

## 4 种鮠的星耳石形态度量学比较

谢桢桢 张化浩 胡良雄 张小谷

九江学院药学与生命科学学院, 九江 332000

**摘要** 对来自 9 个采样点的鮠属(*Culter*)翘嘴鮠(*C. alburnus*)、蒙古鮠(*C. mongolicus*)、达氏鮠(*C. dabryi*)和近红鮠属(*Ancherythroculter*)黑尾近红鮠(*A. nigrocauda*)共 810 尾个体星耳石的 8 个特征值进行形态度量,运用 Statistica 软件作鮠类鱼体生长与耳石生长的回归分析、形态特征值及 6 个形态因子和 6 个形态指数的多变量统计分析。结果显示:(1)4 种鮠耳石形态存在极显著差异。(2)幂函数回归方程相对于直线回归方程能更好地表述鮠体生长及耳石生长关系;鮠类体质量与耳石质量、体长与耳石直径的回归方程近于线性回归关系,体质量与耳石直径、与体长回归方程幂值分别近于 3.5、3,而耳石质量与耳石直径回归方程幂值近于 2。耳石质量增长速度与体质量增长速度相近,但耳石质量相对耳石长度的增长速度较体质量相对体长或耳石长度的增长速度要慢。(3)鮠耳石形态度量特征值判别函数分析判别正确率达 71.11%,对识别影响较大的特征值为耳石宽、耳石面积、耳石长、基叶长等;通过 4 种鮠耳石形态因子和形态指数的主成分分析,对识别影响较大的形态因子为  $F_2$ 、 $F_1$ 、 $F_6$ 、 $F_5$  和形态指数为形态系数、充实度、椭圆率等。(4)采用鮠类群体耳石形态度量特征值判别分析和聚类分析,均能较好地区分翘嘴鮠 3 个长江群体(太湖、鄱阳湖、丹江口水库)与漓江群体、蒙古鮠鄱阳湖 5 个群体(新妙湖、南北港、青岚湖、庐山西海、章江),其群体聚类距离与群体间的地理距离相关联。本研究结果说明,星耳石形态度量分析能为鮠类物种或群体间关联性分析提供依据。

**关键词** 鮠类;星耳石;形态度量;回归分析;多变量分析

中图分类号 Q 959.46<sup>+</sup>8 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2019)01-0082-09

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2019.01.012

鱼类耳石是硬骨鱼类在生长过程中内耳膜迷路内沉淀碳酸钙的矿质结石,包括矢耳石、星耳石、微耳石各 1 对,分别位于球状囊、瓶状囊、椭圆囊内,形成于胚胎发育听囊期后<sup>[1]</sup>,具有平衡和听觉的功能。1899 年 Reibisch<sup>[2]</sup>首先用耳石测定鳊(*Pleuroctes platessa*)的年龄,其后,人们开展了鱼体生长过程中耳石生长的研究<sup>[3-5]</sup>。鱼类耳石形态存在种间或群体间差异,其可作为物种、种群或生态型(ecotype)鉴定的工具<sup>[6-8]</sup>。鲤科鱼类星耳石由球文石晶体和有机基质构成,具有 5 级分级结构,组成和形态稳定<sup>[9]</sup>,是进行物种分类、年龄鉴定及生长特性研究的好材料。

鮠类是鲤科(Cyprinidae)鮠亚科(Cultrinae)的一个主要类群,分布于中国、越南、朝鲜、俄罗斯等国,在我国除青藏高原外的各地均有分布<sup>[10]</sup>。鮠类肉质鲜美,生活于流水或缓流水体的中上层,主要以小型鱼虾为食,是常见的肉食性鱼类,在淡水生态系

统中处于顶级消费者地位,通过营养串联效应有改善水质的作用,具有很大的生态学意义和经济价值。笔者以翘嘴鮠(*Culter alburnus*)、蒙古鮠(*C. mongolicus*)、达氏鮠(*C. dabryi*)、黑尾近红鮠(*Ancherythroculter nigrocauda*)的星耳石为材料,建立生长过程中体质量与体长、体质量或体长与耳石直径、耳石质量与耳石直径、耳石周长、耳石面积等关系模型,以期了解鲤科鱼类鱼体质量或长度与星耳石质量或长度的关联性及其星耳石质量与长度关联性,阐释回归方程的生物学意义;同时,统计分析鮠类种间及种群间星耳石形态差异,探讨星耳石作为微形态特征在鲤科鱼类物种分类、种群差异分析上的运用。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料

研究对象为 2012 年 11 月至 2014 年 12 月采集

收稿日期:2018-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31260632);江西省自然科学基金项目(20122BAB204018);江西省科技支撑计划重点项目(20152ACF60022)

谢桢桢,博士,讲师。研究方向:鱼类种质资源学。E-mail: 642559114@qq.com

通信作者:张小谷,博士,教授。研究方向:水产动物生物学与种质资源学。E-mail: zcj7820@163.com

于鄱阳湖、太湖、丹江口水库、漓江的翘嘴鲌、鄱阳湖流域(南北港、新妙湖、庐山西海、青岚湖、章江)的蒙古鲌、鄱阳湖和太湖的达氏鲌及其岷江的黑尾近红鲌野生群体,共检测样本 810 尾。采集新鲜标本用碎冰保存运至实验室,用清水将鱼体洗净稍干后,电

子天平称取体质量( $m_B$ ),精确到 0.1 g。将鱼体平放在解剖盘,左侧向上,用 Canon 6D 摄影,以 Motic Images Advanced 3.2 进行常规测量,精确到 0.01 mm。标本采集时间、地点、数量及体质量与体长( $L_S$ )统计结果见表 1。

表 1 研究标本的采集地、数量及体质量与体长统计(平均值±标准差)

Table 1 Localities, numbers, body mass and standard length in specimens studied(Mean±S.D.)

物种名 Species	采集时间 Collect time	采集地 Sampling locality	样本编码 Sample coding	样本量 Number	体质量/g Body mass	体长/mm Standard length
翘嘴鲌 <i>C. alburnus</i>	2012.11— 2014.12	鄱阳湖 Poyang Lake	Ap	82	406.50±101.15	313.80±18.81
		太湖 Taihu Lake	At	53	338.72±178.04	315.77±24.63
		丹江口水库 Danjiangkou Reservoir	Ad	101	324.28±155.83	283.26±57.17
		漓江 Lijiang River	Al	20	233.36±162.34	247.51±50.59
蒙古鲌 <i>C. mongolicus</i>	2012.11— 2014.12	庐山西海 Lushan West Sea Reservoir	Mpl	60	237.48±57.21	255.50±20.78
		鄱阳湖 流域 新妙湖 Xinmiao Lake	Mpx	56	222.35±57.51	257.62±19.69
		南北港 Nanbeigang Lake	Mpn	64	279.51±136.80	259.50±43.66
		青岚湖 Qinglan Lake	Mpq	74	286.72±102.91	275.60±30.60
		章江 Zhangjiang River	Mpz	34	464.63±219.35	303.72±58.21
达氏鲌 <i>C. dabry</i>	2012.11— 2013.12	鄱阳湖 Poyang Lake	Dp	99	251.17±108.54	246.87±27.28
		太湖 Taihu Lake	Dt	54	154.21±37.40	228.86±17.65
黑尾近红鲌 <i>A. nigrocauda</i>	2013.6— 2013.12	岷江 Minjiang River	Nm	113	302.96±221.50	250.72±61.35

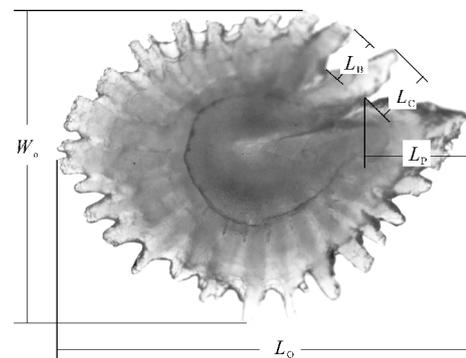
## 1.2 耳石形态学数据获取方法

解剖获取左、右星耳石,以蒸馏水清洗后,用超声波清洗器 KQ-250DV 清洗 30 min,随后将耳石放入烘箱中 55 °C 烘烤 24 h,在干燥冷却后用电子天平称取耳石质量( $m_O$ ),精确到 0.000 1 mg。左、右耳石质量数据  $t$  检验显示,4 种鲌类左右耳石质量间均无显著差异( $P>0.05$ ),本研究均采用左耳石进行形态学度量。将耳石置于 Olympus 体视显微镜 SZX16 下进行数码摄影,以 cellSens Entry 进行形态特征值测量,长度数值精确到 0.000 1 mm,面积数值精确到 0.000 1 mm<sup>2</sup>。星耳石形态度量特征值包括:耳石长( $L_O$ )、耳石宽( $W_O$ )、耳石面积( $A_O$ )、耳石周长( $P_O$ )、翼叶长( $L_P$ )、中央突长( $L_C$ )、基叶长( $L_B$ ),耳石面积和周长度量包括突起部分,见图 1。本研究样本耳石质量及形态度量数据均采用左右耳石平均值,耳石形态度量特征值统计见表 2。

## 1.3 耳石形态学数据统计方法

运用 Excel 2000 和 Statistica 6.0 软件进行数据处理和统计分析。对 4 种鲌耳石  $W_O/L_O$ 、 $L_P/L_O$ 、 $L_C/L_O$ 、 $L_B/L_O$  进行单因子方差分析,明确耳石形态度量特征值存在种间显著差异。按洪秀云<sup>[11]</sup>

和朱志荣等<sup>[12]</sup>方法,4 种鲌分别采用体质量与耳石质量、体质量与耳石直径、体质量与耳石周长、体质量与耳石面积、体长与耳石直径、耳石质量与体长、耳石质量与耳石直径、体质量与体长的幂函数和直线函数回归拟合,耳石直径  $D_O=(L_O+W_O)/2$ 。



$L_O$ : 耳石长 Otolith length;  $W_O$ : 耳石宽 Otolith width;  $L_P$ : 翼叶长 Pterygoid length;  $L_C$ : 中央突长 Central protrusion length;  $L_B$ : 基叶长 Base leaf length.

图 1 耳石形态度量特征值

Fig.1 Characteristics of the otolith morphometrics measured

表 2 耳石形态度量特征值统计

Table 2 Statistics for the otolith morphometric characteristics

特征 Characteristics	翘嘴鲌 <i>C. alburnus</i>	蒙古鲌 <i>C. mongolicus</i>	达氏鲌 <i>C. dabry</i>	黑尾近红鲌 <i>A. nigrocauda</i>
质量 $m_o/\text{mg}$ Mass	0.009 7±0.002 9 (0.004 3~0.017 2)	0.012 6±0.004 6 (0.004 5~0.037 7)	0.017 5±0.007 2 (0.007 9~0.044 8)	0.021 3±0.015 8 (0.002 5~0.082 0)
长 $L_o/\text{mm}$ Length	4.308 8±0.520 3 (2.732 6~5.745 5)	4.877 2±0.701 0 (3.215 1~7.584 0)	4.768 1±0.965 2 (3.242 9~6.632 7)	4.663 2±0.705 4 (2.959 7~6.602 5)
宽 $W_o/\text{mm}$ Width	3.699 0±0.395 9 (2.580 8~4.713 7)	3.956 1±0.433 2 (2.845 6~5.605 4)	4.065 1±0.763 4 (2.793 2~5.810 0)	4.130 8±0.626 7 (2.679 9~6.104 1)
面积 $A_o/\text{mm}^2$ Area	10.037 2±2.120 7 (4.345 6~16.403 8)	12.105 7±3.072 1 (5.776 3~26.415 4)	12.166 9±4.459 7 (5.793 4~22.676 2)	12.279 7±3.607 0 (5.065 2~26.427 7)
周长 $P_o/\text{mm}$ Perimeter	22.461 2±3.520 8 (12.393 3~32.713 6)	22.618 2±2.867 7 (12.905 2~32.592 2)	22.538 2±4.828 5 (13.550 3~35.543 1)	22.379 5±4.256 7 (12.415 7~33.240 9)
翼叶长 $L_p/\text{mm}$ Pterygoid length	1.026 0±0.193 3 (0.515 5~1.642 0)	1.184 0±0.226 7 (0.398 0~1.865 2)	1.271 8±0.284 9 (0.717 8~2.059 2)	1.160 3±0.232 7 (0.686 8~1.795 5)
中央突长 $L_c/\text{mm}$ Central protrusion length	0.740 9±0.210 4 (0.254 8~1.300 3)	0.767 8±0.183 5 (0.266 7~1.517 1)	0.853 5±0.208 5 (0.375 3~1.447 2)	0.812 6±0.264 8 (0.301 9~1.528 0)
基叶长 $L_b/\text{mm}$ Basal leaves length	0.653 6±0.144 2 (0.256 8~0.995 8)	0.607 4±0.138 5 (0.222 3~1.086 8)	0.523 6±0.157 2 (0.230 1~0.916 0)	0.702 2±0.227 9 (0.273 8~1.439 6)

注:表中数据以平均值加减标准差表示,括号中为最小值~最大值。Note: Data in the table are represented by the average value plus or minus the standard deviation, and in parentheses are minimum to maximum values.

对星耳石形态度量特征值分别进行物种和种群多变量判别函数分析。为消除不同规格个体对耳石形态度量特征值的影响,采用对数比率转换方法<sup>[13]</sup>,即:长度值采取  $L_{\text{adj}} = \lg L / \lg SL$  计算,面积值采取  $A_{\text{adj}} = \lg A / \lg SL^2$  计算,并检测转换后数据变量与体长的回归关系显著性。将耳石形态度量特征值转换为 6 个形态因子(shape factor)和 6 个形态指数(shape indices)<sup>[14-15]</sup>,具体转换见表 3。

表 3 耳石形态因子和形态指数的计算

Table 3 Shape factors and shape indices from the otoliths

形态因子 Shape factor	形态指数 Shape index
$F_1 = P_o / (A_o)^{1/2}$	形态系数(Coefficient of form, $C_F$ ) = $4\pi A_o / P_o^2$
$F_2 = P_o / L_o$	圆度(Roundness, $R_D$ ) = $4A_o / \pi L_o^2$
$F_3 = P_o / W_o$	充实度(Circularity, $C_R$ ) = $P_o^2 / A_o$
$F_4 = (A_o)^{1/2} / L_o$	矩形趋近率(Rectangularity, $R_E$ ) = $A_o / (L_o \times W_o)$
$F_5 = (A_o)^{1/2} / W_o$	椭圆率(Ellipticity, $E_L$ ) = $(L_o - W_o) / (L_o + W_o)$
$F_6 = W_o / L_o$	面密度(Surface density, $S_D$ ) = $M_o / A_o$

将 12 个耳石形态因子和形态指数数值进行多变量主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 鲌类星耳石形态

鲌类星耳石为白色,质地较硬,呈卵圆形或椭圆形。耳石中央较厚,往边缘逐渐变薄,中央区域形成明显不完整的椭圆形内核区。边缘具突起,呈锯齿状,多为叶形突,少数棘突,突起形状、长短、宽窄不一,具 2 个裂度不同的向内凹裂,形成翼叶、中央突和基叶。每种鲌随机抽取 20 个耳石,计数边缘突起数目,翘嘴鲌耳石突起数目相对较少,平均数为 29.70,蒙古鲌、达氏鲌、黑尾近红鲌耳石突起数目较为接近,平均数分别为 32.55、32.20、32.05。

### 2.2 耳石生长与体生长回归方程

拟合的 4 种鲌体质量与耳石质量、体质量与耳石直径、体质量与耳石周长、体质量与耳石面积、体长与耳石直径、耳石质量与体长、耳石质量与耳石直径、体质量与体长的幂函数回归方程  $Y = aX^b$  和直线函数回归方程  $Y = a + bX$  的  $a$ 、 $b$  系数及相关系数  $r$  见表 4。

表 4 鱼体生长与耳石生长回归方程  $a$ 、 $b$  及  $r$  值

Table 4 Parameters of the regression equations between body and otolith

回归关系 Regression equation	参数 Parameters	翘嘴鲌 <i>C. alburnus</i>		蒙古鲌 <i>C. mongolicus</i>		达氏鲌 <i>C. dabry</i>		黑尾近红鲌 <i>A. nigrocauda</i>	
		$Y=aX^b$	$Y=a+bX$	$Y=aX^b$	$Y=a+bX$	$Y=aX^b$	$Y=a+bX$	$Y=aX^b$	$Y=a+bX$
体质量-耳石质量 $m_B-m_O$	$a$	$3.1655 \times 10^5$	1.733 6	$4.7992 \times 10^4$	-19.048 4	$4.2749 \times 10^3$	39.994 5	$4.1516 \times 10^4$	19.224 9
	$b$	1.485 8	$3.5573 \times 10^4$	1.182 6	$2.4036 \times 10^4$	0.744 7	$1.0131 \times 10^4$	1.290 0	$1.3319 \times 10^4$
	$r$	0.750 3	0.680 8	0.810 4	0.803 2	0.699 5	0.723 7	0.920 8	0.951
体长-耳石直径 $L_S-D_O$	$a$	56.778 5	5.899 6	57.063 1	$5.2987 \times 10^3$	160.884 7	$1.7291 \times 10^5$	46.649 8	$5.0713 \times 10^4$
	$b$	1.187 3	72.699 5	1.038 8	$5.9402 \times 10^4$	0.270 4	$1.5307 \times 10^4$	1.082 2	$4.2534 \times 10^4$
	$r$	0.744 2	0.704 5	0.867 6	0.864 5	0.505 8	0.506 0	0.866 7	0.838 8
体质量-耳石直径 $m_B-D_O$	$a$	0.769 5	-681.549 1	1.870 2	-651.454 5	18.813 3	-170.262 4	1.375 0	-514.445 7
	$b$	4.323 3	256.764 2	3.325 2	211.654 8	1.604 1	87.672 9	3.345 1	173.830 2
	$r$	0.818 8	0.749 6	0.864 1	0.860 8	0.746 2	0.737 2	0.856 1	0.949 5
体质量-耳石周长 $m_B-P_O$	$a$	0.039 0	-312.307 8	0.056 4	-472.239 3	4.945 4	-75.105 0	0.003 9	-498.618 4
	$b$	2.888 7	$2.9331 \times 10^{-2}$	2.705 9	$3.3406 \times 10^{-2}$	1.192 6	$1.2958 \times 10^{-2}$	3.548 9	$3.5818 \times 10^{-2}$
	$r$	0.778 3	0.672 6	0.783 0	0.700 5	0.597 7	0.618 2	0.805 3	0.688 3
体质量-耳石面积 $m_B-A_O$	$a$	1.686 6	-206.105 8	3.615 8	-181.642 0	28.015 6	6.000 2	1.380 7	15.040 2
	$b$	2.271 6	$5.5056 \times 10^{-5}$	1.725 9	$3.8411 \times 10^{-5}$	0.805 3	$1.7338 \times 10^{-5}$	2.065 8	$2.3447 \times 10^{-5}$
	$r$	0.836 3	0.760 5	0.862 6	0.862 8	0.740 2	0.763 9	0.750 5	0.381 8
耳石质量-体长 $m_O-L_S$	$a$	$1.6860 \times 10^{-5}$	$-1.2358 \times 10^{-3}$	$4.8190 \times 10^{-7}$	$-1.2513 \times 10^{-2}$	$3.2377 \times 10^{-6}$	$-9.7458 \times 10^{-3}$	$3.2962 \times 10^{-7}$	$-2.7144 \times 10^{-2}$
	$b$	1.110 8	$3.6796 \times 10^{-8}$	1.813 1	$9.3756 \times 10^{-8}$	1.554 2	$1.1315 \times 10^{-7}$	1.980 9	$1.9363 \times 10^{-7}$
	$r$	0.664 7	0.579 3	0.823 2	0.784 0	0.411 5	0.402 9	0.886 9	0.750 6
耳石质量-耳石直径 $m_O-D_O$	$a$	$3.2234 \times 10^{-4}$	$-1.3639 \times 10^{-2}$	$2.9263 \times 10^{-4}$	$-2.1689 \times 10^{-2}$	$1.2032 \times 10^{-3}$	$-1.5233 \times 10^{-2}$	$3.6665 \times 10^{-4}$	$-3.7196 \times 10^{-2}$
	$b$	2.431 3	$5.8270 \times 10^{-3}$	2.508 2	$7.7595 \times 10^{-3}$	1.769 7	$7.4041 \times 10^{-3}$	2.537 0	$1.2440 \times 10^{-2}$
	$r$	0.911 9	0.888 9	0.951 1	0.944 4	0.876 3	0.871 5	0.909 7	0.951 1
体质量-体长 $m_B-L_S$	$a$	$1.0733 \times 10^{-5}$	-431.556 7	$6.7819 \times 10^{-6}$	-614.288 1	$3.2920 \times 10^{-5}$	-407.899 1	$3.3525 \times 10^{-5}$	-467.118 9
	$b$	3.020 1	$2.6199 \times 10^{-3}$	3.126 1	$3.3537 \times 10^{-3}$	2.849 7	$2.5980 \times 10^{-3}$	2.862 1	$3.0714 \times 10^{-3}$
	$r$	0.912 6	0.789 3	0.972 6	0.937 2	0.708 7	0.660 9	0.914 7	0.850 7

2.3 耳石形态度量特征值判别函数分析

1) 4 种鲌耳石形态判别函数分析。4 种鲌耳石形态度量特征值判别函数典型性分析 Canonical R

为 0.705 9, Wilk's  $\lambda$  为 0.325 0, chi-Sqr. 为 903.18,  $F(21, 2297)$  为 52.424,  $P$  检验 0.000 0, 所得的判别函数分别为:

$$\text{翘嘴鲌} = -3971.38 - 280.7L_O - 4069.1W_O + 9900.6A_O + 5529.03P_O - 711.31L_P - 9.14L_C + 875.82L_B;$$

$$\text{蒙古鲌} = -4075.33 - 77.31L_O - 4192.25W_O + 10022.36A_O + 5487.81P_O - 685.48L_P - 4.16L_C + 847.88L_B;$$

$$\text{达氏鲌} = -4101.05 - 11.53L_O - 3593.53W_O + 9443.97A_O + 5414.93P_O - 638.33L_P + 15.26L_C + 810.29L_B;$$

$$\text{黑尾近红鲌} = -4123.82 - 405.2L_O - 3763.94W_O + 10007.71A_O + 5441.85P_O - 664.26L_P + 1.47L_C + 879.59L_B$$

判别函数分析表明, 4 种鲌全部样本判别正确率为 71.11%, 其中翘嘴鲌和蒙古鲌有较高的判别正确率, 分别为 82.42%、81.60%, 黑尾近红鲌判别正确率较低, 为 45.13%。第一、第二、第三判别函数根值贡献率分别为 66.95%、22.06%、10.99%, 累计贡献率达到 100.00%。其中第一根值影响较大的特征值为  $W_O$ 、 $A_O$ 、 $L_O$ , 第二根值影响较大的特征值为  $W_O$ 、 $L_O$ 、 $A_O$ , 第三根值影响较大的特征值为  $A_O$ 、

$W_O$ 、 $L_O$ 、 $L_B$ , 见表 5。

2) 鲌群体耳石形态判别函数分析。根据鲌类群体耳石形态度量特征值判别函数分析总判别正确率为 65.60%, 各群体判别正确率见表 6, 判别不正确的样本个体主要表现在种内群体间的混淆, 特别是翘嘴鲌群体间不易区分。第一、第二、第三判别函数根值贡献率分别为 75.61%、9.80%、7.74%, 累计贡献率达到 93.15%。其中第一根值影响较大的特征

表5 4种鲃耳石形态度量第一、第二和第三判别函数的典型变量标准系数

Table 5 Standardized coefficients for canonical variables of the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> discriminant functions for otolith morphometrics of four culter

特征 Characteristics	根 1 Root 1	根 2 Root 2	根 3 Root 3
耳石长 $L_O$	-0.632 0*	1.542 3*	1.429 4*
耳石宽 $W_O$	-1.175 5*	-2.316 5*	2.045 1*
耳石面积 $A_O$	0.760 9*	0.765 2*	-3.709 3*
耳石周长 $P_O$	0.414 8	0.197 1	-0.143 6
翼叶长 $L_P$	-0.351 2	-0.126 0	0.197 7
中央突长 $L_C$	-0.164 1	-0.076 4	0.204 6
基叶长 $L_B$	0.338 2	-0.280 7	-0.660 9*
特征值 Eigenva	0.993 3	0.327 4	0.163 0
累计贡献率/% Cum. prop	66.95	89.01	100.00

注: \* 为大于 0.5 的标准系数。Note: \* shows coefficients greater than an absolute value of 0.5.

值为  $A_O$ 、 $P_O$ ，第二根值影响较大的特征值为  $W_O$ 、 $A_O$ 、 $L_O$ ，第三根值影响较大的特征值为  $A_O$ 、 $W_O$ 、 $L_O$ 、 $L_B$ 。将鲃类群体耳石形态度量特征值判别函数分析所得均值进行聚类分析表明，翘嘴鲃 3 个长江群体(太湖、鄱阳湖、丹江口水库)聚为一支，但翘嘴鲃漓江群体独为一支，蒙古鲃鄱阳湖 4 个群体(庐山西海、新妙湖、南北港、青岚湖)聚为一支，此 3 支聚类后再与黑尾近红鲃聚类在一起，达氏鲃太湖群体、达氏鲃鄱阳湖群体、蒙古鲃章江群体等依次聚类，见图 2。

2.4 耳石形态因子及形态指数主成分分析

4 种鲃耳石形态因子和形态指数主成分分析表明，第一、第二和第三主成分贡献率分别为 44.58%、35.28%、11.34%，累计贡献率达 91.20%。第一主

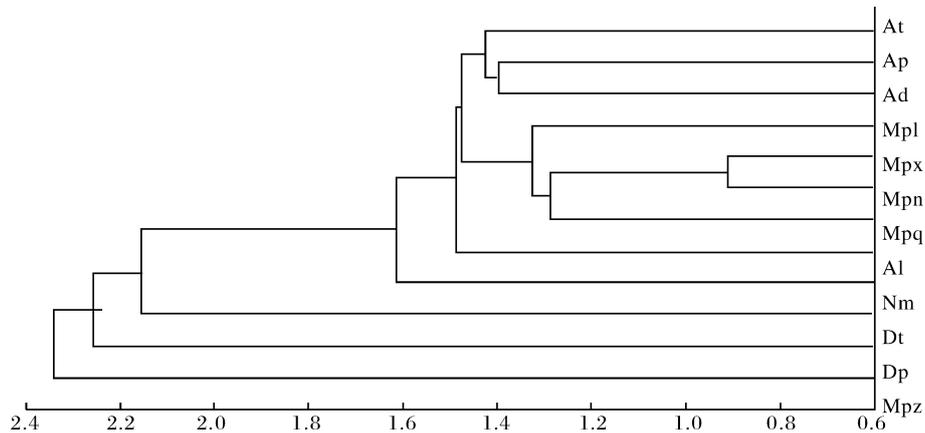


图 2 鲃群体耳石形态度量特征值判别函数分析聚类图

Fig.2 UPGMA cluster based on morphological characters of culter's populations

表 6 鲃群体耳石形态度量特征值判别函数正确率

Table 6 Correct percent for all samples of the discriminant functions analysis for culter's populations

群体编号 Population coding	判别正确率 Correct percent	群体编号 Population coding	判别正确率 Correct percent	群体编号 Population coding	判别正确率 Correct percent
Ap	74.39	Mpl	53.33	Mpz	73.53
At	39.62	Mpx	69.64	Dp	63.64
Ad	70.30	Mpn	50.00	Dt	85.19
Al	55.00	Mpq	56.76	Nm	60.18
总判别正确率 Total correct percent		63.09			

成分影响较大的变量为  $F_2$ 、 $C_F$ 、 $F_1$ 、 $C_R$ 、 $E_L$ 、 $F_6$ 、 $F_5$ ，第二主成分影响较大的变量为  $F_3$ 、 $R_D$ 、 $F_4$ ，第三主成分影响较大的变量为  $R_E$ ，见表 7。第一与第二主成分、第一与第三主成分散点图分别见图 3、图 4。

3 讨论

鱼类耳石随个体生长而生长，形成后很少发生再吸收、分解或变形现象<sup>[16]</sup>，耳石形态与物种遗传控制和外界环境因素调控相关联。Yamauchi 等<sup>[17]</sup>

比较 18 个属不同生活习性的鱼类,海洋性鱼类矢耳 (如耳石质量、长、宽、直径、周长、面积等)与鱼体大石较大,而鲤科鱼类矢耳石较小,星耳石在 3 种耳石小变量(如体质量、全长或叉长或体长等)相互关系最大,常用作耳石研究材料。鱼类耳石大小变量分析是运用耳石形态进行鱼类物种或种群判别、鱼

表 7 耳石形态因子和形态指数第一、第二、第三主成分变量标准系数

Table 7 Standardized coefficients for variables of the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> principal component for otolith shape factors and shape indices

特征变量 Eigenvariable	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3
$F_1$	0.769 6*	-0.635 1	0.041 4
$F_2$	0.924 0*	-0.358 2	0.117 6
$F_3$	0.571 4	-0.789 7*	0.219 7
$F_4$	0.629 9	0.739 7*	0.235 4
$F_5$	-0.710 5*	-0.437 8	0.541 1
$F_6$	0.729 0*	0.666 4	-0.146 7
$C_F$	-0.771 6*	0.574 7	-0.073 0
$R_D$	0.624 4	0.743 3*	0.236 9
$C_R$	0.756 0*	-0.641 1	0.031 3
$R_E$	-0.001 2	0.421 6	0.897 0*
$E_L$	-0.740 3*	-0.649 9	0.150 8
$S_D$	0.197 2	-0.042 2	-0.193 2
特征值 Eigenvalue	5.349 6	4.233 9	1.360 6
贡献率 Prop	44.579 7	35.282 5	11.338 7
累计贡献率 Cum. prop	44.58	79.86	91.20

注: \* 为大于 0.7 的标准系数。Note: \* shows coefficients greater than an absolute value of 0.7.

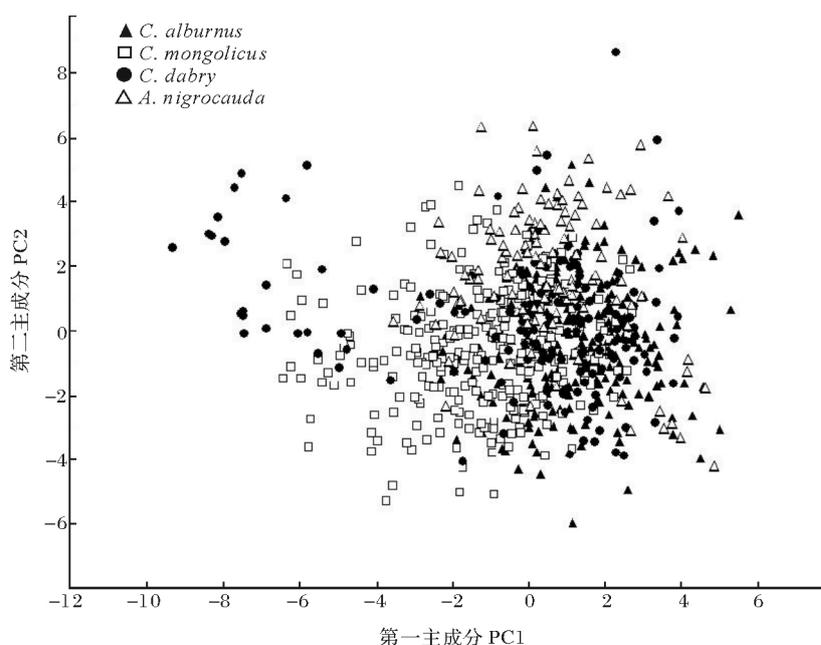


图 3 耳石形态因子和形态指数第一与第二主成分散点图

Fig.3 Scatter plots of 1<sup>st</sup> vs. 2<sup>nd</sup> principal component for otolith shape factors and shape indices

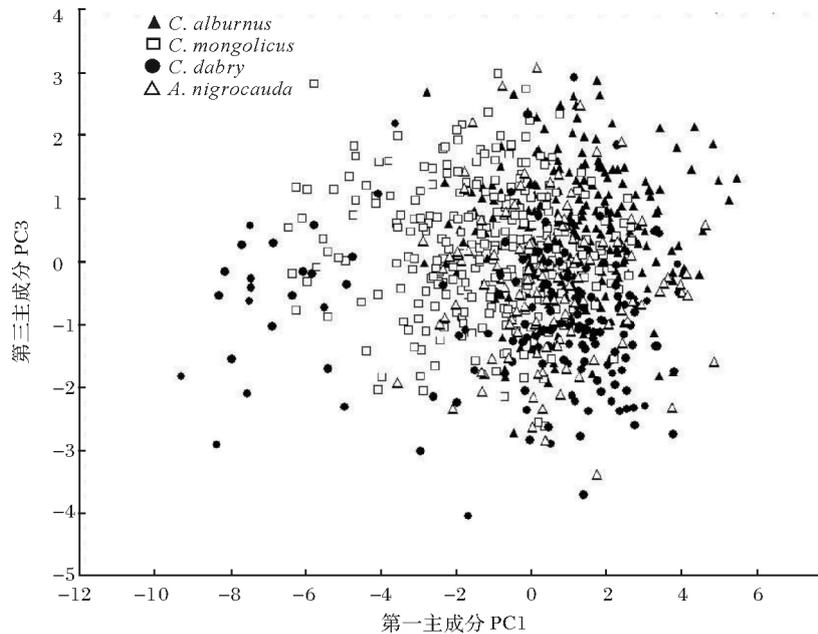


图 4 耳石形态因子和形态指数第一与第三主成分散点图

Fig.4 Scatter plots of 1<sup>st</sup> vs. 3<sup>rd</sup> principal component for otolith shape factors and shape indices

类个体生长测算及渔业资源评估的前提,通常采用幂函数回归方程或直线回归方程拟合两者关系。洪秀云<sup>[11]</sup>通过对渤、黄海带鱼(*Trichiurus haumela*)的研究,提出根据经验曲线选用 $y=ax^b$ 型函数方程来表示这两者关系,不仅符合方程的生物学定义,而且能更为客观地反映两者间全过程的真实关系。本研究表明,幂函数回归方程相对于直线回归方程相关系数要高,能更好地表述鲈体生长及耳石生长关系。鲈类体质量与耳石质量、体长与耳石直径的回归方程幂值分别在 $0.744\ 7\sim 1.485\ 8$ 、 $1.038\ 8\sim 1.187\ 3$ ,近于1,与线性回归关系相似,表明体质量相对耳石质量的增长速度与体长相对耳石长度的增长速度相近,与东方欧鳊(*Abramis brama*)等鲤科鱼类耳石长或宽与体全长幂函数的幂值为 $0.941\sim 1.419$ 相一致<sup>[18]</sup>。4种鲈体质量与耳石直径回归方程幂值最高,近于3.5,与印度刺鲃(*Psenopsis cyanea*)等耳石长与体质量幂函数的幂值较为相近<sup>[19]</sup>,体质量与体长回归方程幂值近于3,与张小谷等<sup>[20]</sup>结果一致,耳石质量与耳石直径、耳石面积回归方程幂值都近于2,表明耳石质量相对耳石长度的增长速度较体质量相对体长的增长速度要慢。

鱼类耳石大小变量及由此变换而来的耳石形状信息(形态因子、形态指数)通过多变量判别函数分析或主成分分析研究类群间耳石形态差异,可进行鱼类物种及群体识别。张国华等<sup>[21]</sup>对鲫(*Carassius*

*auratus*)、长鳍吻鲈(*Rhinogobio ventralis*)等6种鲤科鱼类星耳石和微耳石进行种间判别分析,表明在亚科、属和种水平上是可区分的。Zischke等<sup>[22]</sup>通过耳石形态度量对澳大利亚北部4种马鲛鱼(*Scomberomorus commerson*, *S. munroi*, *S. semifasciatus*, *S. queenslandicus*)进行判别函数分析,较好地地区分出这些近似种,进而提高了渔业资源评估的准确性。本研究4种鲈耳石形态度量特征值判别函数典型性分析判别正确率达71.11%,其中翘嘴鲈和蒙古鲈的判别正确率达80%以上,表明能通过耳石形态度量值进行鲈类等近缘种的识别,对识别影响较大的特征值为耳石宽、耳石面积、耳石长、基叶长等。通过耳石形态因子和形态指数主成分分析表明,对识别影响较大的形态因子为 $F_2$ 、 $F_1$ 、 $F_6$ 、 $F_5$ 等,对识别影响较大的形态指数为形态系数、充实度、椭圆率等。

虽然本研究在鲈类种群水平上,耳石形态差异相对较小,通过判别函数分析时判别正确率比物种水平要低,特别是翘嘴鲈太湖种群个体出现判别混淆,不易区分。我们仍可运用群体耳石形态度量特征值进行聚类分析,了解群体间形态相似度。本研究表明翘嘴鲈3个长江群体(太湖、鄱阳湖、丹江口水库)较近,而与漓江群体耳石形态分离,蒙古鲈鄱阳湖4个群体(庐山西海、新妙湖、南北港、青岚湖)聚在一起,聚类的形式依次为南北港群体与新妙湖

群体聚为一支,再依次聚类青岚湖群体、庐山西海群体,而蒙古鲈章江群体耳石形态分离性较大,翘嘴鲈 4 个群体和蒙古鲈 5 个群体的聚类形式与群体间的地理距离相关联,这与鄱阳湖蒙古鲈体形的框架结构形态度量和几何形态学分析结果相同<sup>[23]</sup>。笔者认为,通过星耳石形态度量分析能为鲈类群体间关联性分析提供依据。运用耳石形态度量进行鱼类种群的判别在我国鲈类、花鲈及大西洋鲱、鳊等种群研究中得到较好的运用。郭弘芝等<sup>[24]</sup>对我国分布的七丝鲚(*Coilia grayii*)、凤鲚(*C. mystus*)、刀鲚(*C. nasus*)、短颌鲚(*C. brachygnathus*)矢耳石度量特征变量进行主成分分析表明短颌鲚为刀鲚的淡水生态型种群。叶振江等<sup>[25]</sup>比较鲈(*Lateolabrax japonicus*)和花鲈(*L. maculatus*)耳石形态,聚类分析表明我国近海花鲈分为舟山、福州—厦门、广西 3 个地理种群。Burke 等<sup>[26]</sup>通过耳石形态指数判别大西洋鲱(*Clupea harengus*)快生长冬季产卵型和慢生长秋季产卵型 2 个群体。Steer 等<sup>[27]</sup>运用耳石 5 个形态指数分析表明澳大利亚南部海湾南澳下鳊鱼(*Hyporhamphus melanochir*) 6 个不同的地理群体存在显著差异,判别函数分析显示在不同水域空间分布的鳊群体存在耳石形态的差异。

我们期望随着耳石信息分析技术的不断完善,建立耳石图像抽提工具,以重构个体发育生长过程中耳石形态变化,耳石形态将不仅运用于鱼类物种或群体鉴别、渔业资源管理,还将用于阐明不同鱼类耳石图像的生物意义、甚至用于探讨鱼类进化机制<sup>[28-29]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 赵俊,王春,陈湘舜,等. 鲈鱼(*Megalobrama skolkovii*)早期发育的研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 1994, 2(2): 51-59.
- [2] 里克 W E. 鱼类种群生物统计的计算和解析[M]. 费鸿年,袁蔚文,译. 北京: 科学出版社, 1984: 141.
- [3] 袁传宓,林金榜,刘仁华,等. 刀鲚的年龄和生长[J]. 水生生物学集刊, 1978, 6(3): 285-296.
- [4] ERICKSON C M. Age determination of Manitoban walleyes using otoliths, dorsal spines, and scales[J]. North American journal of fisheries management, 1983, 3(2): 176-181.
- [5] 沈建忠,曹文宣,崔奕波. 用鳞片和耳石鉴定鲫年龄的比较研究[J]. 水生生物学报, 2001, 25(5): 462-466.
- [6] AVIGLIANO E, JAWAD L A, VOLPEDO A V. Assessment of the morphometry of saccular otoliths as a tool to identify tripterygion species (*Tripterygiidae*) [J]. J Mar Biol Assoc U. K., 2016, 96: 1167-1180.
- [7] RENAN X, MONTERO-MUNOZ J, GARZA-PEREZ R, et al. Age and stock analysis using otolith shape in gags from the southern gulf of Mexico[J]. T Am Fish Soc, 2016, 145: 1252-1265.
- [8] BOSE A P H, ADRAGNA J B, BALSHINE S. Otolith morphology varies between populations, sexes and male alternative reproductive tactics in a vocal toadfish *Porichthys notatus*[J]. J Fish Biol, 2017, 90: 311-325.
- [9] 任冬妮. 淡水鲤鱼耳石结构、性质及其生物矿化机制的研究[D]. 北京: 清华大学, 2013: 33-35.
- [10] 陈宜瑜. 中国动物志. 硬骨鱼纲. 鲤形目(中卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 182-197.
- [11] 洪秀云. 渤、黄海带鱼年龄与生长的研究[J]. 水产学报, 1980, 4(4): 361-370.
- [12] 朱志荣, 林永泰, 方榕乐. 武昌东湖蒙古红鲈和翘嘴红鲈的食性及其种群控制问题的研究[J]. 水生生物学集刊, 1976, 6(1): 36-52.
- [13] REJIST J D. An empirical evaluation of several univariate methods that adjust for size variation in morphometric data[J]. Can J Zool, 1985, 63: 1429-1439.
- [14] PONTUAL H D, PROUZET P. Numerical analysis of scale morphology to discriminate between Atlantic salmon stocks [J]. Aquatic living resources, 1988, 1: 17-27.
- [15] TUSET V M, LOMBARTE A, GONZAL J A, et al. Comparative morphology of the sagittal otolith in *Serranus* spp [J]. J Fish Biol, 2003, 63: 1491-1504.
- [16] 于鑫. 鱼类耳石形态和微化学分析方法及其在群体识别中的实证研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2014: 23.
- [17] YAMAUCHI M, TANAKA J, HARADA Y. Comparative study on the morphology and the composition of the otoliths in the teleosts [J]. Acta Oto-Laryngol, 2008, 128: 846-855.
- [18] YILMAZ S, YAZICIOGLU O, YAZICI R, et al. Relationships between fish length and otolith size for five cyprinid species from Lake Ladik, Samsun, Turkey [J]. Turk J Zool, 2015, 39: 438-446.
- [19] ANEESH K K V, DEEPA K P, HASHIM M, et al. Relationships between fish size and otolith size of four bathydemersal fish species from the south eastern Arabian Sea, India [J]. J Appl Ichthyol, 2017, 33: 102-107.
- [20] 张小谷, 熊邦喜. 鄱阳湖鲈属(*Culter*)和原鲈属(*Culterichthys*) 鱼类体重与体维关系[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 457-464.
- [21] 张国华, 但胜国, 苗志国, 等. 六种鲤科鱼类耳石形态以及在种类和群体识别中的应用[J]. 水生生物学报, 1999, 23(6): 683-688.
- [22] ZISCHKE M T, LITHERLAND L, TILYARD B R, et al. Otolith morphology of four mackerel species (*Scomberomorus* spp.) in Australia; species differentiation and prediction for fisheries monitoring and assessment [J]. Fish Res, 2016, 176: 39-47.
- [23] 张小谷. 鄱阳湖四种鲈形态与生长的比较研究[D]. 武汉: 华中

- 农业大学,2008;42-48.
- [24] 郭弘艺,魏凯,唐文乔,等.基于矢耳石形态特征的中国鲮属鱼类种类识别[J].动物分类学报,2010,35(1):127-134.
- [25] 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.
- [26] BURKE N,BROPHY D,KING P A.Otolith shape analysis:its application for discriminating between stocks of Irish Sea and Celtic Sea herring (*Clupea harengus*) in the Irish Sea[J]. J Mar Sci,2008,65:1670-1675.
- [27] STEER M A,FOWLER A J.Spatial variation in shape of otoliths for southern garfish *Hyporhamphus melanochir* - contribution to stock structure[J].Mar Biol Res,2015,11:504-515.
- [28] FABLET R,CHESEL A,CARBINI S, et al. Reconstructing individual shape histories of fish otoliths: a new image-based tool for otolith growth analysis and modeling[J].Fish Res, 2009,96:148-159.
- [29] SCHULZ-MIRBACH T,RIESCH R,GARICA F J, et al. Effects of extreme habitat conditions on otolith morphology—a case study on extremophile livebearing fishes (*Poecilia mexicana*, *P. sulphuraria*)[J].Zoology,2011,114:321-334.

## Comparative studies on multivariate morphometrics of asteriscus of four culters

XIE Zhenzhen ZHANG Huahao HU Liangxiong ZHANG Xiaogu

*School of Pharmacy and Life Sciences, Jiujiang University,  
Jiangxi Province, Jiujiang 332000, China*

**Abstract** Eight characteristic values of asteriscus from 810 individuals in four culters species, including *Culter alburnus*, *C. mongolicus*, *C. dabryi* and *Ancherythroculter nigrocauda*, from 9 sampling points, were measured, and the regression analysis between culter's body growth and otolith growth, and multivariate statistical analysis of morphological characters, six shape factors and six shape indices were analyzed using Statistica software. The results showed that: (1) There were significant differences of the asteriscus morphology among the four culters. (2) Power function regression equation could better describe the relationship between the culter's body growth and otolith growth than linear regression equation. The regression equations between culter's body quality and otolith quality, and between standard length and otolith diameter were approximate to linear regression relation, with the exponential value of regression equation between body quality and otolith diameter and standard length being 3.5 and 3, and between otolith quality and otolith diameter being 2. The growth rate of otolith mass was similar to that of body mass, but the growth rate of otolith mass relative to otolith length was slower than that of body mass relative to standard length or otolith length. (3) Discriminant function analysis of culter's morphological characters had an accuracy of 71.11%, and the characteristic values that had great influence on the identification were OW, OA, OL and BL, etc. Through principal component analysis of the shape factors and shape indices, F2, F1, F6, F5 and CF, CR, EL, etc. had a greater influence on the recognition of shape. (4) Through otolith morphological characters discriminant analysis and cluster analysis among culter populations, it could be better distinguished from three Changjiang groups of *C. alburnus* (from Taihu Lake, Poyang Lake, and Danjiangkou Reservoir), the Lijiang group, and five Poyang Lake groups of *C. mongolicus* (from Xinmiao Lake, Nanbeigang Lake, Qilang Lake, Lushan West Sea Reservoir, and Zhangjiang River), with the group clustering distance associated with geographic distance among the populations. In short, asteriscus shape analysis in this study provides a basis for correlation analysis among culter species or populations.

**Keywords** culters; asteriscus; morphometrics; regression analysis; multivariate analysis

(责任编辑:边书京)