

文章编号: 1004-2490(2020)02-0161-09

基于鱼体和耳石形态的东海 两种鲈属鱼类判别分析

韩霈武¹, 陈新军^{1, 3, 4, 5, 6}, 方 舟^{1, 3, 4, 5, 6}, 张 衡²

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 国家远洋渔业工程技术研究中心,
上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 6. 农业农村部大洋渔业资源
环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘 要: 为了有效区分东海两种鲈属鱼类, 根据 2017 年 10 月至 2018 年 2 月在东海所采集的鲈属鱼类 (*Scomber* spp.) 样本, 利用框架测量法与傅立叶分析分别对鱼体外形和耳石形态进行分析, 框架测量法共测量 26 个可量性状, 并利用平均值与 t 检验对两种鲈属鱼类形态差异进行初步比较, 然后对两种鲈属鱼类耳石进行傅立叶分析, 模拟耳石形态, 最后利用判别分析进行结果比较。结果表明, 在 26 个可量性状中有 25 个值存在显著差异 ($P < 0.05$), 1 个值不存在显著差异 ($P > 0.05$)。基于框架测量法的判别分析结果表明, 26 个可量性状中的 4 个进入了逐步判别分析中, 总判别正确率为 86.70%; 耳石的傅立叶分析中, 基于 77 个傅立叶系数, 选出 7 个系数进入逐步判别分析中, 总判别正确率为 90.20%。总体而言, 两种方法所得到的结果一致, 均表明日本鲈 (*S. japonicus*) 与澳洲鲈 (*S. australasicus*) 差异明显, 同时傅立叶分析法对耳石的判别分析比框架测量法在判别正确率上有所提升, 也说明耳石傅立叶分析可以更好地用于鱼类种类判别。

关键词: 鲈属; 框架网络; 耳石; 傅立叶分析; 逐步判别分析

中图分类号: S 917.4 **文献标志码:** A

鲈属 (*Scomber*) 鱼类隶属于鲈形目 (Perciformes), 鲭科 (Scombridae), 是重要的中上层经济性鱼类, 主要分布于太平洋、大西洋和印度洋温带及其邻近海域^[1-2]。我国拥有丰富的鲈属鱼类资源, 从 20 世纪 50 年代初期就开始利用灯光围网捕捞鲈属鱼类, 20 世纪 80 年代, 我国近海底层传统经济鱼类资源逐渐衰退, 到 90 年代后期, 鲈属鱼类已经成为我国近海主要的经济鱼类之一, 年产量约为 30 万 t^[3-4]。在我国近海分布的鲈属鱼类主要有两种: 日本鲈 (*S. japonicus*) 与澳洲鲈 (*S. australasicus*)。日本鲈与澳洲鲈在形态特征和生物学特性上非常相似, 并且它们的

洄游路线以及分布范围存在重叠, 这导致二者在分类上存在着许多争议^[5-7]。目前, 可以根据腹部是否存在小黑斑点及背鳍鳍条数日来鉴别日本鲈与澳洲鲈, 即: 日本鲈第一背鳍鳍棘 9~10 根, 体腹部银白色, 一般无斑点; 澳洲鲈第一背鳍鳍棘 11~12 根, 体腹部密布不规则形小蓝黑斑。但是时常由于腹部斑点分布的不均匀和背鳍鳍条的损伤, 影响到外观形态上的区分结果。

种类和种群的鉴别是进行渔业资源评估管理的基本前提^[8]。形态学方法的特点是快捷简便、容易掌握、操作简单等, 因此广泛应用于多种物种的鉴定。最常见的方法是通过外形测定来

收稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (NSFC41476129); 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室开放课题 (A1-2006-00-301109)

作者简介: 韩霈武 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为近海渔业资源。E-mail: 2718344838@qq.com

通信作者: 方 舟 (1988—), 讲师。E-mail: zfang@shou.edu.cn

进行差异分析,但以往传统形态测量法会产生较大的误差,同时所测量的数据也无法全面地反映鱼类的几何形态学信息^[9]。框架法(truss)兼有测量形态和几何形态的优点,它利用鱼体的形态特征,在鱼体轮廓边缘选取一定数量的点,根据这些点连接成线,可以把鱼体划分为多个部分,从而能更全面的包含关于鱼体形状变化的信息,因此广泛应用于各种研究中^[10-11]。耳石是鱼类重要的硬组织,具有稳定的形态结构,同时也蕴含着重要的生态信息。目前针对耳石形态使用较为广泛的除了传统测量法外,傅立叶分析以其简单易懂和可模拟形态的特点,也得到科研工作者的青睐^[12-14]。因此,本研究拟利用框架法和傅立叶分析,对两种鲈属鱼类的外形形态和耳石形态特征进行分析,利用判别分析法比较两者的正确率,以找到更优方法来有效区分两个种类,为鲈属鱼类资源评估的种类划分提供依据。

1 材料与方法

1.1 样本采集

本研究所采用的样本来自于东海海域(26°~28°N、122°~124°E),此区域为鲈属鱼类的主要越冬场所,取样时间为2017年10月至2018年2月,此阶段鲈属鱼类基本在0~1龄,且大多处于成熟期。所有的样本经过冷冻后带回实验室进行解冻处理。本次样本共203尾,通过腹部斑点及背鳍鳍条数进行综合判断,确定其中日本鲈为83尾,澳洲鲈为120尾。样本基本情况见表1。实验过程中用镊子将耳石从平衡囊内取出,并用水清洗耳石,以去除其表面杂质,然后将其放入恒温烘箱中进行干燥,等待后续备用。

表1 两种鲈属鱼类的基本信息

Tab.1 Sampling information of two *Scomber* species

种类 Species	叉长范围 Range of fork length	尾数 Number
日本鲈 <i>S. japonicus</i>	222 ~ 380 mm	83
澳洲鲈 <i>S. australasicus</i>	237 ~ 395 mm	120

1.2 实验方法

1.2.1 鱼体形态测量

用描述鱼体形态的框架结构系统在鱼体上建立框架。本研究共选定了13个解剖学坐标(anatomical landmark),以便获取鲈属鱼类的框架结构。如图1所示,运用ImageJ软件,根据选定

的13个解剖学坐标之间的直线距离,共测量出26个框架结构可量性状(精确到0.001 mm)。

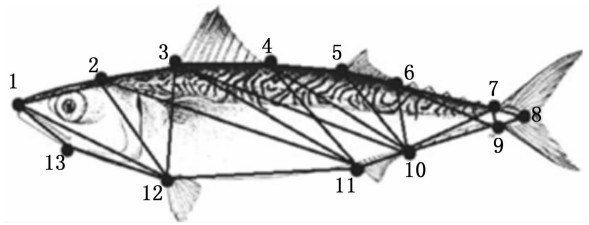


图1 13个标点所构建的鲈属鱼类框架结构测量图^[15]

Fig.1 Locations of 13 landmarks for constructing the truss network of fish (filled circle) and morphometric lengths

注:1. 吻前端; 2. 神经颅后侧面(后颈鳞片开始); 3. 第一背鳍基部起点; 4. 第一背鳍基部末端; 5. 第二背鳍基部起点; 6. 第二背鳍基部末端; 7. 尾鳍背部起点; 8. 椎骨柱的后端; 9. 尾鳍腹部起点; 10. 臀鳍基部末端; 11. 臀鳍基部起点; 12. 腹鳍基部起点; 13. 上颌最后点

Note: 1. anterior tip of snout; 2. most posterior aspect of neurocranium (beginning of scaled nape); 3. origin of the first dorsal fin; 4. end of first dorsal fin; 5. origin of second dorsal fin; 6. end of second dorsal fin; 7. dorsal origin of caudal fin; 8. posterior end of vertebrae column; 9. ventral origin of caudal fin; 10. end of anal fin; 11. origin of anal fin; 12. origin of ventral fin; 13. posteriormost point of maxillary

1.2.2 耳石图像获取及轮廓提取

将干燥后的耳石放入显微镜下进行观察,运用Olympus光学显微镜的10倍镜头下的CCD软件进行拍照,所获得的图片用于进一步分析(图2)。本实验均选择左侧耳石的形态数据进行研究,若有左侧耳石丢失的情况,则选择右侧耳石替代。通过剔除破损严重的耳石,最终取得日本鲈耳石为71个,澳洲鲈为81个。

使用R程序中的“shapeR”加载包^[16]对耳石目标进行轮廓提取,自动读取两鱼耳石轮廓数据,每个耳石轮廓被读取为连续的坐标点,共1000个,这些坐标点通过一系列傅立叶分析方法最后以谐波值的形式表现出耳石的轮廓。CAMPANA和CASSELMAN^[17]认为20组傅立叶谐波值就能较为完整地描述和模拟出耳石轮廓。因此,本研究选取20组傅立叶谐波值,每组谐波值由4个系数构成,这样每个耳石样本就能得到80个傅立叶系数。同时,由于傅立叶形态特征值对图形化耳石比较敏感(主要在位置、大小和方向等方面),因此所得出的谐波值需要经过标准化处理,才能应用于随后的数据分析中。在标准化的过程

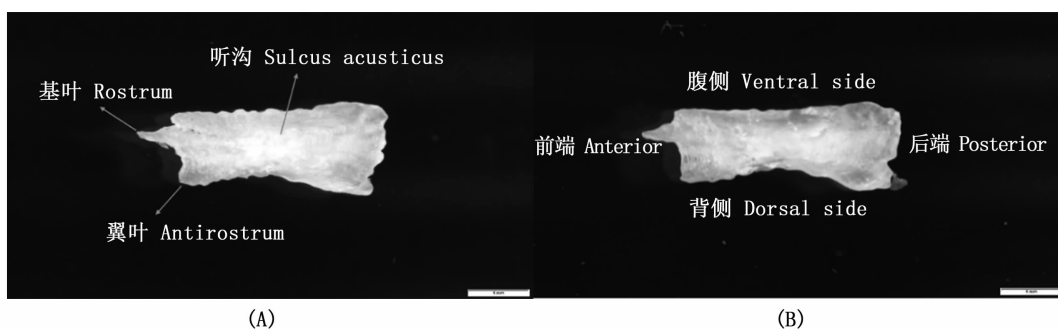


图2 两种鲈属鱼类耳石形态结构

Fig. 2 Morphology of otolith for two *Scomber* species

注:A. 日本鲈;B. 澳洲鲈

Note: A. *S. japonicus*; B. *S. australasicus*

中每个耳石样本前3个系数值均为常数($A1 = 1$, $B1 = C1 = 0$), 这样每个耳石外部轮廓由77个傅立叶系数组成, 此数据将进行后续逐步判别分析。

1.3 数据分析

1.3.1 鱼体形态数据分析

1) 形态分析应不受尺寸的影响, 避免对结果的误解。因此, 利用相对生长测定法^[18] (allometric method) 对每条鱼的26个可量性状数据进行标准化处理:

$$M_{adj} = M(L_s / L_o)^b$$

式中, M_{adj} 为可量性状标准化后的数据; M 为各可量性状标准化前的数据; L_s 为本样品叉长的平均值; L_o 为各种类个体的叉长; b 为每个样本的 $\lg M$ 对 $\lg L_o$ 斜率。

2) t 检验。运用 R 语言对两种鲈属鱼类的26个可量性状分别进行 t 检验, 根据 P 值的大小来判断它们是否存在差异^[11]。

3) 逐步判别分析 (stepwise discriminant analysis, SDA)。利用 SPSS17.0 软件中的逐步判别分析方法建立两种鲈属鱼类的判别公式:

判别准确率计算如下:

$$P_a = \frac{A}{B} \times 100\%$$

综合判别率计算如下:

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n B_i}$$

式中, P_a 为判别准确率; P_c 为综合判别率; A 是指该分组所测量的实际个体数; B 是指被判为该分组的个体数; A_i 是指第 i 个分组中判别正确的个体数; B_i 是指第 i 个分组的实际个数; n 为分组

数。

1.3.2 耳石形态数据分析

首先将耳石外部轮廓所测得的77个系数用 Levene's 法进行方差齐性检验, 去除非齐性的参数, 然后进行正态检验, 随后将剩余的参数进行逐步判别分析 (SDA), 挑出适合的因子, 建立判别函数, 并计算判别正确率和总的正确率, 计算公式同上。

2 结果与分析

2.1 基于框架测量法的外形分析

2.1.1 两种鲈属鱼类可量性状的初步比较

表2列举了日本鲈与澳洲鲈经过标准化处理后的可量性状方面的实验结果, 通过比较日本鲈与澳洲鲈的平均值, 可以得出两种鱼类在4-5、11-12、1-12、3-11、3-10、4-11和4-10中的值相差较大 (≥ 10.00), 且日本鲈的值均小于澳洲鲈的值; 在7-8、8-9、10-11、13-1和7-9中的值相差较小 (≤ 3.00)。

对26个可量性状进行 t 检验, 结果表明, 两种鱼类在10-11中差异不显著, 在其余的可量性状中差异极显著。

2.1.2 基于外形参数对两种鲈属鱼类的判别分析

通过逐步判别分析进行分类, 运用 Wilks' Lambda 法对26个可量性状进行筛选, 最终选择了4个可量性状 (1-2、10-11、2-11和3-11) 来对两种鲈属鱼类进行分类。以这4个可量性状为自变量建立判别函数, 具体如下:

日本鲈:

$$Y = 2.895X_1 - 0.051X_2 + 2.029X_3 - 0.237X_4$$

-187.301

澳洲鲈:

$$Y = 3.125X_1 - 0.248X_2 + 2.279X_3 - 0.051X_4$$

-248.182

将两种鲈属鱼类的可量性状分别代入上述判别函数中,得到两个函数值 Y 。其中判别函数中哪个函数值 Y 最大,则其对应的种类便是该样

本所属的种类。从判别的结果来看,在初始判别中,日本鲭的判别正确率为 85.40%,澳洲鲈的判别正确率为 89.20%,总体正确率为 87.60%。经过交叉验证得出的结果与初始判别结果近似,日本鲭与澳洲鲈的判别正确率分别为 82.90% 和 88.30%,总体正确率为 86.70% (表 3)。

表 2 日本鲭与澳洲鲈可量性状之间的比较

Tab. 2 Comparison of morphometric characteristics of *S. japonicas* and *S. australasicus*

形态值 Morphometrics	日本鲭 <i>S. japonicus</i>			澳洲鲈 <i>S. australasicus</i>			t	P
	最大值 Max	最小值 Min	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	最大值 Max	最小值 Min	平均值 ± 标准差 Mean ± SD		
1-2	59.814	38.945	46.512 ± 3.502	61.196	37.793	50.468 ± 4.250	-7.184	<0.01
2-3	69.984	32.708	41.534 ± 6.783	69.406	39.755	50.913 ± 4.364	-10.991	<0.01
3-4	39.397	18.793	31.534 ± 4.306	48.455	14.813	36.516 ± 5.043	-7.488	<0.01
4-5	64.655	31.112	42.735 ± 6.131	77.723	40.392	53.373 ± 5.888	-12.239	<0.01
5-6	34.849	11.867	21.426 ± 4.411	35.081	9.625	24.720 ± 5.576	-4.651	<0.01
6-7	66.169	33.113	49.014 ± 5.784	75.952	45.311	57.587 ± 6.321	-9.907	<0.01
7-8	21.324	9.420	12.905 ± 2.169	21.630	10.398	15.463 ± 2.383	-7.864	<0.01
8-9	20.963	9.129	13.332 ± 2.431	23.441	10.582	16.106 ± 2.425	-7.931	<0.01
9-10	57.408	33.919	44.981 ± 5.261	68.326	43.421	53.663 ± 5.459	-11.282	<0.01
10-11	27.947	10.547	20.117 ± 3.757	30.784	9.637	20.749 ± 4.614	-1.064	>0.05
11-12	109.758	66.390	88.514 ± 8.077	119.142	88.217	105.323 ± 5.781	-16.128	<0.01
12-13	72.866	37.862	49.644 ± 5.675	66.219	45.913	57.362 ± 3.777	-10.730	<0.01
13-1	39.810	27.125	34.788 ± 2.600	44.890	31.084	37.665 ± 2.918	-7.306	<0.01
1-12	105.294	69.477	83.364 ± 5.833	107.998	82.891	94.275 ± 5.073	-13.676	<0.01
2-12	71.013	45.505	55.629 ± 4.993	71.483	54.668	63.293 ± 3.514	-11.946	<0.01
2-11	157.999	104.559	128.710 ± 9.730	165.761	136.054	152.683 ± 6.965	-19.092	<0.01
3-12	143.068	42.491	50.788 ± 10.845	64.659	47.419	56.951 ± 3.389	-4.953	<0.01
3-11	107.830	73.785	90.938 ± 6.991	122.452	86.069	108.763 ± 5.873	-18.859	<0.01
3-10	129.134	86.904	105.875 ± 7.810	144.081	73.684	123.475 ± 10.966	-13.253	<0.01
4-11	84.023	52.972	64.998 ± 6.298	100.775	64.730	78.653 ± 5.854	-15.486	<0.01
4-10	95.676	56.130	76.910 ± 7.597	118.789	74.507	92.393 ± 7.198	-14.451	<0.01
5-10	53.401	30.422	43.367 ± 4.324	61.340	40.859	50.339 ± 4.073	-11.458	<0.01
6-10	41.418	24.568	32.087 ± 3.425	47.011	29.634	37.682 ± 3.315	-11.487	<0.01
6-9	68.729	36.530	51.224 ± 5.496	76.844	46.601	59.845 ± 6.048	-10.452	<0.01
7-10	64.781	33.357	48.129 ± 6.029	73.825	41.717	57.353 ± 5.610	-10.921	<0.01
7-9	9.657	5.060	7.087 ± 0.937	11.492	5.900	8.147 ± 1.098	-7.317	<0.01

注: $P < 0.01$ 为差异极显著; $P < 0.05$ 为差异显著; $P > 0.05$ 为无显著差异

Note: $P < 0.01$ means extremely significant differences; $P < 0.05$ means significant differences; $P > 0.05$ means no significant difference

表 3 基于框架测量法的两种鲈属鱼类判别分析结果

Tab. 3 Result of classification between *S. japonicas* and *S. australasicus* based on truss network system by SDA

逐步判别分析 SDA	种类 Species	种类 Species		总计 Total	正确率/% Accuracy	总正确率/% Total accuracy
		日本鲭 <i>S. japonicus</i>	澳洲鲈 <i>S. australasicus</i>			
初始判别 Original	日本鲭 <i>S. japonicus</i>	70	12	82	85.40	87.60
	澳洲鲈 <i>S. australasicus</i>	13	107	120	89.20	
交叉验证 Cross-validation	日本鲭 <i>S. japonicus</i>	68	14	82	82.90	86.70
	澳洲鲈 <i>S. australasicus</i>	14	106	120	88.30	

2.2 傅里叶分析

2.2.1 耳石形态特征与重构

两个物种的平均耳石示意图如图3所示。两种鲈属鱼类耳石总体轮廓呈瓦状,耳石前端基叶长而尖,翼叶宽而短;耳石的背侧凹陷,腹侧则比较平直;耳石后端宽大,较为平滑。耳石前端比较开阔,中间窄,后端又逐渐变宽,达到最宽。

比较两种鲈属鱼类耳石,可以看出日本鲈与澳洲鲈的耳石形态存在一定的差异。其中,日本鲈的耳石略小于澳洲鲈,在耳石后端(0~90°和270~360°)尤为明显。澳洲鲈在耳石约30~60°和300~330°的部位,显得更为宽大(图3)。

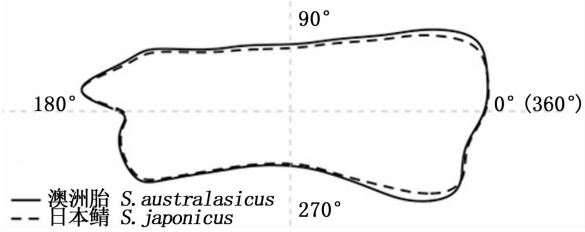


图3 基于傅立叶分析的两种鲈属鱼类耳石模拟平均形态示意图

Fig.3 Simulation of mean otolith morphology for two *Scomber* species based on Fourier analysis

2.2.2 判别分析

用逐步判别分析对两种鲈属鱼类进行分类,通过正态检验和方差齐性检验,将剩余入选的因子用 Wilks' Lambda 法进行筛选,最终选择了7个参数(V8、V20、V24、V25、V32、V37、V40)来对两种鲈属鱼类进行分类。以这7个参数为自变量建立判别函数,具体如下:

日本鲈:

$$Y = 175.275 \times V8 + 4\,613.253 \times V20 + 8\,149.713 \times V24 + 4\,349.258 \times V25 + 10\,084.571 \times V32 + 7\,846.587 \times V37 + 159\,845.258 \times V40 - 2\,910.117$$

澳洲鲈:

$$Y = 220.534 \times V8 + 4\,767.894 \times V20 + 8\,199.587 \times V24 + 4\,158.658 \times V25 + 10\,254.627 \times V32 + 7\,549.861 \times V37 + 160\,158.439 \times V40 - 2\,957.456$$

将两种鲈属鱼类样本所挑选出的傅里叶谐波值分别代入上述判别函数中,得到两个函数值Y。其中判别函数中哪个函数值Y最大,则其对应的种类便是该样本所属的种类。从判别的结果来看,所得的总正确率均比框架测量法所得的总正确率高。在初始判别中,日本鲈的判别正确率为91.50%,澳洲鲈的判别正确率为93.80%,总体正确率为92.40%。经过交叉验证得出的结果与初始判别结果近似,日本鲈与澳洲鲈的判别正确率分别为87.30%和91.30%,总体正确率为90.20%(表4)。

3 讨论

3.1 可量性状初步比较分析

传统形态测量法对鱼体的形态描述主要是通过鱼体的头部、尾部和横纵方向进行测量分析,但是这些测量并不能全面的包含关于鱼体形状变化的信息,因而不能有效地区分不同鱼类的形态差异^[19-20]。而框架测量法则能克服这一缺点,利用鱼体的形态特征,在鱼体轮廓边缘选取一定数量的点,根据这些点连接成线,可以把鱼体划分为多个部分,从而更能全面的包含关于鱼体形状变化的信息。目前,海萨等^[21]利用框架测量法对鲈属鱼类进行了研究,结果显示伊犁鲈(*Perca schrenki*)与黄金鲈(*P. flavescens*)和河鲈(*P. fluviatilis*)在形态上有较大的差距,从而表明了相对于传统形态测量法,框架测量法更加适用于鱼类的形态学研究;孟立霞^[22]利用框架测量法对雅砻江5种裂腹鱼类进行形态学差异研究,结果表明这5种裂腹鱼类存在显著的形态学差异,可以被有效辨别,也证实了框架测量法的优越性。

表4 基于傅里叶分析的两种鲈属鱼类判别分析结果
Tab.4 Result of classification between *S. japonicas* and *S. australasicus* based on Fourier analysis by SDA

逐步判别分析 SDA	种类 Species	种类 Species		总计 Total	正确率/% Accuracy	总正确率/% Total accuracy
		日本鲈	澳洲鲈			
		<i>S. japonicus</i>	<i>S. australasicus</i>			
初始判别 Original	日本鲈 <i>S. japonicus</i>	65	6	71	91.50	92.40
	澳洲鲈 <i>S. australasicus</i>	5	76	81	93.80	
交叉验证 Cross-validation	日本鲈 <i>S. japonicus</i>	62	9	71	87.30	90.20
	澳洲鲈 <i>S. australasicus</i>	7	74	81	91.30	

唐启升^[3]认为:每年春季,鲈鱼从东海南部的越冬场向浙江近海的产卵场做生殖洄游,性发育成熟的个体就地产卵,产卵结束后游向外海索饵,夏末秋初鲈鱼一般位于东海北部和黄海南部。而春季性腺未发育成熟的鲈鱼继续北上。春末夏初,鲈鱼进入黄海产卵,产卵结束后在当地索饵,度过夏季和秋季。秋末,鲈鱼南下洄游,冬季返回越冬场。本文采用框架测量法对东海南部的两种鲈属鱼类的形态差异进行研究,并利用相对生长测定法来对数据进行标准化,从而消除异速生长对结果的影响。研究表明,在26个可量性状数据的平均值中,有超过一半的数据在统计分析中存在差异,这些数据均表明日本鲭与澳洲鲈在形态上存在着明显的差异。在这些可量性状中,差异主要集中在鱼的头部与躯干部。日本鲭的头部和躯体部分均小于澳洲鲈。头部的差异可能是受到食性和摄食行为的影响^[23],鲈属鱼类具有鳃耙和牙齿,既可以摄食浮游动物又可以捕食鱼类等其他动物,但其摄食的种类及比重有所差异^[4]。躯干部的差异有可能与游泳活动能力强弱相关,两种鲈属鱼类栖息水层的不同可能影响了它们的游泳能力。

对26个可量性状进行逐步判别分析,最终选定了4个可量性状来对两种鲈属鱼类进行分类。这4个可量性状包含了鱼的头部(1-2)和躯干(10-11、2-11、3-11),从而对鲈属鱼类形态进行判别分析。从结果可以发现,利用框架测量法对两种鲈属鱼类进行判别分析是有效可行的。这一结果与邵峰等^[24]对东黄海鲈属鱼类形态差异研究结果相符合。因此东海两种鲈属鱼类在形态上差异明显,且不同部位的差异也各有所不同。

3.2 傅里叶分析

耳石是鱼类在生长过程中沉积在内耳的结石,主要成分为碳酸钙,对鱼类声音接收和平衡定向起着重要的作用。随着鱼类的生长,耳石也不断地生长,且一旦形成一定的形状,就很少会发生吸收、变形和分解的现象,结构稳定,被广泛应用于不同种类的鱼类耳石形态鉴别中^[25-29]。从形态上看,日本鲭的耳石与澳洲鲈的耳石存在着一定的差异,尤其是在耳石后端部分(图3)。目前针对耳石形态较为广泛使用的除了传统测量法外,傅立叶分析以其简单易懂和可模拟形态

的特点,广泛应用于各种种类鉴别中。方舟等^[12]利用传统形态测量法与傅立叶分析对西非沙丁鱼(*Sardina pilchardus*)和金色沙丁鱼(*Sardinella aurita*)的耳石形态差异进行分析,结果能很好地对种类进行区分,并且发现傅立叶分析法更加准确、可靠。本研究是利用傅立叶分析对两种鲈属鱼类进行判别分析,从结果来看,初始判别的正确率大于90%,经交叉验证后,判别率略微减少,但也高于85%。初始判别分析与交叉验证的总正确率近似,均大于90%。

由此可见,利用框架测量法对两种鲈属鱼类的判别分析与耳石的傅立叶分析结果一致,均表明日本鲭与澳洲鲈差异明显。值得一提的是,利用傅立叶分析得出的判别总正确率比基于框架测量法的判别总正确率提高了3%~5%,这可能是由于鱼体在捕捞、运输过程中受到一定的损坏,而耳石是在鱼体内部,结构稳定,不易遭到破坏,这也说明了耳石作为判别材料的可靠性。

4 小结

本文采取框架法对鱼体形态进行判别分析,再采取耳石的傅立叶分析进行验证,结果表明这两种方法都适用于鲈属鱼类鉴别,同时傅立叶方法对耳石的判别分析比框架测量法在判别正确率上有所提升,说明耳石傅立叶分析可以更好地用于鱼类种类判别,可以在今后的研究中进行推广。在今后的研究中,可利用框架法对不同种类的鱼进行鉴别并结合耳石的傅立叶分析进行验证,从而使结果更加严谨、准确。

参考文献:

- [1] TSUJITA T, KONDO M. Some contributions to the ecology of the mackerel and the oceanography of the fishing grounds in the East China Sea[J]. Bulletin of the Seikai Regional Fisheries Research Laboratory, 1957(93):6-47.
- [2] KU J F, TZENG W N. Age and growth of spotted mackerel, *Scomber australasicus* (Cuvier), in the shelf waters of northeastern and southwestern Taiwan[J]. Journal of the Fisheries Society of Taiwan, 1985,12(2):12-26.
- [3] 唐启升. 中国专属经济区海洋生物资源与栖息环境[M]. 北京:科学出版社,2006:957-975.
TANG Q S. Marine biological resources and habitat environment in China's exclusive economic zone

- [M]. Beijing: Science Press, 2006: 957–975.
- [4] 李 纲, 陈新军. 东黄海鲈鱼资源评估与管理决策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 22–35.
LI G, CHEN X J. Study on assessment and management decision-making of mackerel resources in the East Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 2011: 22–35.
- [5] STARKS E C. An inconsistency in taxonomy[J]. Science, 1921(54): 222–223.
- [6] ABE T, TAKASHIMA Y. Differences in the number and position of two kinds of fin-supports of the spinous dorsal in the Japanese mackerels of the genus *Pneuma tophorus* [J]. Japanese Journal of Ichthyology, 1958(7): 1–11.
- [7] 丁仁福, 俞连福, 颜尤明. 东海区渔业资源调查和区划[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1987: 392–401.
JING R F, YU L F, YAN Y M. Investigation and regionalization of fishery resources in the East China Sea[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1987: 392–401.
- [8] 陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 27–32.
CHEN X J. Fishery resource biology and fishing [M]. Beijing: Ocean Press, 2004: 27–32.
- [9] CADRIN S X. Advances in morphometric identification of fishery stocks [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2000, 10(1): 91–112.
- [10] 李思发, 李晨虹, 李家乐. 尼罗罗非鱼品系间形态差异分析[J]. 动物学报, 1998(4): 75–82.
LI S F, LI C H, LI J L. Analysis of morphological variations among strains of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Acta Zoologica Sinica, 1998(4): 75–82.
- [11] 刘楚珠, 严利平, 李建生, 等. 基于框架法的东黄海日本鲭产卵群体形态差异分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(4): 908–917.
LIU C Z, YAN L P, LI J S, et al. Morphological differences between breeding stocks of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China and Yellow Seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(4): 908–917.
- [12] 方 舟, 叶旭昌, 李凤莹, 等. 摩洛哥南部沿岸两种沙丁鱼耳石形态识别的初步研究[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(3): 448–455.
FANG Z, YE X C, LI F Y, CHEN X J. Using otolith morphology to identify *Sardinella aurita* and *Sardina pilchardus* in south coastal waters of Morocco [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(3): 448–455.
- [13] 魏 联, 朱国平. 基于椭圆傅里叶分析的次南极电灯鱼矢耳石形态多样性[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 3078–3086.
WEI L, ZHU G P. Otolith morphological diversity of *Electrona carlsbergi* based on elliptical Fourier analysis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 3078–3086.
- [14] 方华华, 李 翔, 董晓煜. 傅里叶分析在江鳕矢耳石形态中的应用[J]. 水产科学, 2017, 36(3): 364–368.
FANG H H, LI X, DONG X Y. Application of Fourier shape analysis in sagittae of burbot [J]. Fisheries Science, 2017, 36(3): 364–368.
- [15] ERGUDEN, D, OZTURK B, ERDOGAN Z A, et al. Morphologic structuring between populations of chub mackerel *Scomber japonicus* in the black, Marmora, Aegean, and northeastern Mediterranean seas [J]. Fisheries Science, 2010, 74(6): 129–135.
- [16] LIBUNGAN L A, PÁLSSON S. ShapeR: An R package to study otolith shape variation among fish populations [J]. Plos One, 2015, 10(3): e0121102.
- [17] CAMPANA S E, CASSELMAN J M. Stock discrimination using otolith shape analysis [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1993, 50(5): 1062–1083.
- [18] REIST J. An empirical evaluation of several univariate methods that adjust for size variation in morphometric data [J]. Canadian Journal of Zoology, 1985(63): 1429–1439.
- [19] HUMPHRIES J M, BOOKSTEIN F L, CHERNOFF B, et al. Multivariate discrimination by shape in relation to sizes [J]. Systematic Zoology, 1981(30): 291–308.
- [20] BOOKSTEIN F L. Foundations of morphometrics [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1982(13): 451–470.
- [21] 海 萨, 李家乐, 冯建彬, 等. 基于多变量形态度量学和线粒体 Cyt b 序列的鲈属鱼类分类探讨[J]. 动物学研究, 2008(2): 113–120.
HAI S, LI J L, FENG J B, et al. Systematics of *Perca* species based on multivariate morphometrics and mitochondrial cytochrome b gene variation analysis [J]. Zoological Research, 2008(2): 113–120.
- [22] 孟立霞. 5 种(亚种)裂腹鱼类的形态学差异研究[J]. 凯里学院学报, 2007(3): 25–29.

- MENG L X. Morphological variations and discriminant analysis of five species (subspecies) of Schizothoracinae [J]. Journal of Kaili University, 2007(3):25-29.
- [23] CLARK F L S. The environment and the genotype in polymorphism [J]. Zoological Journal of the Linnean Society, 1976, 58(3): 255-262.
- [24] 邵 锋,陈新军,李 纲,等. 东黄海鲈鱼形态差异分析[J]. 上海水产大学学报,2008(2):204-209.
SHAO F, CHE X J, LI G, *et al.* Morphological variations and discriminant analysis of *Scomber japonicus* and *Scomber australasicus* in the Yellow Sea and East China Sea [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008(2):204-209.
- [25] 方华华,董晓煜,李 翔,等. 2 种耳石分析法在 3 种鲷科鱼类中的应用 [J]. 海洋湖沼通报, 2017(3):98-105.
FANG H H, DONG X Y, LI X, *et al.* The application of two otolith analysis in three pleuronectidae species [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017(3):98-105.
- [26] 谢桢桢,张化浩,胡良雄,等. 4 种鲈的星耳石形态度量学比较[J]. 华中农业大学学报,2019,38(1):82-90.
XIE Z Z, ZHANG H H, HU L X, *et al.* Comparative studies on multivariate morphometrics of asteriscus of four culters. [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(1):82-90.
- [27] 姜 涛,郑朝臣,黄洪辉,等. 基于地标点法的九江江口和珠江口凤鲚和七丝鲚耳石形态学特征比较 [J]. 南方水产科学, 2018, 14(6):10-16.
JIANG T, DENG C C, HUANG H H, *et al.* Landmark-based morphometric comparison of otolith for *Coilia mystus* and *C. grayii* from Pearl River estuary and Jiulong River estuary [J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(6):10-16.
- [28] 李 波,阳秀芬,邱星宇,等. 基于耳石形态特征的南海鳮乌贼群体判别分析 [J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(2):58-66.
LI B, YANG Q F, QIU X Y, *et al.* Discriminant analysis of purpleback flying squid (*Sthenoeuthis oualaniensis*) groups based on statolith morphology in the South China Sea [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(2):58-66.
- [29] 欧利国,刘必林,方 舟. 基于椭圆傅里叶变换的鱼类矢耳石和听沟形态识别 [J]. 海洋渔业, 2019, 41(4):385-396.
OU L G, LIU B L, FANG Z. Identification of sagittal otolith morphology and sulcus morphology based on elliptic Fourier transform [J]. Marine Fisheries, 2019, 41(4):385-396.

Discriminant analysis of two *Scomber* species in the East China Sea based on shape and otolith morphology

HAN Pei-wu¹, CHEN Xin-jun^{1,3,4,5,6}, FANG Zhou^{1,3,4,5,6}, ZHANG Heng²

(1. College of Marine Sciences of Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 20009, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;

4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 6. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to effectively discriminate between two species of *Scomber* in the East China Sea, the shape and otolith morphology of *Scomber* were analyzed by truss network and Fourier analysis, according to the samples collected from October 2017 to February 2018 in the East China Sea. A total of 26 morphometric characteristics were measured by truss network. The morphological differences between two species of *Scomber* were preliminarily compared by means of average and t-test. Then the otoliths of two species of *Scomber* were analyzed by Fourier analysis and simulated. Finally, The otolith morphology was compared by stepwise discriminant analysis (SDA). The results showed that there were significant difference in 25 of the 26 morphometric characteristics ($P < 0.05$), and no significant difference was found in 1 of the 26 morphometric characteristics ($P > 0.05$). The results of SDA based on truss network showed that 4 of the 26 morphometric characteristics entered in the SDA, and the total correct classification was 86.70%. In the Fourier analysis of otolith, 7 harmonics of 77 ellipse Fourier descriptors (EFDs) entered in SDA, and the total correct classification was 90.20%. Overall, the results obtained by the two methods were identical, which showed that there were obvious differences between *Scomber japonicus* and *Scomber australasicus*. At the same time, the SDA of otolith by Fourier analysis was better than that by truss network in correct classification, which also showed that otolith Fourier analysis can be better used to discriminate fish species.

Keywords: *Scomber*; truss network; otolith; Fourier analysis; stepwise discriminant analysis