

文章编号: 1674 - 5566(2012)05 - 0884 - 08

马绍尔群岛海域大眼金枪鱼耳石形态

宋利明^{1,2,3}, 吕凯凯², 杨嘉樑², 胡振新²

(1. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 3. 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)

摘要: 耳石是鱼类生态的重要信息载体。根据 2009 年 11 月 - 2010 年 1 月马绍尔群岛海域采集的大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 样本中获得的 222 对矢耳石, 对其形态特征进行观察和测量。观察发现, 矢耳石上有 3 条凹沟, 可将矢耳石分为背区、翼区、吻区和侧区 4 个区。t 检验表明, 左右矢耳石形态参数无显著性差异 ($P = 0.999$)。对矢耳石 12 个形态参数作主成分分析, 结果显示, 背区长 (DL)、翼区前长 (WFL)、翼区长 (WL) 和最大厚度 (MST) 可以代表矢耳石尺度特征, 背区夹角 (DA) 和翼区夹角 (WA) 代表矢耳石角度特征。DL 与 MST 的关系可用指数表达, 叉长 (FL) 与 DL 间可用多项式表达, 叉长与 WFL 和矢耳石重量 (OW) 间可用逻辑斯蒂克模型表达。随叉长增加, 矢耳石核心向背区、侧区和吻区方向移动。对不同 DL 组的 DA 进行多重比较分析, 发现 DA 在 DL 为 500 ~ 700 μm 间出现生长波动, 结合 FL 与 DL 之间关系, 认为大眼金枪鱼初次性成熟时 DL 为 600 μm 左右, 叉长在 80 ~ 130 cm 之间。

研究亮点: 首次研究大眼金枪鱼矢耳石的形态特征以及叉长与其主要形态参数间的关系。左右矢耳石形态无显著性差异, 背区长、翼区前长、翼区长、最大厚度、背区夹角和翼区夹角等 6 个参数可表征其形态。大眼金枪鱼初次性成熟时矢耳石背区长约为 600 μm , 叉长为 80 ~ 130 cm。

关键词: 大眼金枪鱼; 耳石; 形态; 马绍尔群岛

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

耳石是一种主要由碳酸钙等组成的矿化组织, 其形态比骨骼更为稳定^[1]。研究表明, 鱼类耳石形态具有高度的物种特异性, 在鱼类系统分类上有重要应用价值^[2-5]。鱼类耳石随鱼体生长, 在鱼类物种外部形态特征的发育、变态和稳定成型过程中, 耳石亦经历了发生、成长和稳定的过程^[6]。大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 是一种重要的热带和亚热带鱼种, 广泛分布于太平洋、大西洋和印度洋^[7]。国内外学者利用金枪鱼类耳石对其年龄与生长^[8-9]、同位素标记^[10] 等进行了研究, 同时通过耳石化学元素^[11-14] 来鉴定金枪鱼类, 而对于大眼金枪鱼耳石方面的研究几乎全部集中在年龄生长方面^[15-18], 其中 STEQUERT 和 CONAND 得出大眼金枪鱼耳石长短臂与大眼

金枪鱼叉长的关系^[16]。许多文献在没有对大眼金枪鱼左右矢耳石的形态特征进行比较的前提下, 就认为左右矢耳石的形态特征无显著性差异^[16, 19-20]。本文通过观测大眼金枪鱼矢耳石的形态特征参数, 对比左右矢耳石的形态特征, 分析大眼金枪鱼矢耳石形态特征参数之间的关系以及主要形态特征参数与叉长之间的关系, 为今后进一步研究其形态特征和种群鉴定作参考。

1 材料与方法

1.1 材料来源

2009 年 11 月 20 日 - 2010 年 1 月 5 日在深圳市联成远洋渔业有限公司所属的马绍尔群岛基地, 随机取样 1 489 尾大眼金枪鱼, 用卡尺测定

收稿日期: 2012-04-24 修回日期: 2012-06-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2012AA092302); 农业部远洋渔业探捕项目 (D8006090066); 上海市教育委员会科研创新项目 (12ZZ168); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20113104110004)

作者简介: 宋利明 (1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为金枪鱼渔业、深海底层延绳钓渔业和网箱养殖工程。E-mail: lmsong@shou.edu.cn

其叉长(精确到 0.1 cm),叉长范围为 43.0 ~ 188.0 cm,其叉长主要分布在 100.0 ~ 145.0 cm

(图 1),记录了其捕获位置(图 2),并取得了 222 对矢耳石。

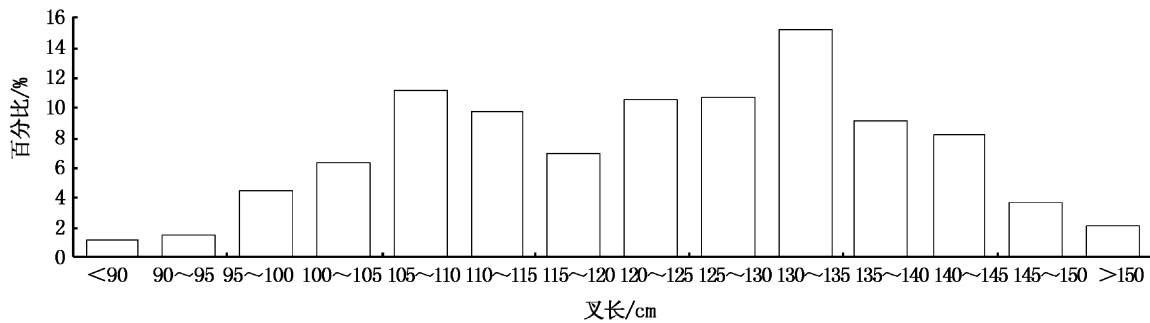


图 1 大眼金枪鱼叉长分布

Fig. 1 The fork length distribution of bigeye tuna

1.2 研究方法

1.2.1 矢耳石采集和处理

根据 ICCAT 取样操作手册^[21]从大眼金枪鱼体内取得矢耳石,然后去除其表面的膜,用 95% 的乙醇浸泡 2 d。由于大眼金枪鱼矢耳石较大,矢耳石内部存在很多沟壑,用一般方法无法去除沟壑内已凝固的血污等,需将矢耳石浸入次氯酸钙溶液(漂白粉即可)12 h,使得整个矢耳石干净透白,利于外形拍摄,再用 95% 的乙醇清洗两次后干燥备用。

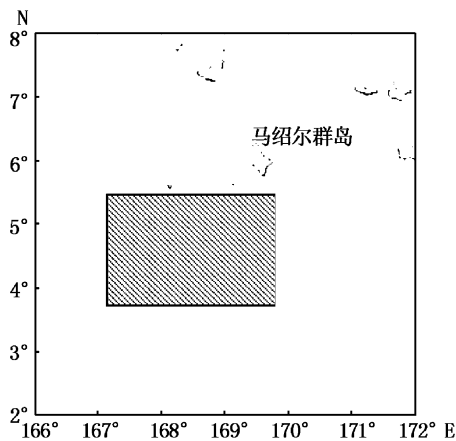


图 2 样本捕获区域

Fig. 2 Sample area of bigeye tuna

1.2.2 耳石测量

使用 Nikon ZOOM645S 体式显微镜对 222 对矢耳石进行投影拍摄,得到矢耳石的正面和侧面图。根据前人研究^[22-24],对大眼金枪鱼矢耳石进行各区划分,由于其矢耳石是狭长形,吻区和

侧区非常薄,易折,采集回来的矢耳石大部分吻区和侧区有不同程度的破损,为了不影响测量结果,舍弃对吻区和侧区的测量统计,故主要测量背区和翼区。利用 Image-Pro plus version 3.1 影像分析软件观察矢耳石外形特征,初步选定需测量的外形特征,再用 t 检验分析相关性,最终通过相关性选定翼区长(wing length, WL)、最大宽度(maximum statolith width, MSW)、翼区前长(wing front length, WFL)、翼区后长(wing back length, WBL)、背区长(dorsal length, DL)、背区前长(dorsal front length, DFL)、背区后长(dorsal back length, DBL)、背区基线宽(dorsal baseline width, DBLW)、背区基线长(dorsal baseline length, DBLL)、翼区夹角(wing angle, WA)、背区夹角(dorsal angle, DA)和最大厚度(maximum statolith thickness, MST)等 12 项形态参数(图 3),精确至 0.1 μm ,角度精确至 0.1 度,并且以翼区长为矢耳石形态参数整体标志。使用分析天平(梅特勒 AL104)对左、右两耳石进行称重,获得耳石重(weight of sagittal otolith, OW),精确到 1 mg^[25]。测量由 2 人独立进行,若两者测量的误差超过 5%,则重新测量,若仍超过 5%,则取其平均值^[26]。

1.3 数据处理

由于矢耳石形态包括长度和角度等不同量纲数据,因此需要对其数据进行标准化处理^[27]。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (1)$$

式中: \bar{x}_j 为样本平均值; s_j 为样本标准差。通过标

准化处理,每列数据的平均值为 0,方差为 1。

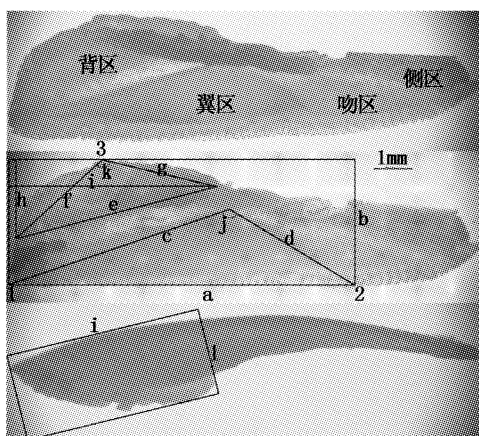


图 3 大眼金枪鱼 ($F_L = 106$ cm) 矢耳石形态和测量参数示意图

Fig. 3 Schema of sagittal otolith domes of bigeye tuna ($F_L = 106$ cm) and morphologic parameters

a. WL; b. MSW; c. WFL; d. WBL; e. DL; f. DFL; g. DBL; h. DBLW; i. DBLL; j. WA; k. DA; l. MST。

采用成对数据 t 检验方法^[24] 比较左右矢耳石各形态参数间差异。

采用主成分分析^[24] 分析矢耳石各形态参数权重系数及贡献率。

采用典型相关分析^[28] 分析矢耳石各形态参数间的相关关系,分析叉长与矢耳石重量、各形态参数的关系。

采用线性、指数、多项式、幂函数和逻辑斯蒂克模型^[29-31] 拟合 DL 与 MST 的关系,并采用 akaike information criterion (AIC)^[32] 判别最佳模型。

采用线性、对数、指数、多项式、幂函数和逻辑斯蒂克模型^[29-31] 拟合叉长与 OW、DL 和 WFL 的关系,并采用 AIC^[32] 判别最佳模型。

采用完全随机方差分析、多重比较(LSD 法)理论^[33-34],分析不同生长阶段 DL 与 DA 的关系。

2 结果

2.1 耳石形态

2.1.1 耳石形态特征

观测图 3 中耳石各部分形态参数发现,无论从正面还是从侧面看,大眼金枪鱼矢耳石都是弯曲的,呈瓦状;矢耳石上有 3 条凹陷沟,三线相交为一点(为矢耳石核心),将整个矢耳石分成背区、翼区、吻区和侧区四部分,其中背区和翼区交

界上的狭长凹陷比较明显,翼区和吻区交界线会出现缺失,并不能贯穿整个交界面,而吻区和侧区的交界线最为模糊,在凹陷周围有大量的结晶;背区呈隆起的圆顶状,上面布满大小不一的突起,在背区后侧出现一最高的犄角,此处厚度最大;翼区为最平滑处,整个翼区为一个规则的三角形;吻区所在处最薄,容易在吻区和翼区交界处发生断裂;侧区是从最厚处开始一直延伸至尾端,呈狭长的山脊状。

对各形态参数标准化后,发现左、右矢耳石整体没有显著性差异(卡方值 = 0.762, $P = 0.9999$)。通过对各形态参数差异性检验(表 1),左右矢耳石间也未出现显著性差异,所以主成分分析及矢耳石形态与个体生长关系分析都采用左矢耳石进行。

表 1 大眼金枪鱼矢耳石形态数据
Tab. 1 The morphological statistics of bigeye tuna sagittal otolith

形态参数	左耳石		右耳石		P
	最小	最大	最小	最大	
WL/ μm	491.1	1192.3	506.6	1092.9	0.81
WFL/ μm	342.4	865.7	390.2	835.7	0.87
WBL/ μm	190.7	636.8	177.9	437.5	0.93
DL/ μm	279.6	761.4	276.0	761.4	0.82
DFL/ μm	188.6	502.3	195.6	502.1	0.43
DBL/ μm	143.6	379.9	128.0	370.6	0.71
DBLL/ μm	125.9	733.1	261.5	733.2	0.83
DBLW/ μm	142.1	389.3	143.6	342.9	0.65
MSW/ μm	237.8	476.7	223.9	469.5	0.34
MST/ μm	133.6	324.4	135.2	326.6	0.83
WA/ $^{\circ}$	106.7	143.7	106.6	133.3	0.99
DA/ $^{\circ}$	107.2	134.5	106.2	140.1	0.88

2.1.2 主成分分析

由主成分分析可知,第一、第二、第三和第四主成分解释形态参数的贡献率分别为 53.54%、13.55%、9.44% 和 6.25%,累计贡献率为 82.78%。从表 2 中可以看出,第一主成分和形态参数 DL、WFL 和 WL 有较大的相关性,且载荷系数较大,分别为 0.38、0.36 和 0.35;第二主成分和形态参数 DA 有较大的相关性,且载荷系数最大,为 0.56;第三主成分和形态参数 WA 有较大的相关性,且载荷系数最大,为 0.71;第四主成分和形态参数 MST 有较大的相关性,且载荷系数最大,为 0.87。第一主成分的特征值为 6.42,它解释了总变化的 53.54%,第一主成分反映了耳石长度变化;第二、三主成分主要反映角度的变化,

表现为背区夹角和翼区夹角的大小;第四主成分表现为耳石整体最大厚度特征。因此,在左矢耳石的所有形态参数中,DL、WFL 和 WL 是长度参数,DA 和 WA 是角度参数,MST 是厚度参数。

表 2 大眼金枪鱼左矢耳石各形态参数权重系数及贡献率

Tab. 2 Weight coefficient and contribution rate of morphologic parameters of bigeye tuna left sagitta otolith

形态参数	主成分			
	1	2	3	4
WL/ μm	0.35	0.03	0.13	-0.16
WFL/ μm	0.36	0.09	-0.02	-0.04
WBL/ μm	0.22	-0.25	0.56	0.01
DL/ μm	0.38	0.16	-0.13	-0.08
DFL/ μm	0.34	-0.06	-0.18	0.01
DBL/ μm	0.32	0.09	0.00	-0.27
DBLL/ μm	0.34	0.27	-0.24	-0.11
DBLW/ μm	0.21	-0.54	0.19	-0.04
MSW/ μm	0.33	-0.31	-0.08	-0.04
MST/ μm	0.22	-0.07	0.09	0.87
WA/($^{\circ}$)	-0.03	0.34	0.71	-0.17
DA/($^{\circ}$)	0.15	0.56	0.10	0.29
特征值	6.42	1.63	1.13	0.75
贡献率/%	53.54	13.55	9.44	6.25
累计贡献率/%	53.54	67.09	76.53	82.78

表 3 矢耳石背区长与耳石各部分参数与其比值的相关系数

Tab. 3 The correlation coefficient between the sagittal otolith total length and the ratios of the sagittal otolith morphologic parameters to the sagittal otolith total length

	WL/DL	WFL/DL	WBL/DL	DFL/DL	DBL/DL	DBLL/DL	DBLW/DL	MSW/DL	MST/DL	WA/DL	DA/DL
相关系数	0.78	0.87	0.37	0.88	0.81	0.96	0.37	0.71	0.44	-0.04	0.48

表 4 耳石 DL 与 MST 拟合结果

Tab. 4 The fitting results between DL and MST of the bigeye tuna sagittal otolith

	方程	AIC
线性	$M_{ST} = 0.200D_L + 189.072$	1 884.651
对数	$M_{ST} = 159.080 \ln D_L - 712.410$	1 888.650
指数	$M_{ST} = 222.400 \times \text{EXP}(5.613 \times 10^{-4} D_L)$	1 884.174
多项式	$M_{ST} = 4.179 \times 10^{-5} D_L^2 + 0.130 D_L + 217.600$	1 886.283
幂函数	$M_{ST} = 16.004 \times D_L^{0.462}$	1 886.130
逻辑斯蒂克	$M_{ST} = 956.859 / [1 + \text{EXP}(1.274 - 8.973 \times 10^{-4} D_L)]$	1 884.503

注:表中 M_{ST} 为最大厚度(MST); D_L 为背区长(DL)。

2.1.5 DL 与 DA 的关系

完全随机方差分析表明,DA 在不同 DL 组整体变化极显著(卡方值 = 22.173, $P = 0$)。对不同 DL 组的 DA 进行多重比较分析(表 5),由表 5 得,DL 在 300 ~ 400 μm 、400 ~ 500 μm 、500 ~ 600 μm 时 DA 为相同的生长模式,600 ~ 700 μm 、700 ~

2.1.3 矢耳石各形态参数间的相关关系

通过 DL 与矢耳石其它各部分参数与其比值进行相关分析可知(表 3),DL 与它们之间存在显著的相关关系(卡方值 = 1 226.90, $P = 0.000 1$),各典型变量得分为 0.998 4。其中,DL 与 WA/DL 存在负相关,与 WL/DL、WFL/DL、WBL/DL、DFL/DL、DBL/DL、DBLL/DL、DBLW/DL、MST/DL、MSW/DL、DA/DL 存在正相关,因此,耳石各部分生长模式为:耳石整体变化趋势相同,但是 WFL 的生长速度要大于 WBL 的生长速度,使得 WA 变小,DA 变大,耳石核心位置向吻侧区方向移动。

2.1.4 DL 与 MST 的关系

用线性、指数、多项式、幂函数、逻辑斯蒂克模型^[29-31]拟合左矢耳石背区长度 DL 与最大厚度 MST 关系,得出各关系式(表 4),6 种方法的 AIC 很相近,其中指数拟合方法 AIC 值最小,DL 与 MST 的关系可用指数表达(表 4)。随着背区长度的增长,矢耳石最大厚度也以一定的比例不断增加,MST 变化显著(卡方值 = 81.83, $p = 0.000 1$)。

800 μm 又为另一个生长模式,两模式间差异极显著(统计量 $F = 11.48^{**}$),说明 DA 在 DL 为 500 ~ 600 μm 和 600 ~ 700 μm 时变化有波动。

表 5 不同背区长与背区夹角的多重比较

Tab. 5 The multiple comparisons of DA among different DL groups

DL/ μm	400 ~ 500	500 ~ 600	600 ~ 700	700 ~ 800
300 ~ 400	3.7	7.09*	11.79**	10.89**
400 ~ 500		0.41	3.41	3.22
500 ~ 600			11.48**	3.56
600 ~ 700				0.27

注:*表示差异显著;**表示差异极显著。

2.2 叉长与矢耳石重量、各形态参数的关系

除翼区夹角(WA)外,FL 与矢耳石其它各形态参数均存在正相关(表 6),不同 FL 组与矢耳石各形态参数整体变化极显著($P < 0.01$),其中相关系数最高的为 OW、WFL 和 DL,均大于 0.75,其中与 OW 相关性最高,达到 0.91。选取这 3 个

参数与 FL 进行回归分析。用线性、对数、指数、多项式、幂函数和逻辑斯蒂克模型^[29-31] 拟合叉长与 OW、DL 和 WFL 的关系(表 7),由表 7 得出, OW 与叉长以多项式拟合方程的 AIC 值最小, DL、WFL 与叉长之间以逻辑斯蒂克模型拟合方程

的 AIC 值最小,因此,用多项式来表达 OW 与叉长之间的关系,用逻辑斯蒂克模型表达 DL、WFL 与叉长之间的关系最佳。随着叉长的增长,OW、DL 和 WFL 也不断变大(图 4)。

表 6 叉长与矢耳石形态参数典型相关分析

Tab. 6 The correlation analysis and significance test between FL and the sagittal otolith morphology parameters

	WL	WFL	WBL	DL	DFL	DBL	DBLL	DBLW	MSW	MST	WA	DA	OW
相关性	0.69	0.81	0.46	0.76	0.66	0.66	0.68	0.41	0.63	0.44	-0.06	0.39	0.91

表 7 叉长 FL 与矢耳石重 OW、背区长 DL 和翼区前长 WFL 的关系

Tab. 7 The fitting results between FL and OW, DL, and WFL of bigeye tuna otolith

	方程	AIC	
OW	线性	$O_W = 0.863F_L - 43.175$	963.035
	对数	$O_W = 81.661 \ln F_L - 329.735$	1361.808
	指数	$O_W = 9.637e^{0.015F_L}$	817.945
	多项式	$O_W = 3.299 \times 10^{-3} F_L^2 + 0.131F_L - 3.743$	-880.370
	幂函数	$O_W = 0.008F_L^{1.865}$	-427.739
	逻辑斯蒂克	$O_W = 81.832 / [1 + \text{EXP}(6.476 - 0.063F_L)]$	1217.482
	DL	线性	$D_L = 3.881F_L + 206.186$
对数		$D_L = 381.020 \ln F_L - 1148.450$	2135.035
指数		$D_L = 331.300e^{0.005F_L}$	2138.480
多项式		$D_L = -0.007F_L^2 + 5.492F_L + 120.486$	2119.707
幂函数		$D_L = 28.412F_L^{0.661}$	2118.501
逻辑斯蒂克		$D_L = 979.042 / [1 + \text{EXP}(1.388 - 0.018F_L)]$	2115.717
WFL		线性	$W_{FL} = 3.494F_L + 170.569$
	对数	$W_{FL} = 340.980 \ln F_L - 1039.720$	1932.615
	指数	$W_{FL} = 285.200e^{0.06F_L}$	1945.815
	多项式	$W_{FL} = -0.008F_L^2 + 5.167F_L + 82.384$	1919.259
	幂函数	$W_{FL} = 23.232F_L^{0.676}$	1917.752
	逻辑斯蒂克	$W_{FL} = 859.706 / [1 + \text{EXP}(1.429 - 0.019F_L)]$	1916.937

注:表中 O_W 为矢耳石重; F_L 为叉长; D_L 为背区长; W_{FL} 为翼区前长。

3 讨论

3.1 矢耳石各形态参数间的关系

马绍尔群岛海域大眼金枪鱼的左右矢耳石差异不显著,矢耳石各部分间未出现显著差异 ($P > 0.05$)。有关研究表明左右矢耳石形态未发现明显差异^[24,35-36],这与本文的研究结果一致。因此,可任意选用左右矢耳石进行形态学研究。主成分分析表明,矢耳石背区长(DL)、翼区前长(WFL)、翼区长(WL)和最大厚度(MST)可用来表征耳石的尺度变化,背区夹角(DA)和翼区夹角(WA)可用来表征矢耳石角度变化。这是由于随着矢耳石背区长的增加,矢耳石各部分尺度都相应变大,翼区前长变大较快,背区和翼区间的凹沟不断变长加深,背区夹角变大,翼区夹角变

小,矢耳石核心向吻侧区方向移动。因此,今后在研究矢耳石形态特征时,为了达到经济快速,可仅对背区长(DL)、翼区前长(WFL)、翼区长(WL)最大厚度(MST)、背区夹角(DA)和翼区夹角(WA)进行测定和分析。

本文认为大眼金枪鱼性成熟时 DL 为 600 μm 左右,DA 在 DL 为 500 ~ 700 μm 时变化有波动,DL 为 500 ~ 700 μm 时对应的大眼金枪鱼叉长为 76 ~ 127 cm 左右。FARLEY 等^[19]认为 50% 的雌性大眼金枪鱼性成熟叉长为 102 cm 左右;NOOTMORN^[37]观察发现东印度洋大眼金枪鱼在叉长为 85 cm 时出现性成熟个体;MOHRI 和 NISHIDA^[38]认为大眼金枪鱼的性成熟叉长在 80 cm 以上;CALKINS^[39]认为大眼金枪鱼的性成熟叉长为 100 ~ 130 cm,所以大眼金枪鱼初次性成

熟叉长在 80 ~ 130 cm 之间,这与本文得到的结论一致。

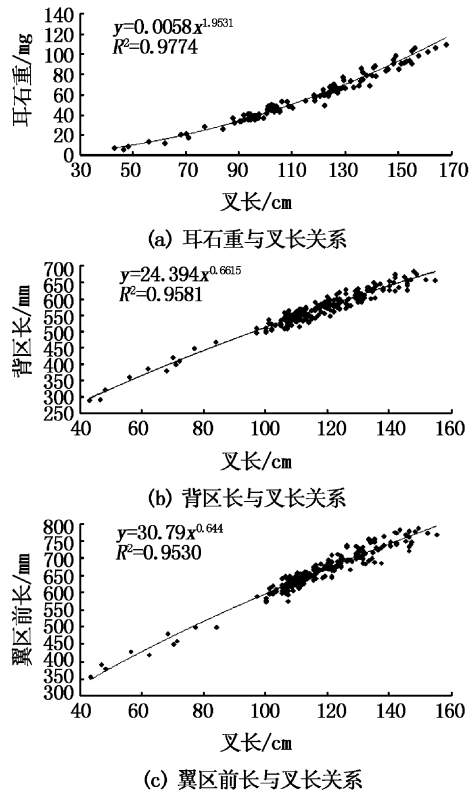


图 4 耳石重、背区长和翼区前长与叉长的关系
Fig. 4 The relationships between FL and OW, DL, and WFL

3.2 叉长与矢耳石形态参数的关系

叉长与矢耳石形态参数典型相关分析得出, WA 与叉长为负相关; OW、DL、WFL 与叉长相关系数最高,与叉长之间最佳的拟合关系都为幂函数。随着鱼体的成长,矢耳石重量、各部分长度都变大,背区夹角变大,翼区夹角减小,其中背区长和翼区前长的增长率在缓慢减小。因此,随着叉长增加,耳石整体变大,背区变长,背区前长到背区后长的坡度变缓,矢耳石核心随着 WFL 的变长向背区和侧区方向移动,这一结果与上面耳石各形态分析得到的结论一致。

DL 和 WFL 两者正好是背区与翼区间凹沟的两侧,这表明背区与翼区间的凹陷沟在大眼金枪鱼及其矢耳石生长过程中起到重要作用,因此,可用 DL 和 WFL 表征大眼金枪鱼矢耳石的尺度。ARKHIPKIN 和 BIZIKOV^[40]对头足类平衡囊做了研究,发现耳石吻区变化与头足类淋巴液流动和游泳加速度有关。大眼金枪鱼矢耳石中有 3 条

明显的凹沟,这可能是淋巴液等物质的流动渠道,需要通过同位素标记等方法进一步研究。

国内外很多学者^[41-43]认为不同性别、不同性成熟度的鱼体耳石是不同的,但本文的材料来源为马绍尔群岛的金枪鱼加工基地,所有上岸的大眼金枪鱼都已去掉内脏,无法判断其性别和成熟度等指标,同时延绳钓渔业上岸的大眼金枪鱼个体均比较大,缺少仔鱼。很多耳石在采集和运输过程中出现了吻区和侧区的破损,本文未作耳石面积^[44-45]与鱼体叉长关系的研究,另外,耳石重量可能偏轻,这些内容在今后的研究中要加以完善。

本研究得到了马绍尔群岛共和国政府的许可,并得到深圳市联成远洋渔业有限公司董事长周新东、总经理陈清白和基地经理朱永利等的大力支持,谨致谢意。

参考文献:

- [1] SMALE M, WATSON G, HECHT T. Otolith atlas of southern African marine fishes [M]. Grahamstown: JLB Smith Institute of Ichthyology, 1995:20-21.
- [2] CAMPANA S, CASSELMAN J. Stock discrimination using otolith shape analysis [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1993, 50(5):1062-1083.
- [3] BEGG G A, OVERHOLTZ W J, MUNROE N J. The use of internal otolith morphometrics for identification of haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) stocks on Georges Bank [J]. Fishery Bulletin, 2001, 99:1-14.
- [4] CARDINALE M, DOERING-ARJES P, KASTOWSKY M, et al. Effects of sex, stock, and environment on the shape of known-age Atlantic cod (*Gadus morhua*) otoliths [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2004, 61:158-167.
- [5] STRANSKY C, MURTA A G, SCHLICKEISEN J, et al. Otolith shape analysis as a tool for stock separation of horse mackerel (*Trachurus trachurus*) in the Northeast Atlantic and Mediterranean [J]. Fisheries Research, 2008, 89:159-166.
- [6] LONGMORE C, FOGARTY K, NEAT F, et al. A comparison of otolith microchemistry and otolith shape analysis for the study of spatial variation in a deep-sea teleost, *Coryphaenoides rupestris* [J]. Environmental Biology of Fishes, 2010, 89:591-605.
- [7] FONTENEAU A, ARIZ J, DELGADO A, et al. A comparison of bigeye (*Thunnus obesus*) stocks and fisheries in the Atlantic, Indian and Pacific Oceans [C]. ICCAT Collective Volumes of Scientific Paper, 2004, 57(2): 41-66.
- [8] ITOH T, SHIINA Y, TSUJI S, et al. Otolith daily increment

- formation in laboratory reared larval and juvenile bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) [J]. *Fisheries Science*, 2000, 66(5): 834–839.
- [9] FARLEY J H, GUNN J S. Historical changes in juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) growth rates based on otolith measurements [J]. *Journal of Fish Biology*, 2007, 71(3): 852–867.
- [10] ROOKER J, SECOR D, DEMETRIO G, et al. Evidence of trans-Atlantic movement and natal homing of bluefin tuna from stable isotopes in otoliths [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 368: 231–239.
- [11] PROCTOR C H, THRESHER R E, GUNN J S, et al. Stock structure of the southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii*: an investigation based on probe microanalysis of otolith composition [J]. *Marine Biology*, 1995, 122(4): 511–526.
- [12] SECOR D H, ZDANOWICZ V S. Otolith microconstituent analysis of juvenile bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) from the Mediterranean Sea and Pacific Ocean [J]. *Fisheries Research*, 1998, 36(2/3): 251–256.
- [13] ROOKER J, SECOR D, ZDANOWICZ V, et al. Discrimination of northern bluefin tuna from nursery areas in the Pacific Ocean using otolith chemistry [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 218: 275–282.
- [14] ROOKER J, SECOR D. Stock structure and mixing of Atlantic bluefin tuna: evidence from stable $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in otoliths [C]. ICCAT Collective Volumes of Scientific Paper, 2004, 56: 1115–1120.
- [15] LEHODEY P, HAMPTON J, LEROY B. Preliminary results on age and growth of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) from the western and central Pacific Ocean as indicated by daily growth increments and tagging data [R]. WCPO, Standing Committee on tuna and billfish, Working Paper, 1999, 2: 1–18.
- [16] STEQUERT B, CONAND F. Age and growth of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the western Indian Ocean [J]. *Cybiurn*, 2004, 28(2): 163–170.
- [17] HALLIER J, STEQUERT B, MAURY O, et al. Growth of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern Atlantic Ocean from tagging-recapture data and otolith readings [C]. ICCAT Collective Volumes of Scientific Paper, 2005, 57(1): 181–194.
- [18] 陈新军, 许柳雄, 宋利明, 等. 大西洋海域大眼金枪鱼年龄与生长的初步研究 [J]. *海洋渔业*, 2006, 28(1): 20–24.
- [19] FARLEY J, CLEAR N, LEROY B, et al. Age, growth and preliminary estimates of maturity of bigeye tuna, (*Thunnus obesus*), in the Australian region [J]. *Marine and freshwater Research*, 2006, 57(7): 713–724.
- [20] SCHAEFER K M, FULLER D W. Estimates of age and growth of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern Pacific Ocean, based on otolith increments and tagging data [R]. Inter-American tropical tuna commission, Bulletin, 2006, 23(2): 1–47.
- [21] VALEIRAS J, ABAD E. ICCAT Manual, Chapter 2, Description of Species [EB/OL]. [2010–7–20]. <http://www.iccat.int/en/ICCATManual.htm>.
- [22] 叶振江, 孟晓梦, 高天翔, 等. 两种花鲈 (*Lateolabrax* sp) 耳石形态的地理变异 [J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(4): 356–360.
- [23] 杨林林, 程家骅. 头足类耳石信息分析的研究进展 [J]. *南方水产*, 2009, 5(3): 74–80.
- [24] 郭弘艺, 魏凯, 唐文乔, 等. 基于矢耳石形态特征的中国鲭属鱼类种类识别 [J]. *动物分类学报*, 2010, 35(1): 127–134.
- [25] 邹莉瑾, 张敏, 邹晓荣, 等. 东南太平洋公海智利竹筴鱼年龄与生长研究 [J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(1): 61–67.
- [26] 马金, 陈新军, 刘必林, 等. 西北太平洋柔鱼耳石形态特征分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(2): 215–22.
- [27] 马立平. 统计数据标准化——无量纲化方法——现代统计分析方法的学与用 (三) [J]. *北京统计*, 2000, 11(3): 34–35.
- [28] 孙权森, 曾生根, 王平安, 等. 典型相关分析的理论及其在特征融合中的应用 [J]. *计算机学报*, 2005, 28(9): 1524–1533.
- [29] SCOTT G P, TURNER S C, CHURCHILL G B, et al. Indices of larval bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, abundance in the Gulf of Mexico; modeling variability in growth, mortality, and gear selectivity [J]. *Bulletin of Marine Science*, 1993, 53(2): 912–929.
- [30] FETSCH C R, WANG S, GU Y, et al. Spatial reference frames of visual, vestibular, and multimodal heading signals in the dorsal subdivision of the medial superior temporal area [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2007, 27(3): 700–712.
- [31] CHILTON D E, STOCKER M. A comparison of otolith and scale methods for aging Pacific herring [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1987, 7(2): 202–206.
- [32] SHONO H. Is model selection using Akaike's information criterion appropriate for catch per unit effort standardization in large samples [J]. *Fisheries Science*, 2005, 71: 978–986.
- [33] 贾涛, 陈新军, 李纲, 等. 哥斯达黎加外海茎柔鱼耳石形态学分析 [J]. *水产学报*, 2010, 34(11): 1744–1752.
- [34] 贾涛, 陈新军, 李纲, 等. 哥斯达黎加外海茎柔鱼个体与耳石间生长关系研究 [J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(3): 417–423.
- [35] 张晓霞, 叶振江, 王英俊, 等. 青岛海域小眼绿鳍鱼耳石形态的初步研究 [J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(4): 622–626.
- [36] 叶振江, 张弛, 王英俊, 等. 中国天竺鲷属鱼类的矢耳石形态特征 [J]. *海洋学报*, 2010, 32(5): 87–92.

- [37] NOOTMORN P. Reproductive biology of bigeye tuna in the Eastern Indian Ocean [C]. Indian Ocean tuna commission Proceedings, 2004, 7 : 1 - 5.
- [38] MOHRI M, NISHIDA T. Distribution of bigeye tuna and its relationship to the environmental conditions in the Indian Ocean based on the Japanese longline fisheries information [C]. Indian Ocean tuna commission Proceedings, 1999, 2 : 221 - 230.
- [39] CALKINS T P. Synopsis of biological data on the bigeye tuna (*Thunnus obesus*) (Love 1839), in the Pacific Ocean [R]. Inter-American tropical tuna commission, Special Report, 1980, 2: 213 - 260.
- [40] ARKHIPKIN A, BIZIKOV V. Role of the statolith in functioning of the acceleration receptor system in squids and sepioids [J]. Journal of Zoology, 2000, 250(1): 31 - 55.
- [41] SECOR D, PICCOLI P. Age-and sex-dependent migrations of striped bass in the Hudson River as determined by chemical microanalysis of otoliths [J]. Estuaries and Coasts, 1996, 19(4): 778 - 793.
- [42] WALKER S, MCCORMICK M. Otolith-check formation and accelerated growth associated with sex change in an annual protogynous tropical fish [J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 266: 201 - 212.
- [43] 陈新军, 马金, 刘必林, 等. 性成熟和个体大小对西北太平洋柔鱼耳石形态的影响 [J]. 水产学报, 2010, 34(6): 748 - 754.
- [44] 李育培, 刁晓明, 盛晓洒, 等. 嘉陵江瓦氏黄颡鱼耳石重量与年龄的关系 [J]. 淡水渔业, 2009, 38(2): 8 - 13.
- [45] 郭弘艺, 唐文乔, 魏凯, 等. 中国鲚属鱼类的矢耳石形态特征 [J]. 动物学杂志, 2007, 42(1): 39 - 47.

Morphology of bigeye tuna otolith in waters near Marshall Islands

SONG Li-ming^{1,2,3}, LÜ Kai-kai², YANG Jia-liang², HU Zhen-xin²

(1. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai 201306, China ; 2. College of Marine Sciences, 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)

Abstract: The otolith of fish is an important source of ecological information. It is a popular and successful tool in discriminating between and within fish stocks to study the morphologic characteristics of the otolith. A total of 222 pairs of sagittal otolith were collected randomly from Nov. 2009 through Jan. 2010 in waters near Marshall Islands. The morphologic characteristics of them were observed and measured. There were three channels on them which divide the sagittal otolith four areas (dorsum, wing, rostrum, and lateral). There was no significant difference between the morphological parameters of the left sagitta and the right sagitta ($P = 0.999$). The result of principal component analysis on 12 morphologic parameters showed the dorsal length (DL), wing front length (WFL), wing length (WL) and maximum statolith thickness (MST) can be used to represent the size features of the sagittal otolith; the dorsal angle (DA), and wing angle (WA) might reflect its angle features; these six parameters can be used to indicate the morphologic characteristics of the otolith. The optimum relationship between DL and MST was described by exponential function, the optimum relationship between fork length (FL) and DL was described by quadratic multinomial, while the optimum relationship between FL and weight of sagittal otolith (OW) was the logistic function. The sagittal otolith was growing and the core of sagittal otolith was shifting to the dorsum, rostrum, and lateral areas while the fork length was increasing. There was fluctuation for DA when the length of DL was between 500 μm and 700 μm by One-way random block design. The DL was about 600 μm and the forklength was about 80 - 130 cm while bigeye tuna was mature.

Key words: *Thunnus obesus*; otolith; morphology; Marshall Islands