

# 西南大西洋阿根廷滑柔鱼耳石微结构及生长特性

陆化杰<sup>1,2,3</sup> 陈新军<sup>1,2,3\*</sup> 方舟<sup>1</sup> 刘必林<sup>1,2,3</sup>

(<sup>1</sup>上海海洋大学海洋科学学院, 201306)

(<sup>2</sup>大洋生物资源开发和利用上海市高校重点实验室, 上海 201306)

(<sup>3</sup>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)

**摘要** 根据我国鱿钓船 2007、2008 和 2010 年在西南大西洋作业期间采集的 3 462 尾阿根廷滑柔鱼样本(其中 2007 年 308 尾、2008 年 262 尾、2010 年 2 892 尾),测量了 491 枚耳石外部形态参数和耳石重量(雌性 274 枚、雄性 217 枚),结合耳石的日轮,对耳石微结构及其生长特性进行了研究。结果表明,阿根廷滑柔鱼耳石的生长纹由明暗相间的环纹组成,耳石中心为黑色,呈水滴形;从核心到侧区边缘,轮纹宽度由窄至宽,亮度由明至暗;侧区到北区边缘,轮纹则由宽至窄,亮度由暗至明。根据生长纹的宽度和颜色的明暗,可将整个耳石分为 3 个区域,即后核心区、暗区、外围区。不同群体间耳石总长(TSL)和最大宽度(MW)的生长存在显著性差异,但性别间无差异。冬季产卵群 TSL 和 MW 的生长适合用线性函数表示,秋季产卵群则适合用对数函数表示。耳石重量(SW)的生长存在群体和性别间差异,冬季产卵群雌、雄个体 SW 的生长分别适合用幂函数和指数函数表示,秋季产卵群则分别适合用指数函数和对数函数表示。两个群体的 TSL、MW、绝对生长率和相对生长率都随着日龄的增加而先增加后减小,而 SW 的绝对生长率则随着年龄增加而增加,相对生长率则随着年龄增加而先增加后减小。同一年龄段内冬季产卵群的绝对和相对生长率基本上都大于秋季产卵群,雌性个体的绝对和相对生长率要大于雄性个体。

**关键词** 阿根廷滑柔鱼 耳石微结构 耳石生长 生长率 西南大西洋

**中图分类号** S917.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2012)03-0015-11

## Statolith microstructure and growth characteristics of *Illex argentinus* in the southwest Atlantic Ocean

LU Hua-jie<sup>1,2,3</sup> CHEN Xin-jun<sup>1,2,3\*</sup> FANG Zhou<sup>1</sup> LIU Bi-lin<sup>1,2,3</sup>

(<sup>1</sup>College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, 201306)

(<sup>2</sup> Key Laboratory of Shanghai Education Commission for Oceanic Fisheries Resources Exploitation, Shanghai 201306)

(<sup>3</sup> Key Laboratory of Ministry of Education for Oceanic Fisheries Resources Sustainable Exploitation, Shanghai 201306)

**ABSTRACT** Statolith microstructure and growth characteristics were studied in 491 specimens (274 females and 217 males) of short-fin squid *Illex argentinus* collected by the Chinese jigging fishing fleet in 2007, 2008 and 2010. The results showed that growth increments of *I.*

国家自然科学基金(NSFC40876090)、上海市优秀学科带头人计划(10XD1402000)、曙光计划跟踪项目(08GG14)和上海市捕捞学重点学科(S30702)共同资助

\* 通讯作者。E-mail: xjchen@shou.edu.cn

收稿日期:2011-08-05;接受日期:2011-09-22

作者简介:陆化杰(1983-),男,讲师,主要从事头足类渔业资源学研究。E-mail: huajielu2006@yahoo.com.cn

*argentinus* consisted of light and dark lines, with the initial point of increment formation (focus) being dark and like a drip of water. The growth increments were narrow to wide, light to dark from the focus to lateral dome, and were wide to narrow, dark to light from lateral dome to dorsal dome. Three zones (postnuclear, dark zone and peripheral zone) occurred in statolith dorsal dome. The results of principal component analysis on ten morphologic indices showed that total statolith length (TSL) and maximum width (MW) could be used to distinguish between different groups. There was no sexual dimorphism in the TSL and MW growth between different groups, and the relationship between age and TSL and MW were best described by linear functions for austral winter group and by logarithm functions for austral autumn group, respectively. However, there was a sexual dimorphism in the statolith weight (SW) between different groups, and the relationship between age and SW for females and males were best described by power and exponential functions for austral winter group and by exponential and logarithm functions for austral autumn group, respectively. The absolute growth rate (AGR) and instantaneous relative growth rate (IRGR) of TSL and MW tended to be high at young stages, and then decreased when the age increased. However, the AGR of SW tended to be higher with the increased age, and the IRGR of SW increased in the beginning and then decreased when age increased. The growth rate of austral winter group was higher than austral autumn group, and the growth rate of females was higher than males at the same age.

**KEY WORDS** *Illex argentinus* Microstructure of statolith Statolith growth  
Growth rate Southwest Atlantic Ocean

阿根廷滑柔鱼 *Illex argentinus* 广泛分布在  $22^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{S}$  的西南大西洋大陆架及大陆坡海域,其中以  $35^{\circ}\sim 52^{\circ}\text{S}$  之间的资源最为丰富(王尧耕等 2005),最高年产量曾达 100 万 t,是重要经济头足类之一,也是中国大陆鱿钓渔业重要的捕捞对象(Chen *et al.* 2010)。国内外一些学者对阿根廷滑柔鱼的生物学(Arkhipkin *et al.* 1990; Arkhipkin 1993; Hatanaka 1986)、资源评估(Csirke 1987; Basson *et al.* 1996)、资源量与海洋环境关系(陈新军等 2005、2004;陆化杰等 2008)进行了研究。耳石是头足类重要的硬组织(刘必林等 2010),其生长贯穿头足类整个生命周期,并且沉积过程具有不可逆性(Radtke 1983),储存了包括反映日龄的生长轮纹(Jackson 1994),反映生长海域环境变化的微量元素等重要信息(Arkhipkin 2005),因此被广泛用于研究头足类的年龄与生长、种群结构等渔业生物学特性(Arkhipkin 1993; Hatanaka 1994; Chen *et al.* 2010)。然而,专门针对头足类耳石微结构及生长特性的研究并不多见。本研究根据 2007、2008 和 2010 年中国大陆鱿钓船在西南大西洋海域生产期间采集的阿根廷滑柔鱼样本,利用耳石形态数据、耳石重量及日龄数据,对西南大西洋阿根廷滑柔鱼耳石的微结构及生长特性进行了研究,旨在为科学利用耳石研究其年龄、生长及生活史提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本采集海域和时间

样品来自“新世纪 52 号”和“浙远渔 807 号”专业鱿钓船。时间为 2007 年 2~5 月、2008 年 3~5 月和 2010 年 1~3 月,采集海域分别为  $40^{\circ}02'\sim 46^{\circ}53'\text{S}$ 、 $57^{\circ}55'\sim 60^{\circ}43'\text{W}$ ;  $45^{\circ}03'\sim 46^{\circ}57'\text{S}$ 、 $60^{\circ}02'\sim 60^{\circ}47'\text{W}$  和  $45^{\circ}17'\text{S}\sim 47^{\circ}14'\text{S}$ 、 $60^{\circ}0'5\sim 60^{\circ}47'\text{W}$ 。从每个站点的渔获物中随机抽取柔鱼样本 10~15 尾,经冷冻保藏运回实验室,共采集样本 3 462 尾(其中 2007 年 308 尾、2008 年 262 尾、2010 年 2 892 尾)。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 耳石提取

在实验室经解冻后对阿根廷滑柔鱼进行耳石提取,获得完整耳石样本 3 450 对(其中雌性 2 019 对、雄性 1 431 对),按照不同的胴长范围随机抽取 491 枚样本,其中雌、雄阿根廷滑柔鱼样本的胴长范围分别为 267~350 mm 和 122~266 mm。对取出的耳石进行编号并存放于盛有 95%乙醇溶液的 1.5 ml 离心管中,以便清除包裹耳石的软膜和表面的有机物质。

### 1.2.2 耳石外部形态测量

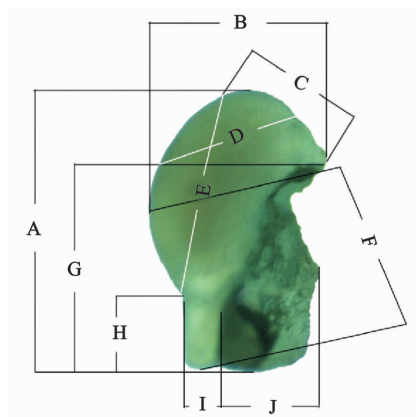
选取右耳石进行图像拍照。首先将耳石凸面向上置于 Nikon ZOOM645S 体式显微镜(物镜 $\times 0.8, \times 1, \times 2, \times 3, \times 4, \times 5$ ;目镜 $\times 10$ ) $\times 50$ 倍下采用 CCD 拍照,然后利用 YR-MV1.0 显微图像测量软件对耳石各形态参数值进行测量。测量时,首先沿水平和垂直两个方向校准,然后对耳石总长(Total statolith length, TSL)、最大宽度(Maximum width, MW)、背区长(Dorsal dome length, DDL)、背侧区长(Ventral dorsal dome length, DLL)、侧区长(Lateral dome length, LDL)、吻侧区长(Rostrum lateral dome length, RLL)、吻区长(Rostrum length, RL)、吻区宽(Rostrum width, RW)、翼区长(Wing length, WL)和翼区宽(Wing width, WW)10项形态参数进行测量(图1)。同一耳石先后测量两次,分别由两个人各自独立进行,当两次测量结果的误差不超过 5%,取它们的平均值,否则重新测量,测量结果精确至 0.01  $\mu\text{m}$ 。

### 1.2.3 耳石重量测量

利用高精度天平分别测量左、右两个耳石重量(Statolith weight, SW),当两者误差不超过 5%时,取其平均值,否则重新测量,测量结果精确至 0.1 mg。

### 1.2.4 耳石研磨和生长纹读取

耳石研磨参照陆化杰(2009)的方法进行(图2)。假定耳石生长一轮纹为 1 d,以此读取各耳石的日龄,结合捕获日期推算其孵化日期,并依据结果划分不同产卵群。



A-总长;B-最大宽度;C-背区长;D-背侧区长;E-侧区长;  
F-吻侧区长;G-翼区长;H-吻区长;I-吻区宽;J-翼区宽

A-TSL;B- MW;C- DDL;D-DLL;E-LDL;F- RLL;G- WL;H- RL;I- RW;J-WW

图1 耳石形态参数

Fig.1 Scheme of morphometric measurements of statolith

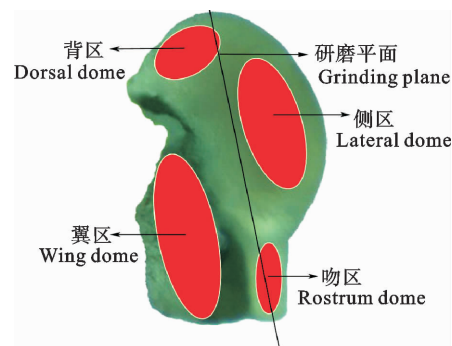


图2 耳石各区分布及研磨平面

Fig.2 Scheme of each dome of statolith and grinding plane

### 1.2.5 生长模型选取

- 1) 对 10 个耳石形态参数进行主成分分析,获得能够表征耳石长度和宽度的参数。
- 2) 利用协方差分析不同群体和不同性别间的日龄与外形参数以及耳石重量之间的关系是否存在显著性差异。
- 3) 分别采用线性生长模型、指数生长模型、幂函数生长模型、对数函数模型和 Logistic 生长模型(Angel *et*

al. 1996; Basson *et al.* 1996; Chen *et al.* 2010; 陆化杰等 2011)拟合阿根廷滑柔鱼耳石的生长方程:

$$\text{线性方程: } L = a + bt \quad (1)$$

$$\text{指数方程: } L = ae^{bt} \quad (2)$$

$$\text{幂函数方程: } L = at^b \quad (3)$$

$$\text{对数函数方程: } L = a \ln(t) + b \quad (4)$$

$$\text{Logistic 生长方程: } L_t = \frac{L_\infty}{1 + \exp[-K(t_i - t_o)]} \quad (5)$$

式中,  $L$  为外形参数或耳石重量, 单位为  $\mu\text{m}$  或  $\text{mg}$ ;  $t$  为日龄, 单位为  $\text{d}$ ;  $a, b, k$  为常数;  $t_o$  为  $L=0$  时的理论日龄;  $L_\infty$  为渐进长度。

4) 采用最大似然法(Hiramatsu 1993; Malcolm 2001)估计模型生长参数, 公式为:

$$L(\tilde{L} | L_\infty, K, t_o, \sigma^2) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[L_i - f(L_\infty, K, t_o, t_i)]^2}{2\sigma^2}\right\}$$

式中,  $\sigma^2$  为误差项方差(Cerrato 1990), 其初始值设定为总体样本平均体长的 15% (Imai *et al.* 2002)。最大似然法取自然对数后估算求得(Buckland *et al.* 1993), 生长参数在 Excel 2003 中利用规划求解拟合求得。

5) 应用(Akaike's information criterion, AIC)进行生长模型比较(Malcolm 2001; Imai *et al.* 2002), 计算公式为:

$$\text{AIC} = -2 \ln L(p_1, \dots, p_m, \sigma^2) + 2m$$

式中,  $L(p_1, \dots, p_m, \sigma^2)$  为年龄长度数据的最大似然值,  $\sigma^2$  为模型参数的最大似然估计值,  $m$  为模型中待估参数的个数。在 5 个生长模型中, 取得最小 AIC 值的模型为最适生长模型。

### 1.2.6 耳石生长率估算

本研究采用瞬时相对增长率 IRGR (Instantaneous relative growth rate) 和绝对增长率 AGR (Absolute growth rate) 来分析阿根廷滑柔鱼耳石生长, 其计算方程分别为(Chen *et al.* 2010):

$$\text{IRGR} = \frac{\ln(R_2) - \ln(R_1)}{t_2 - t_1} \times 100$$

式中,  $R_2$  为  $t_2$  龄时耳石重量 (SW) 或长度 (TSL, FDL 和 FRL 等);  $R_1$  为  $t_1$  龄时耳石重量 (SW) 或长度 (TSL, FDL 和 FRL 等); IRGR 为相对增长率。

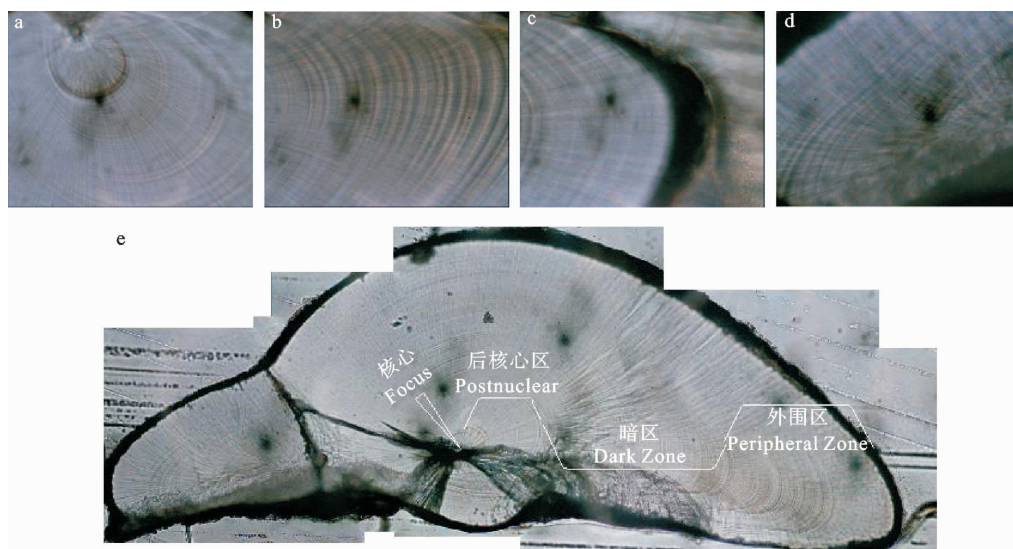
$$\text{AGR} = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1}$$

式中,  $R_2$  为  $t_2$  龄时耳石重量 (SW) 或长度 (TSL, FDL 和 FRL 等);  $R_1$  为  $t_1$  龄时耳石重量 (SW) 或长度 (TSL, FDL 和 FRL 等); SW 的单位为  $\text{mg}$ , TSL, FDL 和 FRL 的单位为  $\mu\text{m}$ ; AGR 的单位为  $\text{mm/d}$  或  $\text{mg/d}$ 。

## 2 结果

### 2.1 耳石微结构

阿根廷滑柔鱼耳石的生长轮纹由明暗相间的环纹组成, 生长起点即耳石中心 (Focus) 颜色稍暗, 核心区 (Nuclear Zone, NZ) 为零轮以内的区域, 通常呈水滴形 (图 3a); 耳石侧区颜色相对较暗, 但生长纹最为清晰, 轮纹宽度及间隔也比较均匀, 易于生长纹的计数 (图 3b); 背区生长纹排列整齐、均匀, 颜色最亮, 也比较易于生长纹的读取 (图 3c), 耳石吻区生长纹相对模糊, 轮纹宽度不一, 存在着明显的细密和粗大的轮纹, 且颜色稍暗, 不利于日龄的读取 (图 3d)。就整体而言, 从核心到侧区边缘, 轮纹宽度由窄至宽, 亮度由明至暗; 侧区到背区边缘, 轮纹则由宽至窄, 亮度由暗至明。根据生长纹的宽度和颜色的明暗, 可以将整个耳石分为 3 个区域, 分别为后核心区 (Postnuclear, P)、暗区 (Dark Zone, DZ)、外围区 (Peripheral Zone, PZ) (图 3e)。其中, DZ 区域轮纹最宽, P 区轮纹较窄, PZ 区轮纹最窄, 3 个区域间没有明显的界线。本研究日龄的读取方向为由核心到侧区, 再由侧区到背区 (图 3e)。



a: 核心区; b: 侧区生长纹; c: 背区生长纹; d: 吻区生长纹; e: 研磨后叠加图: 雌性, 胴长 255 mm, 体重 255 g, 年龄 315 d  
 a: Nucleus; b: Growth increments within the lateral dome; c: Growth increments within the dorsal dome; d: Growth increments within the rostrum; e: A polished anterior side statolith of a mature female, mantle length 255 mm, body weight 258 g, age 315d

图 3 阿根廷滑柔鱼耳石微结构

Fig. 3 Statolith microstructure of *I. argentinus*

## 2.2 耳石外部形态参数及重量组成

测量分析发现的不同性别阿根廷滑柔鱼耳石各形态参数见表 1。雌性 SW 范围为 121.37~402.5 mg, 雄性 SW 范围为 111.0~394.67 mg。

表 1 阿根廷滑柔鱼耳石外形参数范围

Table 1 The ranges of statolith morphological variables of *I. argentinus*

长度变量 Variables of statolith length	雌性样本 Female		雄性样本 Male	
	最大值 Maximum ( $\mu\text{m}$ )	最小值 Minimum ( $\mu\text{m}$ )	最大值 Maximum ( $\mu\text{m}$ )	最小值 Minimum ( $\mu\text{m}$ )
耳石总长 TSL	1 220.65	745.98	1 143.45	642.68
最大宽度 MW	752.21	351.04	670.96	349.49
背区长 DDL	459.92	151.31	467.97	144.78
背侧区长 DLL	741.04	381.18	727.13	287.61
侧区长 LDL	938.75	489.87	938.75	455.26
吻侧区长 RLL	908.37	415.15	882.54	316.47
吻区长 RL	397.19	72.19	365.41	71.43
吻区宽 RW	229.81	78.18	205.26	47.07
翼长 WL	979.81	528.21	942.16	451.19
翼宽 WW	404.13	101.04	404.13	85.49

## 2.3 群体鉴别

根据耳石微结构判读得到其日龄数据, 结合捕捞日期推算样本由秋季和冬季两个产卵群组成, 其中 2007 和 2008 年阿根廷滑柔鱼属于冬季产卵群体(6~7 月), 即布谊诺斯艾利斯-巴塔哥尼亚北部种群(BNS)(王尧耕

等 2005),而 2010 年样本则主要为秋季产卵群体(3~5 月),即南部巴塔哥尼亚种群(PS)(陆化杰等 2010)。

## 2.4 主成分分析

对耳石 10 项形态参数进行主成分分析(表 2),结果显示,样本第一、第二、第三、第四主成分解释形态参数的贡献率分别为 49.53%、24.14%、13.54%和 8.78%,累计贡献率约为 90.99%。

表 2 阿根廷滑柔鱼耳石 10 项形态参数 4 个主成分负荷值和贡献率  
Table 2 Loadings of four principal components for 10 morphometric parameters of *I. argentinus*

长度变量 Variables of statolith length	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
耳石总长 TSL	0.915	-0.047	-0.054	-0.104
最大宽度 MW	0.422	0.498	0.592	0.034
背区长 DDL	0.047	0.816	0.202	0.049
背侧区长 DLL	0.545	-0.392	0.598	0.013
侧区长 LDL	0.703	-0.297	0.273	-0.349
吻侧区长 RLL	0.579	0.408	-0.401	-0.363
吻区长 RL	0.683	0.137	-0.495	0.252
吻区宽 RW	0.573	-0.185	-0.135	0.636
翼长 WL	0.742	-0.132	-0.270	-0.260
翼宽 WW	0.681	0.136	0.175	0.271
贡献率 Contribution rate(%)	49.534	24.143	13.536	8.777
累积贡献率 Cumulative contribution rate(%)	44.534	73.677	87.212	90.989

从表 1 可以看出,第一主成分与反映耳石长度的 TSL、LDL、WL 等因子均呈较大的正相关,载荷系数均在 0.70 以上,因此,第一主成分可以被认为是耳石各区长度特征的代表;第二主成分与 TSL、DLL、LDL 及 WL 等反映耳石长度的因子均呈负相关,而与反映耳石宽度的 MW 和 DDL 呈正相关,且载荷系数大(与 DDL 载荷系数为 0.816),第三主成分与反映耳石宽度的 MW 呈较大正相关,而与反映耳石长度的 TSL、RLL、RL 和 WL 均呈负相关,第四主成分与反映耳石宽度的 RW 呈较大正相关,而与反映耳石长度的 TSL、LDL、RLL 和 WL 均呈负相关,因此第二、三、四主成分可以被认为是耳石各区度特征的代表。综上所述,本研究选取 TSL 作为耳石长度的表征指标,选取 MW 作为耳石宽度的表征指标。

## 2.5 外部形态参数与日龄的关系

协方差分析表明,2007、2008 年 TSL 与日龄之间的关系不存在显著性差异( $F = 0.797, P = 0.373 > 0.05$ ),而 2007 与 2010 年( $F = 28.97, P = 0.009 < 0.01$ )、2008 与 2010 年( $F = 8.732, P = 0.003 < 0.01$ )都存在极显著性差异,同时分析表明,2007( $F = 8.666, P = 0.074 > 0.05$ )、2008( $F = 0.365, P = 0.546 > 0.05$ )与 2010 年( $F = 0.491, P = 0.484 > 0.05$ )TSL 与年龄之间都不存在性别差异。对于 MW 与日龄的关系,也呈现类似的特性:2007 与 2008 年不存在显著性差异( $F = 1.715, P = 0.193 > 0.05$ )、2007 与 2010 年( $F = 184.393, P = 0.000 < 0.01$ )、2008 与 2010 年( $F = 283.346, P = 0.000 < 0.01$ )都存在极显著性差异,不同性别之间 2007 年( $F = 7.865, P = 0.093 > 0.05$ )、2008 年( $F = 0.086, P = 0.768 > 0.05$ )与 2010 年( $F = 0.055, P = 0.813 > 0.05$ )也都不存在性别间的差异。因此,将 2007、2008 年样本合并,而将 2010 年样本独立并不分性别研究 TSL 和 MW 的生长,即分冬季产卵群体和春季产卵群体研究 TSL 和 MW 的生长。通过方程的拟合、最大似然法则的优化及 AIC 的比较(表 3),得到 TSL 和 MW 的最适生长方程分别如下:

冬季产卵群:

$$TSL = 2.7048 \times Age + 176.5511 \quad (R^2 = 0.6145, n = 262) \text{ (图 4a)}$$

$$MW = 1.8493 \times Age - 24.4586 \quad (R^2 = 0.6843, n = 262) \text{ (图 4b)}$$

秋季产卵群:

$$TSL = 659.8731 \times \ln(Age) - 2819.1 \quad (R^2 = 0.8285, n = 229) \text{ (图 4a)}$$

$$MW = 417.4082 \times \ln(Age) - 1778.8 \quad (R^2 = 0.5462, n = 229) \text{ (图 4b)}$$

表 3 阿根廷滑柔鱼耳石总长及最大宽度生长模型的参数与 AIC 值比较

Table 3 Comparison of parameters and AIC for TSL and MW growth models of *I. argentinus*

产卵群 Spawning cohort	模型 Model	$L_{\infty}$	a/K	b/ $t_0$	AIC	$r^2$	
耳石总长 TSL	线性 Line	/	2.7048	176.5511	2337.582	0.6145	
	冬季产卵群 Winter cohort	幂函数 Power	/	8.4501	0.835	2341.036	0.5954
	指数 Exponential	/	427.815	0.0028	2345.879	0.5873	
	对数 Logarithm Logistic	/	775.0059	-3428.2	2338.183	0.6001	
	秋季产卵群 Autumn cohort	线性 Line	3818.2793	0.0001	7733.766	4782.647	0.5453
	幂函数 Power	/	2.2632	259.6908	1967.329	0.8206	
	指数 Exponential	/	13.0784	0.7494	1964.905	0.8227	
	对数 Logarithm Logistic	/	463.0103	0.0023	1976.875	0.8121	
最大宽度 MW	冬季产卵群 Winter cohort	线性 Line	7124.7992	0.0014	1634.077	3942.658	0.4332
	幂函数 Power	/	1.8943	-24.4586	2072.345	0.6843	
	指数 Exponential	/	1.3845	-24.4586	2072.443	0.6842	
	对数 Logarithm Logistic	/	185.927	0.0036	2078.526	0.6763	
	秋季产卵群 Autumn cohort	线性 Line	5643.1925	0.0039	871.0234	3814.679	0.6777
	幂函数 Power	/	1.0971	271.938	1876.971	0.4981	
	指数 Exponential	/	8.5465	0.745	1819.641	0.5322	
	对数 Logarithm Logistic	/	298.309	0.0023	1831.005	0.5055	
		7462.3918	0.0038	940.5614	3513.274	0.4768	

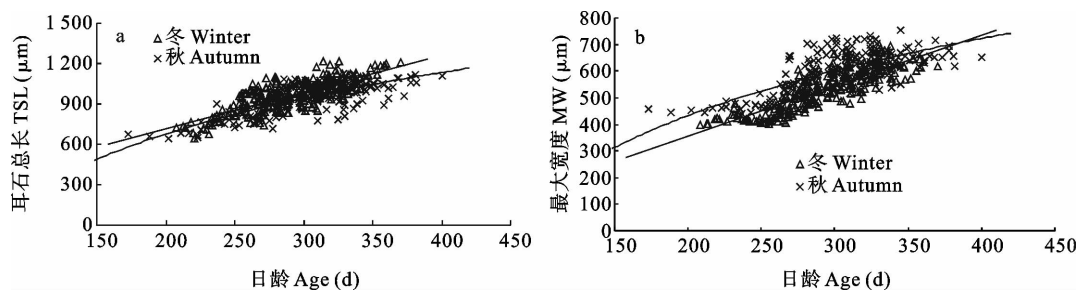


图 4 阿根廷滑柔鱼日龄与外形参数的关系

Fig. 4 Relationship between age and morphometric parameters for *I. argentinus*

## 2.6 耳石重量与日龄的关系

协方差分析表明,2007、2008 年 SW 与日龄之间的关系不存在显著性差异( $F = 12.149, P = 0.0715$ )

0.05),而2007与2010年( $F = 48.30, P = 0.000 < 0.01$ )、2008与2010年( $F = 162.15, P = 0.000 < 0.01$ )间都存在极显著性差异,同时分析表明,2007( $F = 5.002, P = 0.027 < 0.05$ )、2008( $F = 0.283, P = 0.015 < 0.05$ )与2010年( $F = 4.349, P = 0.038 < 0.05$ )SW与年龄之间都存在性别差异。因此,区分不同群体和不同性别研究SW的生长。通过方程的拟合、最大似然法则的优化及AIC的比较(表4),得到SW最适生长方程如下:

冬季产卵群:

雌性:  $SW = 0.0389Age^{1.5437}$  ( $R^2 = 0.5554, n = 153$ )(图5)

雄性:  $SW = 69.7387 \times e^{0.0037Age}$  ( $R^2 = 0.6391, n = 109$ )(图5)

表4 阿根廷滑柔鱼耳石重量生长模型的参数与AIC值比较

Table 4 Comparison of parameters and AIC for SW models of *I. argentinus*

产卵群 Spawning cohort	模型 Model	$L_{\infty}$	a/K	b/ $t_0$	AIC	$r^2$	
雌性 Females	冬季产卵群 Winter cohort	线性 Line	/	1.3136	-133.579	2005.89	0.5541
		幂函数 Power	/	0.0389	1.5437	2005.197	0.5554
		指数 Exponential	/	52.5362	0.0052	2005.538	0.5548
		对数 Logarithm Logistic	/	372.6796	-1863.3	2009.281	0.5478
	秋季产卵群 Autumn cohort	线性 Line	7580.6608	0.0047	997.4858	3780.446	0.5463
		幂函数 Power	/	0.7597	-12.0269	796.7322	0.6295
		指数 Exponential	/	0.6198	1.0261	796.7789	0.6293
		对数 Logarithm	/	69.7387	0.0037	793.9182	0.6391
雄性 Males	冬季产卵群 Winter cohort	Logistic	7697.522	0.0304	542.1207	2305.714	0.5744
		线性 Line	/	1.4473	-170.79	797.1349	0.6584
		幂函数 Power	/	0.0231	1.637	794.6678	0.6428
		指数 Exponential	/	44.0164	0.0059	791.0025	0.6789
	秋季产卵群 Autumn cohort	对数 Logarithm Logistic	/	405.839	-2049.7	803.0361	0.6374
		线性 Line	7688.9154	0.0061	848.7631	1443.045	0.6785
		幂函数 Power	/	1.043	-103.7	710.7279	0.6852
		指数 Exponential	/	0.0425	1.4903	644.1741	0.6881
秋季产卵群 Autumn cohort	对数 Logarithm Logistic	/	460.6875	-2424.58	521.2801	0.7158	
	线性 Line	7688.7446	0.0061	885.9165	1710.079	0.5891	
	幂函数 Power	/	0.0425	1.4903	644.1741	0.6881	
	指数 Exponential	/	32.3787	0.0061	618.0574	0.7091	

秋季产卵群:

雌性:  $SW = 44.0164 \times e^{0.0059Age}$  ( $R^2 = 0.6789, n = 121$ )(图5)

2.7 生长率

研究表明,冬季产卵群和秋季产卵群TSL的绝对生长率都随着日龄的增加而呈现先增加、后减小的趋势,并都在241~270d达到峰值(分别为5.329和5.151  $\mu\text{m/d}$ );MW也呈现先增加、后减小的趋势,但峰值都出现在271~300d(分别为2.695和2.167  $\mu\text{m/d}$ )(图6a)。冬季产卵群和秋季产卵群TSL的相对生长率也随着日

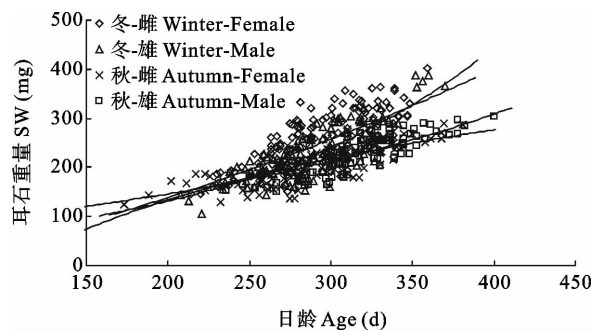


图5 阿根廷滑柔鱼日龄与耳石重量的关系  
Fig. 5 Relationship between age and statolith weight for *I. argentinus*



龄的增加而呈现先增加、后减小的趋势,峰值分别都出现在241~270 d(分别为19.395和19.148%/d);MW也呈现先增加、后减小的趋势,但峰值都出现在271~300 d(11.628和10.986%/d)(图6b)。分析表明,同一日龄段内冬季产卵群的TSL和MW,无论是其相对和绝对生长率都比对应的秋季产卵群大。

研究表明,冬季产卵群雌、雄个体SW的绝对生长率随着日龄的增加而增加,高峰值分别为1.588和1.366 mg/d,都出现在330~360d;秋季产卵群雌性个体SW的绝对生长率随着日龄的增加而增加,高峰值(1.919 mg/d)出现在301~330d,而雄性个体SW的绝对生长率随着日龄的增加而呈现先增加、后减小的趋势,高峰值(0.641 mg/d)出现在271~300d(图7a)。冬季产卵群雌、雄个体SW的相对生长率都随着日龄的增加呈现先增加、后减小的趋势,高峰值分别为19.78和19.908%/d,都出现在241~270d;秋季产卵群雌、雄个体SW的相对生长率都随着日龄的增加呈现先增加、后减小的趋势,高峰值10.172、28.577%/d分别出现在271~300和241~270d。就总体而言,无论是冬季产卵群还是春季产卵群,SW的绝对生长率基本都随着年龄的增加而增加,相对生长率则随着年龄的增加而呈现先增加、后减小的趋势;同一日龄段内,冬季产卵群SW的相对和绝对生长率略大于秋季产卵群,雌性个体SW的相对生长率和绝对生长率基本都大于雄性。

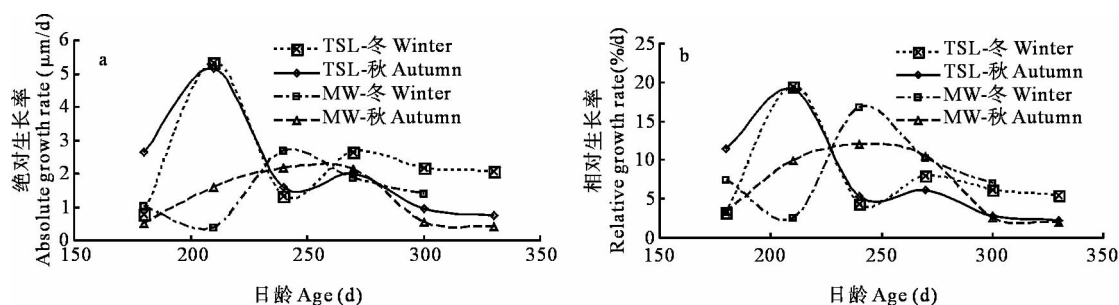


图6 阿根廷滑柔鱼耳石长度生长率与日龄的关系

Fig. 6 Relationships between growth rate of statolith length and age for *I. argentinus*

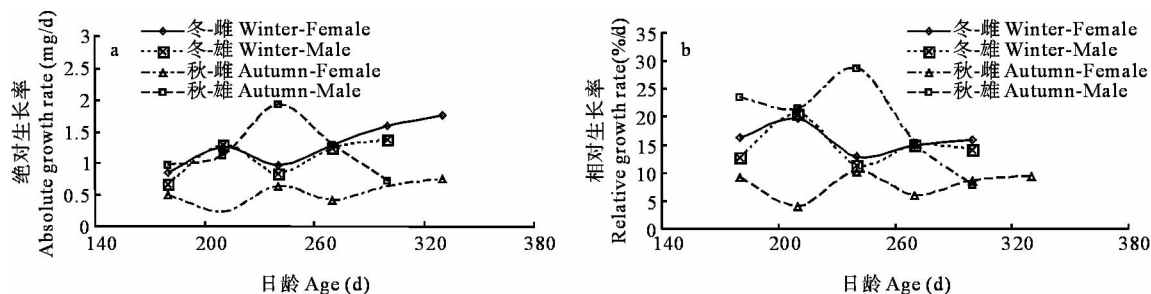


图7 阿根廷滑柔鱼耳石重量生长率与日龄的关系

Fig. 7 Relationships between growth rate of SW and age for *I. argentinus*

### 3 讨论

#### 3.1 耳石微结构

同大多数柔鱼科的种类类似(刘必林 2006; 陆化杰 2009),阿根廷滑柔鱼耳石生长纹由明暗相间的轮纹组成,起始点呈水滴形状,按照轮纹宽度及明暗程度可以分为核心区(Postnuclear, P)、暗区(Dark Zone, DZ)和外围区(Peripheral Zone, PZ)。阿根廷滑柔鱼耳石微结构从核心开始到后核心区,轮纹比较细密、彼此间隔比较窄,轮纹数为45~70,而此阶段为未成熟的仔稚鱼生长阶段,这说明在该阶段耳石生长比较迅速;从后核心区以后,轮纹宽度较大,说明这个阶段耳石生长速度放慢。

### 3.2 耳石生长

研究表明, TSL 和 MW 可以分别作为耳石长度和宽度的表征因子, 代表耳石外形的生长, 并且其生长不存在性别间的差异, 这与其他学者对同属于滑柔鱼亚属的科氏滑柔鱼 *Illex coindetii* 的研究结果相同 (Gonzalez *et al.* 1996)。冬季产卵群 TSL 和 MW 的生长都最适合用线性方程表示, 这与陆化杰等 (2011) 对同属于柔鱼科的茎柔鱼耳石 MW 的生长特性的研究结果相同。而对于秋季产卵群, TSL 和 MW 则都最适合用对数函数表示。SW 的生长, 均既存在群体间的差异又存在性别间的差异, 其中冬季产卵群雌、雄个体 SW 的生长分别最适合用幂函数和指数函数表示, 秋季产卵群则分别最适合用指数函数和对数函数表示。不同群体间 TSL 和 MW 生长的差异性, 可能与其生长过程中经历不同生活环境有关 (Villanueva 2000)。而 SW 生长存在的群体和性别差异, 既可能和不同的生活环境有关, 也可能和雌、雄个体不同的生长速度有关, 通常阿根廷滑柔鱼雌性个体生长的确存在性别间差异 (Arkhipkin 1993; Hatanaka 1994)。

### 3.3 耳石生长率

研究表明, 阿根廷滑柔鱼冬季产卵群和秋季产卵群 TSL 和 WM 的绝对和相对生长率都随日龄的增加而增加, 达到一个峰值以后再减小。陆化杰等 (2011) 通过对同属于柔鱼科的智利外海茎柔鱼耳石 TSL 和 MW 的研究也发现相同的规律。这种现象可能和阿根廷滑柔鱼不同的日龄段本身的生长特性有关。通常在生命早期阶段, 阿根廷滑柔鱼生长速度快, 而性成熟以后速度会减慢 (Arkhipkin 1993)。SW 的绝对生长率随着日龄的增加而增加, 相对生长率则随着日龄的增加先增加、后减小, 同一日龄段内, 冬季产卵群的绝对和相对生长率基本大于秋季产卵群, 雌性个体的绝对和相对生长率基本大于雄性个体。这种变化也基本对应了其本身的生长特点, 通常认为, 阿根廷滑柔鱼雌性个体生长速度大于雄性的生长速度 (Arkhipkin 1993), 且不同群体 (Uozumi *et al.* 1993; Rodhouse *et al.* 1990b)、不同孵化时间 (Arkhipkin *et al.* 1991)、不同生长海域之间 (Arkhipkin 1993; Rodhouse *et al.* 1990), 阿根廷滑柔鱼的生长存在着某些变化。

由于本研究样本采集方式为鱿钓作业, 受渔具、渔法的限制, 难免会对样本个体大小的随机性造成一定的影响, 因此, 还需要在今后的研究中加以补充和完善。

**致谢:** 本研究得到国家远洋渔业工程技术研究中心和农业部大洋渔业资源环境科学观测实验站的资助。

## 参 考 文 献

- 王尧耕, 陈新军. 2005. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业. 北京: 海洋出版社, 190~194
- 刘必林, 陈新军, 陆化杰, 马 金. 2011. 头足类耳石. 北京: 科学出版社, 91~111
- 刘必林. 2006. 利用耳石微结构研究印度洋西北海域鳶鸟贼的年龄和生长. 见: 上海水产大学硕士研究生学位论文
- 陈新军, 刘金立. 2004. 巴塔哥尼亚大陆架海域阿根廷滑柔鱼渔场分布与表温的关系研究. 海洋水产研究, 25(6): 19~24
- 陈新军, 刘必林, 王跃中. 2005. 2000年西南大西洋阿根廷滑柔鱼产量分步及其与表温关系的初步研究. 湛江海洋大学学报, 25(1): 29~34
- 陆化杰, 陈新军. 2008. 2006年西南大西洋鱿钓渔场与表温和海面距平值的关系. 大连水产学院学报, 23(3): 230~234
- 陆化杰. 2009. 利用耳石微结构研究智利外海茎柔鱼的年龄、生长和种群结构. 见: 上海海洋大学硕士研究生学位论文
- 陆化杰, 陈新军, 刘必林, 龚彩霞. 2010. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔业生物学研究进展. 广东海洋大学学报, 30(4): 91~98
- 陆化杰. 2011
- Arkhipkin, A. 1990. Age and growth of the squid (*Illex argentinus*). Frente Mar Timo, 6(A): 25~35
- Arkhipkin, A., and Scherbich, Z. N. 1991. Intraspecific growth and structure of the squid, *Illex argentinus* (Ommastrephidae) in winter and spring in the Southwestern Atlantic. Scientia Marina, 55(4): 619~627
- Arkhipkin, A. 1993. Age, growth, stock structure and migratory rate of pre-spawning short-finned squid *Illex argentinus* based on statolith aging investigations. Fisheries Research, 16(4): 313~338
- Arkhipkin, A., and Laptikhovskiy, V. 1994. Seasonal and interannual variability in growth and maturation of winterspawning *Illex argentinus* (Cephalopoda, Ommastrephidae) in the Southwest Atlantic. Aquatic Living Resources, 7(4): 221~232
- Arkhipkin, A I. 2005. Statoliths as black boxes' (life recorders) in squid. Mar. Freshwater Research, 56(5): 573~583
- Basson, M., Beddinton, J. R., Crombille, J. A., Holden, S. J., Purchase, L. V., and Tingley, G. A. 1996. Assessment and management of annual squid stocks: the *Illex argentinus* fishery in the Southwest Atlantic as an example. Fisheries Research, 28(1): 3~29

- Buckland, S. T., Anderson, D. R., Burnham K. P., and Laake, J. L. 1993. Distance sampling: estimating abundance of biological populations. *Biometrics*, 49(3): 414~423
- Cerrato, R. M. 1990. Interpretable statistical tests for growth comparisons using parameters in the von Bertalanffy equation. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47(7): 1416~1426
- Chen, X. J., Liu, B. L., and Chen, Y. 2008. A review of the development of Chinese distant-water squid jigging fisheries. *Fisheries Research*, 89(3): 211~221
- Chen, X. J., Lu, H. J., Liu, B. L., and Chen, Y. 2010. Age, growth and population structure of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas*, based on statolith microstructure off the EEZ of Chilean waters. *Journal of Marine Biology Association of the UK*, 91(1): 229~235
- Csirke, J. 1987. The Patagonian fishery resources and the offshore fisheries in the South-West Atlantic. *FAO Fisheries Technical Paper*, 286: 83
- González, A. F., Castro B. G., and Angel, G. 1996. Age and growth of the short-finned squid *Illex coindetii* in Galician waters (NW Spain) based on statolith analysis. *Journal of Marine Science*, 53(5): 802~810
- Hatanaka, H. 1986. Growth and life span of short-finned squid, *Illex argentinus*, in the waters off Argentina. *Bulletin of the Japanese Society for the Science of Fish*, 52: 11~17
- Hiramatsu, K. 1993. Application of maximum likelihood method and AIC to fish population dynamics. In: Matsumiya, Y. (ed). *Fish Population Dynamics and Statistical Models*. Koseisha Koseikaku, Tokyo, 9~21 (in Japanese)
- Imai, C., Sakai, H., and Katsura, K. 2002. Growth model for the endangered cyprinid fish *Tribolodon nakamurai* based on otolith analyses. *Fisheries Science*, 68(4): 843~848
- Jackson, G. D. 1994. Application and future potential of statolith increment analysis in squid and sepoids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51(11): 612~625
- Malcolm, H. 2001. *Modeling and quantitative methods in fisheries*. Florida: CHAPMAN & HALL/CRC, 227~232
- Radtke, R. L. 1983. Chemical and structural characteristics of statoliths from the short-finned squid *Illex illecebrosus*. *Marine Biology*, 76(1): 47~54
- Rodhouse, P. G., and Hatfield, E. M. C. 1990a. Age determination in squid using statolith growth increments. *Fisheries Research*, 8(4): 323~334.
- Rodhouse, P. G., and Hatfield, E. M. C. 1990b. Dynamics of growth and maturation in the Cephalopod *Illex argentinus* de Castellanos, 1960 (Teuthoidea: Ommastrephidae). *Biological Sciences*, 329(1254): 229~241
- Uozumi, T., and Shiba, C. 1993. Growth and age composition of *Illex argentinus* (Cephalopoda: Oegopsida) based on daily increment counts in statoliths. *Fisheries Research*, 16: 313~338
- Villanueva, R. 2000. Effect of temperature on statolith growth of the European squid *Loligo vulgaris* during early life. *Marine Biology*, 136(3): 449~460