯鱼; 耳石; 年龄与生长; 月相; 西北太平洋

中图分类号: S 932.4 **文献标志码:** A

加利福尼亚标灯鱼(*Symbolphorus californensis*)属典型的跨太平洋过渡水域的灯笼鱼科(Myctophidae)种类, 主要分布于日本近海至北太平洋^[1], 是西北太平洋的优势中层鱼类之一, 生命周期一般为两年^[2-3]。成年个体白天栖息于300~600 m深的海域, 夜间迁移到0~100 m上层水域, 以捕食浮游动物为主, 将能量从浮游动物转到更高营养级, 并通过昼夜垂直迁徙(Diel vertical migration, DVM)将上层生产力与中层生产力相联系^[4-6]。加利福尼亚标灯鱼是鲑鱼、鲨鱼、海豚和海豹等大型捕食者的重要食物^[7-11], 在北太平洋西部过渡区海洋生态系统中扮演着重要角色^[12]。

自1971年PANNELLA^[13]首次在银无须鲷(*Merluccius bilinearis*)的耳石上发现了日轮以来, 日轮的概念普遍被学者们接受, 在此过程中日龄的鉴定方法不断得到了改进。GARTNER^[14]使用

连续采样法^[15-16]验证了3种灯笼鱼科物种: 耀眼底灯鱼(*Benthoosema suborbitale*)、贡氏华灯鱼(*Lepidophanes guentheri*)和杜氏眶灯鱼(*Diaphus dumerilii*)的生长纹具有一日一纹的特点。TAKAGI等^[3]验证了2种灯笼鱼科物种: 加利福尼亚标灯鱼和瓦明氏角灯鱼(*Ceratoscopelus warmingii*)同样具有一日一纹的特点。在灯笼鱼科物种中, 月球周期对其生长具有一定影响, GIRAGOSOV等^[17]研究结果显示, 闪光灯笼鱼(*Myctophum nitidulum*)耳石的生长纹宽度随月球周期而变化, 半透明区域主要在满月期间形成; LINKOWSKI等^[18]验证了贝氏壮灯鱼(*Hygophum benoiti*)和长鳍壮灯鱼(*Hygophum macrochir*)耳石生长纹宽度同样具有月球周期变化规律, 该结论为研究其食性及昼夜垂直迁徙提供新的参考依据。目前, 关于加利福尼亚标灯鱼的种群结构、生

收稿日期: 2024-03-06 修回日期: 2024-05-10

基金项目: 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位跟踪计划(GZ2022011); 农业农村部全球渔业资源调查监测评估(公海渔业资源综合科学调查)专项(D-8025-23-1002)

作者简介: 张伊宁(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源学。E-mail: 2424065020@qq.com

通信作者: 刘必林, E-mail: bl-liu@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

活习性、年龄生长和摄食生态等生物学特性已有初步研究,但没有基于不同月球周期期间生长纹宽度变化的研究^[3]。本研究根据西北太平洋加利福尼亚标灯鱼的叉长、体质量及耳石微结构数据,对其年龄、生长、孵化日期及生长纹宽度与月球周期性之间的相关性进行分析,旨在了解加利福尼亚标灯鱼基础生物学特征及生活史信息,为今后开发利用其资源提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 样本来源

研究所用加利福尼亚标灯鱼样品来自上海海洋大学“淞航”号于2022年6月19日—7月12日在西北太平洋152°E~160°E和40°N~43°N海域进行远洋渔业资源综合调查时获得的样品(图1),共随机采集样本175尾。调查网具为四片式中层拖网,主尺度为434 m×971 m,网囊采用单囊结构,网口部分采用大网目,网身部分采用机编网片,双叶网板,采用单手纲连接方式。该网具适用于水深0~500 m的变水层作业。

1.2 样品处理

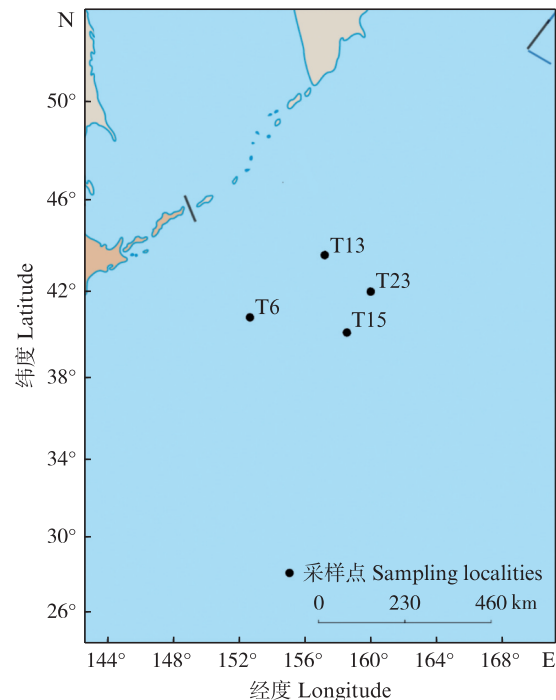
对175尾加利福尼亚标灯鱼进行生物学参数的测量,包括体长、叉长(精确至0.1 mm)及体质量(精确至0.1 g),数值见表1。解剖样本头部取出耳石,存放在含有75%乙醇的1.5 mL离心管中,样本未作性别区分。

1.3 耳石磨片制备及日龄鉴定

取出耳石,将其水平黏附于载玻片上,用1 200和4 000目的水磨砂纸在研磨机(Struers labopol-20)上进行打磨,在此过程中不断在显微镜下观察,以防打磨不均或过度打磨导致样本损坏;最后使用氧化铝(Al_2O_3)水溶剂在抛光绒布上进行抛光。制作好的切片在显微镜下用CCD装

置拍照保存,使用Photoshop 2018软件将不同区域的图片进行拼接,生成可进行轮纹读取的图片格式。

轮纹读取从中间区(Middle zone, MZ)外的第一条轮纹开始,直至耳石外缘,记为外部区(External zone, EZ)日龄;中心区(Central zone, CZ)及中间区选取打磨清楚的样本进行单独计数。读取过程中,每个耳石轮纹读取3次,每次计数的结果需与平均值的差值小于5%^[19],最终以平均值作为最终数据。



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2021)5433号标准地图为底图,底图边界无修改。

The figure is based on the standard map GS(2021)5433 in the Standard Map Service website of Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, with no modifications of the boundaries in the standard map.

图1 西北太平洋加利福尼亚标灯鱼采集站点
Fig. 1 Sampling localities of *Symbolophorus californiensis* of Northwest Pacific Ocean

表1 加利福尼亚标灯鱼样品信息表
Tab. 1 Basic information of *Symbolophorus californiensis*

日期 Date	站点 Sampling localities	纬度 Latitude	经度 Longitude	样本数 Sample number/尾	叉长 Fork length/mm		体质量 Body mass/g	
					范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD
2022.06.19	T6	40°50'N	152°40'E	67	78~134	107.0±10.2	4~18	11.6±2.6
2022.06.27	T13	43°36'N	157°13'E	21	87~110	98.5±6.2	7~18	10.5±3.3
2022.06.30	T15	40°08'N	158°31'E	6	89~111	97.2±7.9	8~18	10.2±3.9
2022.07.12	T23	42°00'N	160°00'E	81	85~123	96.3±7.8	3~16	9.1±2.6

1.4 数据处理

1.4.1 叉长与体质量关系

叉长与体质量之间的关系使用幂函数进行拟合:

$$W = a \times L^b \quad (1)$$

式中: W 为体质量, g ; L 为叉长, mm ; a 、 b 为回归系数。当 $b=3$ 时, 鱼类的生长是匀速的, 当 $b>3$ 或 $b<3$ 时, 分别是正异速或负异速生长^[20]。

1.4.2 生长方程

生长方程采用线性模型、指数模型、幂函数模型、von Bertalanffy^[21-22]、Gompertz^[23-25] 和 Logistic 等 6 个生长模型进行拟合并选出最优模型。

线性模型:

$$L_t = a + bt \quad (2)$$

指数模型:

$$L_t = a \times e^{bt} \quad (3)$$

幂函数模型:

$$L_t = a \times t^b \quad (4)$$

von Bertalanffy:

$$L_t = L_\infty \{1 - \exp[-k(t-t_0)]\} \quad (5)$$

Gompertz:

$$L_t = L_\infty \exp\{-\exp[-G(t-t_i)]\} \quad (6)$$

Logistic:

$$L_t = L_\infty / \{1 + \exp[-K(t-t_j)]\} \quad (7)$$

式中: L_t 为 t 龄时的叉长; t 为日龄; a 、 b 为参数; L_∞ 为理论渐近长度; k 为生长系数; t_0 为 $L=0$ 时的理论年龄; t_i 为生长曲线拐点处的年龄, 即绝对生长率开始下降的年龄; G 为生长发生拐点时的年龄; t_j 为瞬时生长率系数; K 为指数增长率参数。使用最大似然估计法^[26]对参数进行估计, 并根据相关性系数 (R^2) 和赤池信息准则 (Akaike's information criterion, AIC) 来选取最合适方程。

$$I_{AIC} = -2\ln L + 2P \quad (8)$$

式中: I_{AIC} 为赤池信息量准则 AIC 值; $\ln L$ 为似然函数; P 为生长模型的参数个数; 选取 AIC 值最小的模型为最适生长模型^[27-28]。

1.4.3 生长速率

通过将最适增长模型转换为微分形式来确定增长率^[29]。

线性模型:

$$dL/dt = b \quad (9)$$

指数模型:

$$dL/dt = abe^{bt} \quad (10)$$

幂函数模型:

$$dL/dt = abt^{(b-1)} \quad (11)$$

von Bertalanffy:

$$dL/dt = L_\infty k \times \exp[-k(t-t_0)] \quad (12)$$

Gompertz:

$$dL/dt = L_\infty G \times \exp[-G(t-t_i)] \times \exp\{-\exp[-G(t-t_i)]\} \quad (13)$$

Logistic:

$$dL/dt = \{L_\infty K \times \exp[-K(t-t_i)]\} / \{1 + \exp[-K(t-t_i)]\}^2 \quad (14)$$

式中: dL/dt 为生长速率。

使用绝对生长速率 (Absolute growth rate, AGR) 分析加利福尼亚标灯鱼叉长和体质量的生长变化^[30], 计算公式为

$$R_{AGR} = (R_2 - R_1) / (t_2 - t_1) \quad (15)$$

式中: R_{AGR} 为绝对生长速率 AGR, mm/d 或 g/d ; R_2 为 t_2 日龄样本的平均叉长或体质量, mm 或 g ; R_1 为 t_1 日龄样本的平均叉长或体质量, mm 或 g ; t_1 、 t_2 为日龄, d 。

1.4.4 月周期性

为了探究耳石生长与月球周期之间的关系, 分别测量不同站点中耳石 CZ、MZ、EZ 区域间的轮纹宽度, 并根据倒推日期计算满月前后 5 d 以及新月前后 5 d 生长纹宽度平均值, 进行 t 检验验证显著性及相关性^[31]。

最后使用 SPSS 27.0、Excel、Origin 2021、Photoshop 2018 等相关分析软件来处理分析实验数据和绘制图表。

2 结果

2.1 加利福尼亚标灯鱼叉长组成及其与体质量关系

由图 2 可知, 2022 年加利福尼亚标灯鱼样本叉长为 78.0~134.0 mm, 平均叉长为 (100.4±9.9) mm, 其中优势叉长组为 91.0~110.0 mm, 个体数占样本总数的 71.56%, 71.0~90.0 mm 占 10.37%, 111.0~120.0 mm 占 12.20%, 121.0~140.0 mm 仅占 4.87%; 体质量为 3.0~18.0 g, 其中优势体质量组为 3.1~9.0 g, 占样本总数的 75%, 0~3.0 g 仅占 1.83%, 9.1~12.0 g 占 14.02%, 12.1~18.0 g 占 9.14% (图 2)。对本实验加利福尼亚标灯鱼样品叉长及体质量进行拟合, 所得幂函数为 $W = (2.198 \times 10^{-4}) L^{2.322}$, $R^2 = 0.915$; 其中 $b < 3$, 表明加利福尼亚标灯鱼的生长速度为负异速生长 (图 3)。

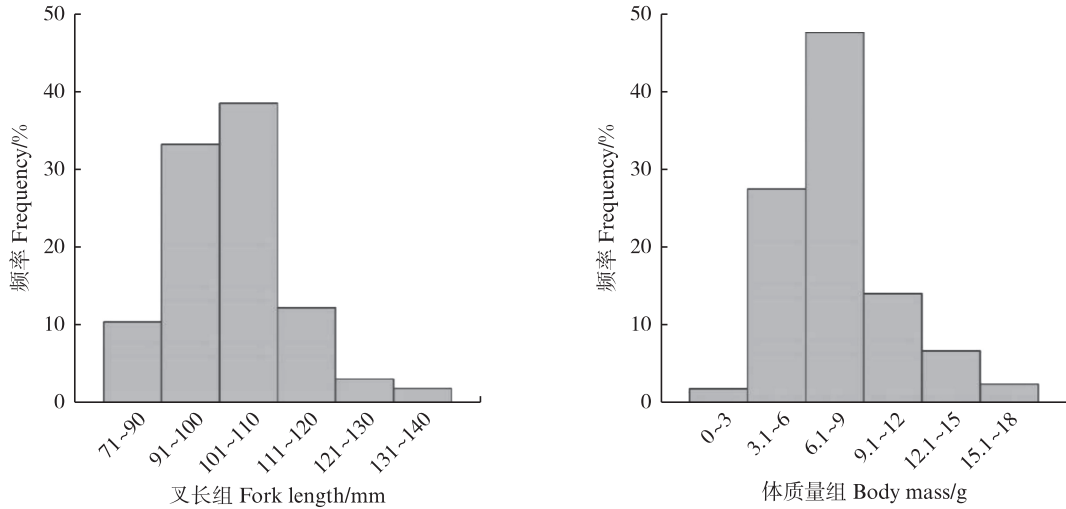


图2 加利福尼亚标灯鱼叉长组成及体质量组成

Fig. 2 Fork length composition and body mass composition of *Symbolophorus californiensis*

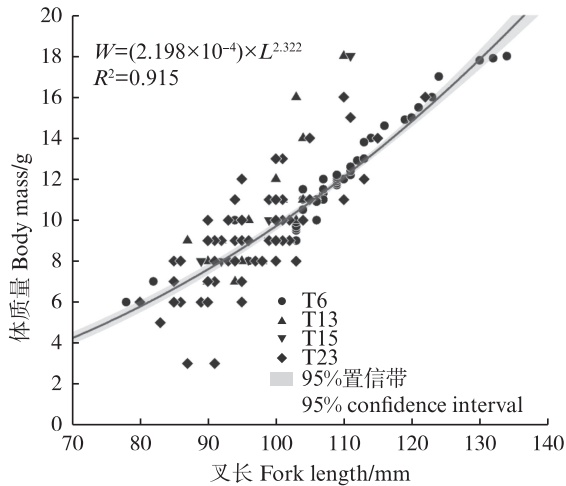


图3 加利福尼亚标灯鱼叉长与体质量关系

Fig. 3 Relationship between fork length and body mass of *Symbolophorus californiensis*

2.2 加利福尼亚标灯鱼耳石微结构

加利福尼亚标灯鱼的矢状耳石呈卵圆形,背缘有波状浅沟,听沟明显(图4),剖面下的微结构显示出3个生长区,即中心区、中间区和外部区(图5)。中心区位于耳石的中心,在光学显微镜下可观察到1个明显原基(核心)。中间区形成了宽阔的黑带,尽管呈现暗色,但高曝光的照片仍能识别生长纹。外部区是耳石的最外层,从中间区的外边界延伸到耳石边缘,每日生长纹宽度比其他2个区域观察到的更加规律清晰,并包含一些特殊的标记轮纹(图5,标记轮3)。中心区和中

间区(图5,标记轮1)以及中间区和外部区(图5,标记轮2)之间的边界清晰可见。

2.3 日龄组成及孵化日期

加利福尼亚标灯鱼耳石轮纹计数显示,日龄为250~548 d,平均日龄为389 d,301~400 d为优势日龄组,占91.46%,251~300 d仅占1.22%,401~550 d占7.32%。其中,中心区域的轮纹数为41~62轮,平均为46轮;中间区域的轮纹数为38~45轮,平均为41轮;外部区域的轮纹数为157~465轮,平均为303轮。根据捕获时间逆推样本孵化时间约为2021年3月至2021年8月,其中高峰孵化时间约为2021年5月至6月(图6)。

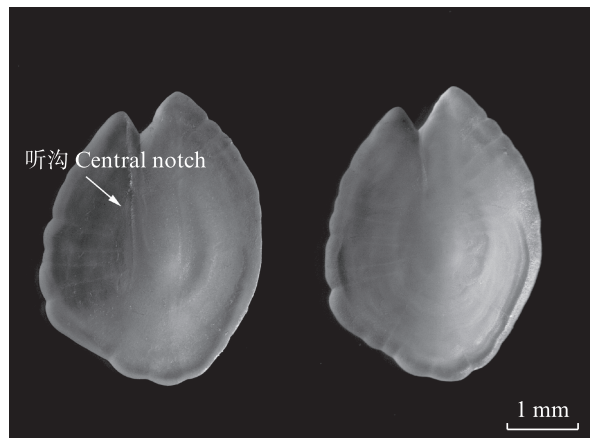


图4 加利福尼亚标灯鱼耳石

Fig. 4 Sagittal otoliths of *Symbolophorus californiensis*

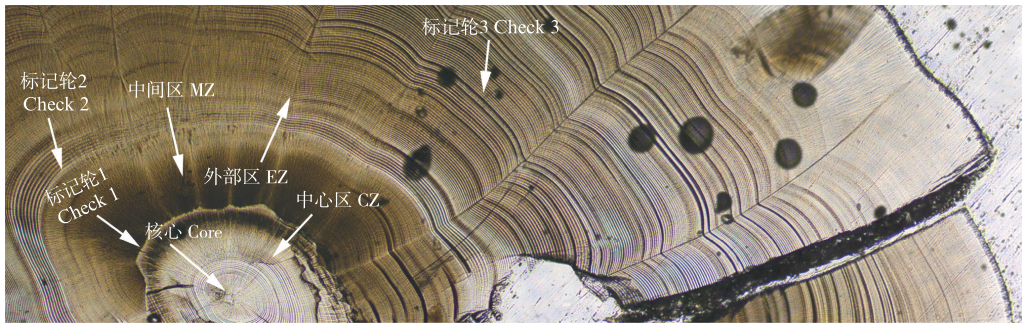


图5 加利福尼亚标灯鱼耳石微结构
Fig. 5 Microstructure of sagittal otoliths in *Symbolophorus californiensis*

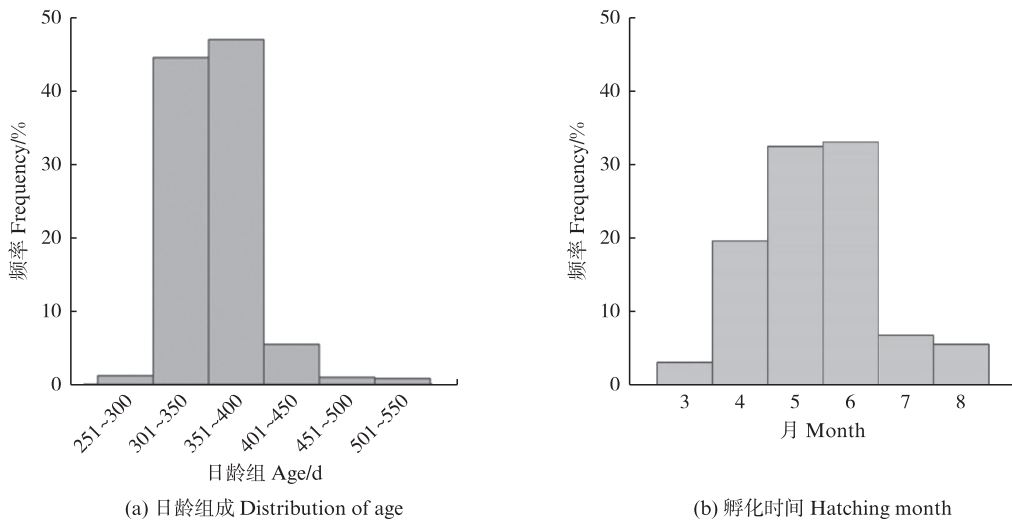


图6 加利福尼亚标灯鱼日龄组成及孵化时间
Fig. 6 Distribution of age and hatching month for *Symbolophorus californiensis*

2.4 生长方程

对加利福尼亚标灯鱼的日龄和叉长用3种生长模型进行拟合,参数使用最小二乘法来估算,最小AIC分析显示 von Bertalanffy为最佳生长模型(表2和图7): $L_t = 146.325 \times \{1 - \exp[-0.01 \times (t - 229.392)]\}$, $R^2 = 0.973$ 。

2.5 生长速率

求导结果显示,叉长83 mm,日龄200 d时,

生长率最大(1.92 mm/d),见图8。随着年龄增加,生长速率逐渐降低,直到达到理论渐近长度的年龄,平均AGR为0.47 mm/d。春季产卵群,日龄380~488 d时,叉长生长速率逐渐下降;日龄262~275 d时,绝对生长速率达到最大(1.00~1.33 mm/d)。夏季产卵群,日龄250~380 d时,叉长生长速率呈下降趋势,日龄289~300 d时绝对生长速率达到最大(1.00~1.43 mm/d)。

表2 加利福尼亚标灯鱼生长模型AIC值

Tab. 2 Fitting AIC for growth patterns of the mantle length and body mass-at-age of *Symbolophorus californiensis*

生长方程 Growth function	L_∞ /mm	a	b	K	G	t_0	t_i	R^2	AIC
线性模型	*	1.48	155.13	*	*	*	*	0.35	106.67
指数模型	*	187.90	0.01	*	*	*	*	0.34	108.29
幂函数模型	*	155.79	0.14	*	*	*	*	0.12	130.32
von Bertalanffy	146.32	*	*	0.01	*	229.39	*	0.97	-26.66
Gompertz	107.21	*	*	*	0.33	*	221.64	0.90	-21.06
Logistic	107.06	*	*	0.03	*	227.83	*	0.90	-15.76

注:*表示公式中无该项参数。

Notes: * represents this parameter does not exist in this formula.

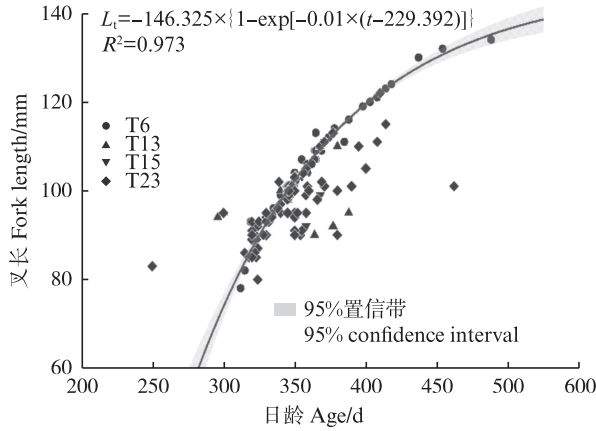


图7 加利福尼亚标灯鱼叉长生长曲线
 Fig. 7 Relationship between age and fork length of *Symbolophorus californiensis*

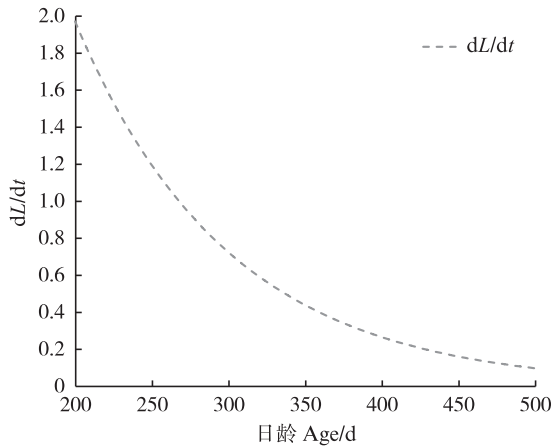


图8 加利福尼亚标灯鱼叉长-日龄绝对生长速率图
 Fig. 8 AGR of fork length-age of *Symbolophorus californiensis*

2.6 轮纹生长的日月周期性

从4个站点随机选取20个样品进行日轮计数及分区生长纹测量,分析发现样本生长过程存在两个生长高峰期(图9)。将生长状态较稳定的月份满月前后5d的平均生长纹宽度与上一次和下一次新月前后5d平均生长纹宽度进行比较,存在显著相关性($P < 0.01$)。结果表明,加利福尼亚标灯鱼耳石生长纹存在明显的月球周期性(图10和表3)。

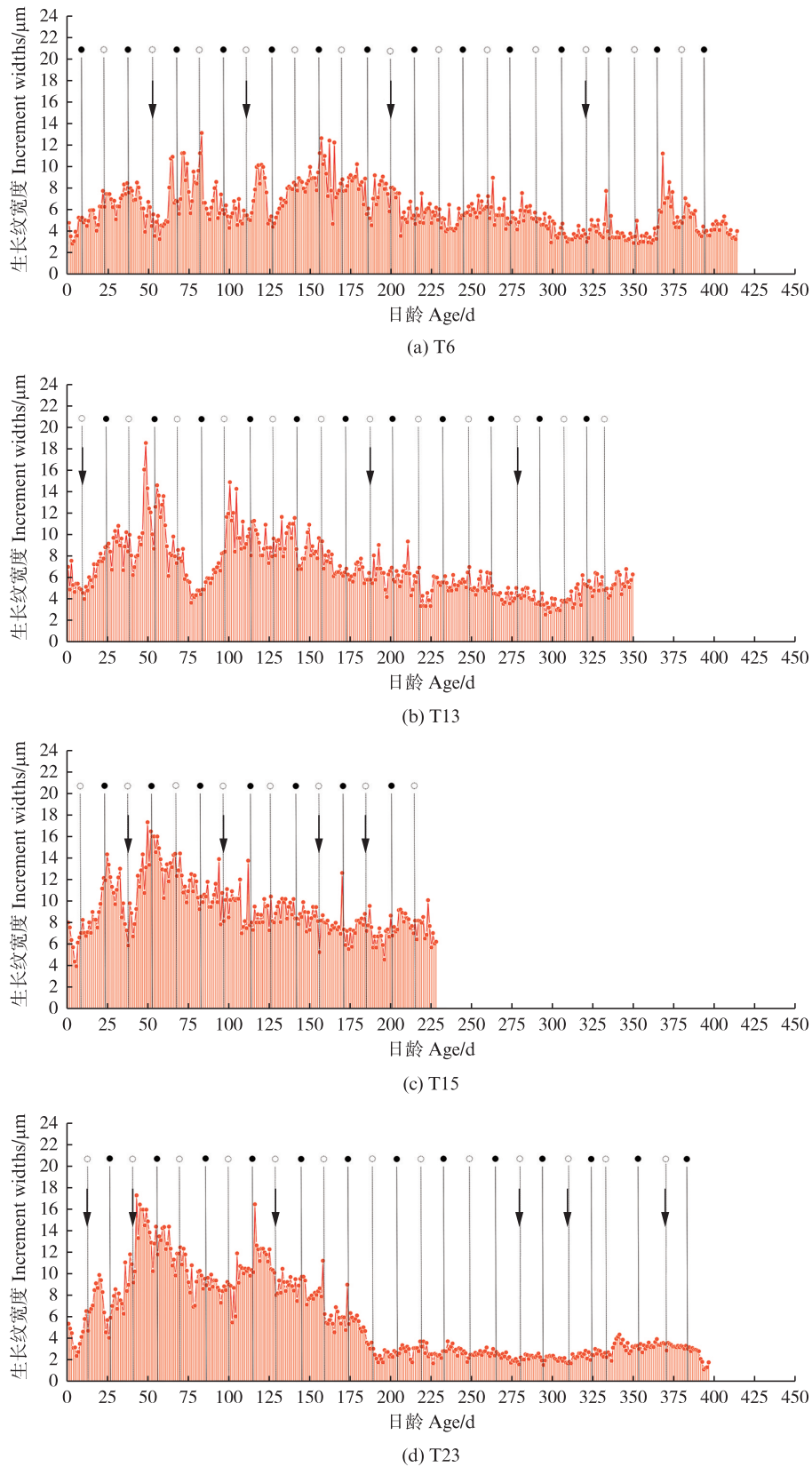
3 讨论

3.1 加利福尼亚标灯鱼耳石微结构

根据加利福尼亚标灯鱼耳石中心区域生长纹计数显示,加利福尼亚标灯鱼幼鱼发育所需时间为41~62d,平均为(46.3±3.8)d,这比黑潮-亲

潮过渡区的加利福尼亚标灯鱼的30~64d,平均为(48.0±6.3)d略大^[3]。不同灯笼鱼耳石中心区域生长纹数量存在显著差异。例如,闪光灯笼鱼耳石中心区域生长纹为33~43d^[17],七星底灯鱼(*Benthoosema pterotum*)耳石中心区域生长纹为22~32d,扇形泰勒灯鱼(*Tarletonbeania crenularis*)耳石中心区域生长纹高达80~139d^[32]。同一物种间幼鱼发育时间长短不一的原因可能是由于环境因素的变化所导致,如温度和食物供应的变化^[33]。

耳石中间区域生长纹计数显示,加利福尼亚标灯鱼由幼鱼发育为成鱼所需时间为38~45d,平均为(41±8.8)d,这与黑潮-亲潮过渡带样本的23~61d,平均为(41±8.2)d接近。TAKAGI等^[3]假设这个生长区代表了整个变态期,并且中间区域的生长纹数量被用来估计个体发育中内源性营养阶段向外源性营养阶段转变的持续时间,由于本实验捕获到的样本中没有包含未形成、形成和形成完整中间区域的加利福尼亚标灯鱼幼鱼,无法完全验证该结论。但从耳石微结构可知,该区域的生长纹宽度确实出现多次明显变化(图11),第一阶段平均生长纹宽度约为14.50 μm,第二阶段平均生长纹宽度约为12.80 μm,第三阶段平均生长纹宽度约为13.03 μm,第四阶段平均生长纹宽度约为10.93 μm,并逐渐与外部区域生长纹宽度相近,这种生长纹宽度的变化可能与内源性向外源性食性转变有关,也可能与视觉系统的形态和生理变化有关^[34]。在大部分鱼类中,处于发育早期的幼鱼适合在明亮的光线下高效觅食,在后期生长发育过程中因眼睛中适应弱光环境的杆状光受体和能够适应强光环境并产生色觉的锥状光受体逐渐发育完成,从而有效提高鱼类识别捕食者的能力^[35]。SASSA等^[36]研究表明,在北太平洋西部与南部过渡区内,加利福尼亚标灯鱼的稚鱼在春季至初夏时,主要在温暖且饵料丰富的100m上层水域活动,该结果进一步验证了大部分灯笼鱼科幼鱼为视觉觅食者^[37]这一结论。因此,本研究结果与GARTNER^[14]和LINKOWSKI^[38]的结果一致,即加利福尼亚标灯鱼耳石中间区域生长纹的形成始于幼鱼向下迁移至更深层水域时期。



- . 新月; ○. 满月; 箭头表示满月期间较窄的生长纹宽度。
- . New moon ; ○. Full moon; Arrows indicate narrower increment widths during the full moon period.

图9 加利福尼亚标灯鱼4个站点耳石生长纹与月周期关系

Fig. 9 Changes in the 4-sampling localities of increment widths from juvenile to adult stages in relation to back calculated lunar phase of *Symbolophorus californiensis*

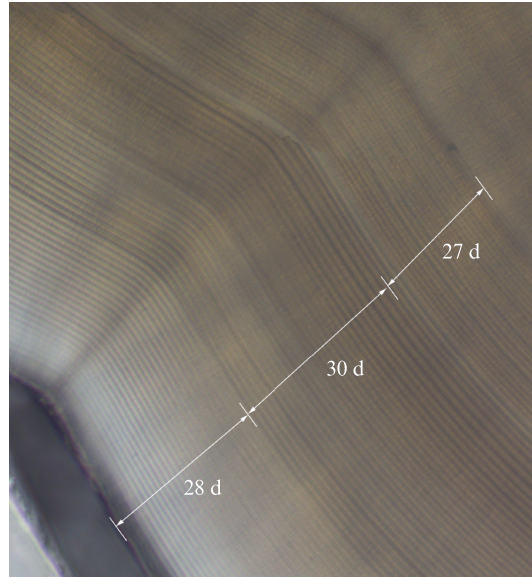


图 10 加利福尼亚标灯鱼耳石与月周期微结构特征

Fig. 10 Lunar periodicity in otolith microstructure of *Symbolophorus californiensis*

表 3 加利福尼亚标灯鱼满月期间的平均生长纹宽度与最近两个新月期间的平均宽度比

Tab. 3 Comparison of the mean increment widths for the five days around the full moon with those for the five days around the previous and next new moons in *Symbolophorus californiensis* otoliths

站点 Sample localities	8月 August			9月 September			10月 October			11月 November		
	满月 Full moon	新月 New moon	比率 Rate	满月 Full moon	新月 New moon	比率 Rate	满月 Full moon	新月 New moon	比率 Rate	满月 Full moon	新月 New moon	比率 Rate
T6	5.51	5.75	0.96	5.49	8.35	0.66	8.08	9.98	0.81	6.89	7.63	0.90
T13	8.21	8.40	0.98	7.99	12.08	0.66	9.9	5.12	1.93	8.72	9.95	0.88
T15	9.03	8.48	1.06	8.18	8.93	0.92	7.53	7.84	0.96	7.54	7.69	0.98
T23	11.41	13.03	0.88	8.13	9.36	0.69	9.73	11.52	0.84	7.24	8.79	0.82

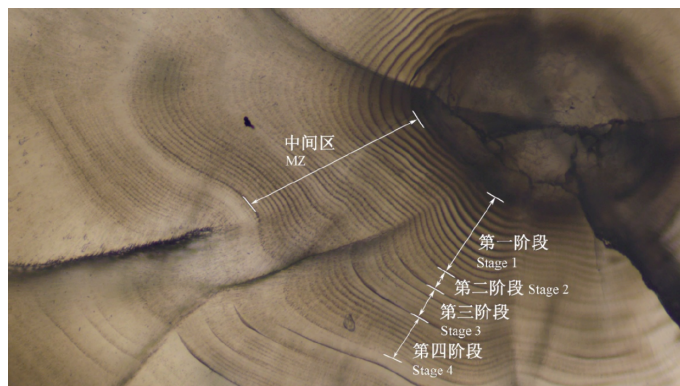


图 11 加利福尼亚标灯鱼耳石中间区微结构特征

Fig. 11 MZ in otolith microstructure of *Symbolophorus californiensis*

3.2 加利福尼亚标灯鱼的年龄与生长

根据 GARTNER^[14]的研究,墨西哥湾东部的耀眼底灯鱼、贡氏华灯鱼和杜氏眶灯鱼在晚上进入温暖的上层水域时生成新的生长纹,而白天在深海区几乎没有新的生长纹形成。此结论也在卡

帕眶灯鱼 (*Diaphus kapalae*)^[40] 和粗鳞灯笼鱼 (*Myctophum asperum*)^[31] 等种类中得到了验证^[41]。TAKAGI 等^[3]通过生长纹计数得出采自黑潮-亲潮过渡带的加利福尼亚标灯鱼日龄为 81~541 d,本研究调查区域内的样本日龄为 250~548 d,与以往

的研究结果相符。通过对耳石生长纹的分析,加利福尼亚标灯鱼在孵化后的325~375 d,标准体长能达到100 mm,由此可推断,该物种至少在孵化后一年内就会达到性成熟,并且生命周期至少可以达到两年。冬季至春季,日本中部和南部沿海地区受黑潮影响,会偶然捕获一些加利福尼亚标灯鱼,但这些标本的性腺发育数据尚未报道^[42]。SASSA等^[43]的研究发现,加利福尼亚标灯鱼成鱼在冬季向南产卵迁徙后,春季会在黑潮延伸前缘以北区域产卵,冬季在黑潮区域捕捞的样本中超过30%的雌性卵巢含有迁移核卵母细胞或排卵后卵泡,这表明该区域加利福尼亚标灯鱼形成了一个产卵群体并即将产卵,雄性和雌性成熟个体的平均体长分别为99和108 mm^[43]。这一结果与本研究逆推的孵化时间一致,但逆推结果还揭示了夏初在亲潮区域的产卵现象,可能是由于该区域春季温度偏低所致。

由于部分加利福尼亚标灯鱼样本尾鳍受损,故使用叉长代替体长进行生长方程拟合。其中,叉长与体质量关系呈指数关系,这种关系也适用于描述其他鱼类的体长与体质量之间的关系^[44]。叉长与日龄之间的关系则最适合用 von Bertalanffy 生长方程来描述,这与 TAKAGI 等^[3]的研究结果一致。灯笼鱼种群通常根据环境差异展现不同的生长模式,即便对于同一物种,不同的产卵群体或地理种群的生长特征(如理论长度 L_{∞} 、生长系数 k 、理论年龄 t_0)也常常呈现差异,这与其栖息地环境(如温度、食物来源等)紧密相关^[45]。

由最佳生长方程可知,本研究海域加利福尼亚标灯鱼理论渐进叉长($L_{\infty}=146.325$ mm)高于黑潮-亲潮过渡带的理论渐进体长($L_{\infty}=128$ mm)。这可能是由于 TAKAGI 等^[3]的样本采集于1997—2003年,近年来环境变化可能导致生长速率的改变。同时,采集样本的长度和年龄范围对生长模型的参数有重要影响,因此,理论年龄的不同可能是由于本实验样本捕捞时间集中,导致样本年龄集中且多为成年个体。

本研究中,春季产卵群体与夏季产卵群体的生长速率相似,平均生长速率为0.27 mm/d,高于黑潮-亲潮海域的加利福尼亚标灯鱼^[3]。这可能是由于本研究样本量较小,导致生长方程无法准确地模拟生长过程,从而对生长速率的估算产生偏差。

3.3 生长纹宽度的月周期性

LINKOWSKI 等^[18]研究表明,在满月时期,贝氏壮灯鱼和长鳍壮灯鱼停留在寒冷的深海水域,导致生长缓慢^[18]。REAL 等^[46]和 CLARKE 等^[47]在太平洋中部的近壮灯鱼(*Hygophum proximum*)和莱氏壮灯鱼(*Hygophum reinhardtii*)身上也观察到了这种垂直迁移模式的变化,大多数灯笼鱼在新月期的迁移深度比新月期深约50 m。这种现象在大西洋赤道水域的闪光灯灯笼鱼以及黑潮中的粗鳞灯笼鱼身上皆被证实^[31],该现象解释了满月期生长纹的减少与之在更深、更冷的环境有关。不同的是,墨西哥湾的大多数灯笼鱼种类^[48]以及北大西洋的瓦明氏角灯鱼(*Ceratoscopelus warmingii*)^[29]的昼夜垂直迁移并不受月相的影响^[49]。

出现月球周期性的另一种解释是由于满月时的光照,浮游动物可能分散在水面,从而降低了食物的可获得性^[31]。在本研究的西北太平洋公海区域,加利福尼亚标灯鱼主要以桡足类为饵料,主要是双刺平头水蚤(*Candacia bipinnata*)^[41]和中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)^[50],因此也出现了相似的月球周期性表现。值得注意的是,海洋生物的生长受天气和海洋条件的影响,这可能使得耳石的生长纹并不始终与月球周期紧密相关^[51]。

4 结论与展望

西北太平洋公海海域加利福尼亚标灯鱼寿命一般为1~2龄,孵化时间主要集中在5—6月,生长符合 von Bertalanffy 模型,表明本研究调查区域内的样本与黑潮-亲潮过渡带的加利福尼亚标灯鱼的年龄与生长特性具有相似性。西北太平洋公海海域加利福尼亚标灯鱼生长纹具有明显的月球周期性,在满月期生长速率减慢,新月期生长速率增加,该结果与闪光灯灯笼鱼和粗鳞灯笼鱼相似。本实验中,我们发现耳石微结构的中间区域轮纹间距存在显著的宽度差异,这个区域恰好是鱼类从幼鱼成长为成鱼且食性转变的关键时期,后续研究可通过连续采样法来验证 TAKAGI 等^[3]的假设,即中间区域代表了整个变态时期。根据耳石轮纹逆推孵化日期,可将其分为3—5月(春季)及6—8月(夏季)2个孵化群体。由于样本量有限,本实验未对不同年份的加利福尼亚标灯鱼进行比较。SASSA 等^[36]的研究结果

显示,黑潮区的加利福尼亚标灯鱼表现出多次产卵的繁殖特性,而亲潮区的加利福尼亚标灯鱼是否存在两个孵化群体,还需更多年份的实验结果来验证。

感谢所有参与调查以及样品采集和鉴定的老师、同学以及“崧航号”全体工作人员及船员。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] WILLIS J M, PEARCY W G, PARIN N V. Zoogeography of midwater fishes in the Subarctic Pacific [J]. Bulletin of the Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1988, 26: 79-142.
- [2] SASSA C, KAWAGUCHI K, KINOSHITA T, et al. Assemblages of vertical migratory mesopelagic fish in the transitional region of the western North Pacific [J]. Fisheries Oceanography, 2002, 11(4): 193-204.
- [3] TAKAGI K, YATSU A, MOKU M, et al. Age and growth of lanternfishes, *Symbolophorus californiensis* and *Ceratospelus warmingii* (Myctophidae), in the Kuroshio-Oyashio Transition Zone [J]. Ichthyological Research, 2006, 53(3): 281-289.
- [4] WATANABE H, MOKU M, KAWAGUCHI K, et al. Diel vertical migration of myctophid fishes (Family Myctophidae) in the transitional waters of the western North Pacific [J]. Fisheries Oceanography, 1999, 8(2): 115-127.
- [5] YATSU A, SASSA C, MOKU M, et al. Night-time vertical distribution and abundance of small epipelagic and mesopelagic fishes in the upper 100m layer of the Kuroshio-Oyashio Transition Zone in Spring [J]. Fisheries Science, 2005, 71(6): 1280-1286.
- [6] TAKAGI K, YATSU A, ITOH H, et al. Comparison of feeding habits of myctophid fishes and juvenile small epipelagic fishes in the western North Pacific [J]. Marine Biology, 2009, 156(4): 641-659.
- [7] WALKER W A, JONES L L. Food habits of northern right whale dolphin, Pacific white-sided dolphin and northern fur seal caught in the high seas driftnet fisheries of the North Pacific Ocean, 1990 [J]. Bulletin, 1993, 53: 285-295.
- [8] YONEZAKI S, KIYOTA M, BABA N, et al. Size distribution of the hard remains of prey in the digestive tract of northern fur seal (*Callorhinus ursinus*) and related biases in diet estimation by scat analysis [J]. Mammal Study, 2003, 28(2): 97-102.
- [9] WATANABE H, KUBODERA T, ICHII T, et al. Feeding habits of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the transitional region of the central North Pacific [J]. Marine Ecology Progress, 2004, 266: 173-184.
- [10] 刘必林,刘庭羽,宋林玮. 西北太平洋公海柔鱼和日本爪乌贼个体发育期营养生态位变化分析[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(4): 868-877.
- LIU B L, LIU T Y, SONG L W. Analysis of trophic niche changes during the individual developmental period of *Ommastrephes bartramii* and *Onychoteuthis borealijaponicus* in the high sea of Northwest Pacific Ocean [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(4): 868-877.
- [11] 刘庭羽,张嘉琦,刘必林. 西北太平洋公海两种大洋性鱿鱼营养生态位分析[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(4): 878-887.
- LIU T Y, ZHANG J Q, LIU B L. Trophic niche analysis of two species of Oceanic squid in the high sea of Northwest Pacific Ocean [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(4): 878-887.
- [12] PRIEDE I G. Deep-sea fishes: biology, diversity, ecology and fisheries [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [13] PANNELLA G. Fish otoliths: daily growth layers and periodical patterns [J]. Science, 1971, 173(4002): 1124-1127.
- [14] GARTNER JR J V. Life histories of three species of lantern fishes (Pisces: Myctophidae) from the eastern Gulf of Mexico: I -Morphological and microstructural analysis of sagittal otoliths [J]. Marine Biology, 1991, 111(1): 11-20.
- [15] BROTHERS E B, MCFARLAND W N. Correlations between otolith microstructure, growth and life history transitions in newly recruited French grunts (*Haemulon flavolineatum*) [J]. Rapp. pV. Reun. Cons. Int. Explor. Mer, 1981, 178: 369-374.
- [16] RE P. Evidence of daily and hourly growth in pilchard larvae based on otolith growth increments, *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792) [J]. Cybium: International Journal of Ichthyology, 1984, 8(1): 33-38.
- [17] GIRAGOSOV V, OVCHAROV O P. Age and growth of the lantern fish *Myctophum nitidulum* (Myctophidae) from the tropical Atlantic [J]. Journal of Ichthyology, 1992, 32(6): 34-42.
- [18] LINKOWSKI T B. Lunar rhythms of vertical migrations coded in otolith microstructure of North Atlantic lanternfishes, genus *Hygophum* (Myctophidae) [J]. Marine Biology, 1996, 124(4): 495-508.
- [19] 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.
- LIU B L, CHEN X J, ZHONG J S. Age, growth and

- population structure of squid *Sthenoteuthis oualaniensis* in northwest Indian Ocean by statolith microstructure [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(3): 206-212.
- [20] FROESE R. Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22(4): 241-253.
- [21] VON BERTALANFFY L. A quantitative theory of organic growth (inquires on growth lawsII) [J]. Human Biology, 1938, 10: 181-213.
- [22] BEVERTON R J H, HOLT S J. On the dynamics of exploited fish populations [Z]. London: Fisheries Investigations, 1957.
- [23] GOMPERTZ B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining the value of life contingencies [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1815, 115: 515-585.
- [24] SMART J J, CHIN A, TOBIN A J, et al. Multimodel approaches in shark and ray growth studies: strengths, weaknesses and the future [J]. Fish and Fisheries, 2016, 17(4): 955-971.
- [25] TJØRVEK M C, TJØRVE E. The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: an addition to the Unified-Richards family [J]. PLoS One, 2017, 12(6): e0178691.
- [26] 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 Exclusive Economic Zone of Chilean waters [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2011, 91(1): 229-235.
- [27] MANGEL M, QUINN, T J, DERISO R B. Quantitative fish dynamics [J]. Quarterly Review of Biology, 1999, 2(1): 286-287.
- [28] BAŞUSTAN, BAŞUSTA A, TIRAŞIN E M, et al. Age and growth of the blackchin guitarfish *Glaucostegus cemiculus* (Geoffroy Saint-Hilaire, 1817) from Iskenderun Bay (Northeastern Mediterranean) [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2020, 36(6): 880-887.
- [29] ZHANG J, WANG Y, CHEN Z Z, et al. Age and growth of *Ceratoscopelus warmingii* (Myctophidae) in the South China Sea based on sagittal otolith microstructure [J]. Marine Biology Research, 2021, 17(7/8): 733-743.
- [30] 刘必林, 刘娜, 李建华, 等. 智利外海茎柔鱼角质颞微结构及其年龄与生长研究 [J]. 南方水产科学, 2020, 16(1): 62-68.
- LIU B L, LIU N, LI J H, et al. Beak microstructure and its application in age and growth study of *Dosidicus gigas* in open sea of Chile [J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(1): 62-68.
- [31] HAYASHI A, KAWAGUCHI K, WATANABE H, et al. Daily growth increment formation and its lunar periodicity in otoliths of the myctophid fish *Myctophum asperum* (Pisces: Myctophidae) [J]. Fisheries Science, 2001, 67(5): 811-817.
- [32] BYSTYDZIĘNSKA Z E, PHILLIPS A J, LINKOWSKI T B. Larval stage duration, age and growth of blue lanternfish *Tarletonbeania crenularis* (Jordan and Gilbert, 1880) derived from otolith microstructure [J]. Environmental Biology of Fishes, 2010, 89(3/4): 493-503.
- [33] CARUSO M J, GAWARKIEWICZ G G, BEARDSLEY R C. Interannual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea [J]. Journal of Oceanography, 2006, 62(4): 559-575.
- [34] SASSA C. Feeding ecology of *Symbolophorus californiensis* larvae (Teleostei: Myctophidae) in the southern transition region of the western North Pacific [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2010, 90(6): 1249-1256.
- [35] EVANS B I, BROWMAN H I. Variation in the development of the fish retina [J]. American Fisheries Society Symposium, 2004, 40: 145-166.
- [36] SASSA C, KAWAGUCHI K, TAKI K. Larval mesopelagic fish assemblages in the Kuroshio-Oyashio transition region of the western North Pacific [J]. Marine Biology, 2007, 150(6): 1403-1415.
- [37] RODRÍGUEZ-GRANAL, CASTRO L, LOUREIRO M, et al. Feeding ecology of dominant larval myctophids in an upwelling area of the Humboldt Current [J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 290: 119-134.
- [38] LINKOWSKI T B. Otolith microstructure and growth patterns during the early life history of lanternfishes (Family Myctophidae) [J]. Canadian Journal of Zoology, 1991, 69(7): 1777-1792.
- [39] GARTNER JR J V. Life histories of three species of lanternfishes (Pisces: Myctophidae) from the eastern Gulf of Mexico: II -Age and growth patterns [J]. Marine Biology, 1991, 111(1): 21-27.
- [40] SUTHERS I M. Spatial variability of recent otolith growth and RNA indices in pelagic juvenile *Diaphus kapalae* (myctophidae): an effect of flow disturbance near an island? [J]. Marine and Freshwater Research, 1996, 47(2): 273-282.
- [41] MOKU M, HAYASHI A, MORI K, et al. Validation of daily otolith increment formation in the larval myctophid fish *Diaphus slender-type* spp. [J]. Journal of Fish Biology, 2005, 67(5): 1481-1485.
- [42] SASSA C, TAKASUKA A. Distribution of *Symbolophorus californiensis* (Teleostei: Myctophidae) in

- the Kuroshio region during late winter: evidence of a southward spawning migration [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2019, 150: 103053.
- [43] SASSA C, KAWAGUCHI K, OOZEKI Y, et al. Distribution patterns of larval myctophid fishes in the transition region of the western North Pacific [J]. *Marine Biology*, 2004, 144(3): 417-428.
- [44] 黄慧娴, 李建华, 麻秋云, 等. 浙江南部近海银姑鱼的年龄与生长 [J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(3): 739-748.
- HUANG H X, LI J H, MA Q Y, et al. Age and growth of *Pennahia argentata* in the offshore waters of southern Zhejiang [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(3): 739-748.
- [45] HOSSEINI-SHEKARABI S P, VALINASSAB T, BYSTYDZIENSKA Z, et al. Age and growth of *Benthoosema pterotum* (Alcock, 1890) (Myctophidae) in the Oman Sea [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2015, 31(1): 51-56.
- [46] REAL E, BERNAL A, OLIVAR M P, et al. Growth patterns of the dominant lanternfish *Ceratoscopelus maderensis* (Lowe, 1939) from the western Mediterranean [C]//Proceedings of the 5th International Otolith Symposium. Mallorca, 2014.
- [47] CLARKE T A. Some aspects of the ecology of lanternfishes (Myctophidae) in the Pacific Ocean near Hawaii [J]. *Fishery Bulletin*, 1973, 71(2): 401-434.
- [48] GARTNER JR J V, HOPKINS T L, BAIRD R C, et al. The lanternfishes (Pisces: Myctophidae) of the eastern Gulf of Mexico [J]. *Fishery Bulletin*, 1987, 85(1): 81-98.
- [49] LINKOWSKI T B, RADTKE R L, LENZ P H. Otolith microstructure, age and growth of two species of *Ceratoscopelus* (Osteichthyes: Myctophidae) from the eastern North Atlantic [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1993, 167(2): 237-260.
- [50] 付菲雨, 韩霏武, 方舟, 等. 西北太平洋春、冬季浮游动物优势种水平分布与影响因子的关系 [J]. *大连海洋大学学报*, 2022, 37(3): 489-496.
- FU F Y, HAN P W, FANG Z, et al. Distribution and relationship with influential factors of dominant zooplankton species in the Northwest Pacific Ocean in spring and winter [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2022, 37(3): 489-496.
- [51] 韩霏武, 王岩, 方舟, 等. 北太平洋柔鱼不同群体耳石日增量对海洋环境的响应研究 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(1): 101-112.
- HAN P W, WANG Y, FANG Z, et al. Response of daily increment of statolith of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) for different cohorts to marine environment in the North Pacific [J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(1): 101-112.

Age and growth of *Symbolphorus californensis* in the high sea of Northwest Pacific Ocean

ZHANG Yining¹, LIU Bilin^{1,2,3,4}, DAN Yating¹, LI Jianhua^{1,2,3,4}

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Oceanic Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: To understand the fishery biology of *Symbolphorus californensis*, the age and growth were analyzed in 175 samples collected in the high seas of Northwest Pacific Ocean from June to July 2022 through the observation of otolith microstructure. The results showed that the sagittal otolith of *S. californensis* is elliptical, with a sinuate dorsal margin, shallow sulcus, and rounded to oval cauda. The otolith microstructure along sagittal section exhibited three of the growth zones: CZ, MZ and EZ, respectively with 45–50, 38–45 and 157–465 daily growth increments. The sum of daily growth increments in the three zones determined an age range (lifespan) of *S. californensis* specimens as 242–550 days, with the dominant group from 301 days to 400 days (91.46%). By obtaining the age in days of each specimen, the back-calculated hatching date of specimens collected was determined as from March to August of last year with a peak in May to June. The AIC analysis indicates that the optimal growth equation is the von Bertalanffy growth model, with the fitting as: $L_t=146.325 \times \{1-\exp[-0.01 \times (t-229.392)]\}$. In addition, *S. californensis* of Northwest Pacific Ocean was found to have daily growth increments of its sagittal otolith, which also exhibited lunar periodicity in the deposition of increments, with growth increments during the full moon period. The results of this study reveal its life history characteristics and provide scientific basis for future resource utilization.

Key words: *Symbolphorus californensis*; statolith; age and growth; lunar periodicity; Northwest Pacific Ocean