

文章编号: 1674 - 5566(2014)03 - 0448 - 08

## 摩洛哥南部沿岸两种沙丁鱼耳石形态识别的初步研究

方 舟<sup>1,2</sup>, 叶旭昌<sup>1,2,3,4</sup>, 李凤莹<sup>1</sup>, 陈新军<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 远洋渔业协同创新中心, 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; 4. 上海海洋大学 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘 要:** 根据 2011 年 6 - 8 月我国拖网船在摩洛哥南部沿岸采集的 46 尾金色小沙丁鱼 (*Sardinella aurita*) 和 53 尾沙丁鱼 (*Sardina pilchardus*) 的耳石样本, 利用传统形态测量法和傅立叶分析法分别进行分析, 对不同的耳石形态进行判别。传统形态测量法测量了 6 个耳石形态参数, 并利用  $t$  检验比较两种沙丁鱼耳石形态差异; 耳石轮廓经图像化处理后利用软件转化为椭圆傅立叶标码 (EFDs), 最后分别采用 6 个耳石形态参数和标准化后的 77 个傅立叶系数进行主成分分析和判别分析。结果表明, 两种沙丁鱼耳石形态在全长 (TL)、宽度 (TW)、背宽 (DW)、腹鳍长 (VL) 中存在显著差异 ( $P < 0.01$ ), 背长 (DL) 和翼叶长 (WL) 不存在差异 ( $P > 0.05$ ); 主成分分析表明, 传统测量法的前两个主成分累积贡献率达 77.0%, 第一、二主成分的最高变量分别为全长 (TL/FL) 和背宽 (DW/FL), 在散点图中显示出了很好的区分性; 而傅立叶分析法中, 前 16 个主成分累积贡献率为 82.8%, 前两个主成分因子仍有较大的重叠, 区分性相对较差。判别分析结果认为, 传统测量法中的 3 个参数值进入了逐步判别分析中, 总判别正确率为 83.76%; 傅立叶分析法的 77 个傅立叶系数中, 有 9 个系数进入了逐步判别分析中, 总判别正确率为 92.02%。总体来看, 相比传统形态测量法, 傅立叶方法在鱼类耳石的判别分析中更为有效。

**研究亮点:** 本文根据西非沿岸捕获的沙丁鱼和金色小沙丁鱼样本, 对其耳石形态的差异进行分析。同时首次利用傅立叶分析对该物种的耳石形态进行判别分析, 较传统的形态测量值而言, 该方法可以提取出更多的微小信息, 因此将正确率提高约 10%, 在今后的研究中值得推广。

**关键词:** 耳石形态; 金色小沙丁鱼; 沙丁鱼; 傅立叶分析; 判别分析

**中图分类号:** S 931.1

**文献标志码:** A

鲱科 (Clupeidae) 隶属于鲱形目 (Clupeiformes), 其下属物种广泛分布于世界各地的沿海地区, 且大多数种类都具有很高的经济价值。在西非沿岸, 风驱使的上升流形成了有较高初级生产力和次级生产力的海域<sup>[1-2]</sup>。作为重要的洄游性经济鱼类, 沙丁鱼 (*Sardina pilchardus*) 和金色小沙丁鱼 (*Sardinella aurita*) 均在此产生大量集群, 因此在西非沿岸也形成了相应的沙丁鱼渔业。此海域渔场面积广阔, 是世界少有的优良渔场之一。近年来, 西非沿岸沙丁鱼的渔获量占该海域中上层渔获物总量的 32%, 金色小沙丁鱼约占 21%, 是该地区继竹筴鱼渔业后的第二大渔

业。其中以摩洛哥海域产量最高, 目前是世界第一大沙丁鱼生产海域<sup>[3]</sup>。

由于金色小沙丁鱼和沙丁鱼的洄游路线以及分布范围有很大的重叠, 不同的季节和不同的区域, 两种鱼类所占的比例也均有所不同, 因此在进行捕捞作业时, 两种沙丁鱼都会有一定量的捕捞, 且较容易混淆<sup>[4]</sup>。目前物种鉴定和种群识别的方法有很多, 包括形态法、生态法、生理法和生化遗传法等<sup>[5]</sup>, 虽然基于分子生物学和遗传学的方法会更有效地进行分类, 但是方法较复杂, 费用昂贵, 不易进行推广<sup>[6]</sup>。形态法以其快捷简便、容易掌握、不需要复杂工具辅助等特点, 广泛

收稿日期: 2013-12-09

修回日期: 2014-02-28

基金项目: 农业部远洋渔业资源调查和探捕-摩洛哥海域沙丁鱼资源探捕 (D-8006-10-0004)

作者简介: 方 舟 (1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为海洋渔业生物学。E-mail: 150368646@qq.com

通信作者: 叶旭昌, E-mail: xcye@shou.edu.cn。

应用于多数物种的鉴定中。但是传统的形态测量法会受到较大的人为影响,使得数据出现一定的不可靠性<sup>[7]</sup>。同时在测量中,一般都是采用径向的测量方法,一些较小的组织(如耳石)上的某些细微变化无法在所测量的数据中体现,也会对分类造成一定的偏差。20 世纪 90 年代初期 BOOKSTEIN<sup>[8]</sup> 和 ROHLF<sup>[9-10]</sup> 等以数学形态学为基础,创立了几何形态测量法,该方法摒弃了数据不同源性以及大小和形状无法分开讨论的缺点,主要分析物体在形状上的差异。其中外形轮廓法以傅立叶分析为基础,通过图像数字化后转化为相应的波谱谱值,再对数据进行常规的统计分析,该方法已经在鲚属(*Coilia* sp.)<sup>[11]</sup>、花鲈(*Lateolabrax* sp.)<sup>[12]</sup>、天竺鱼(*Apogonichthys* sp.)<sup>[13]</sup> 等鱼类的耳石形态识别中有所应用,并且取得了比传统测量法更好的区分效果。因此本文依据 2011 年 6-8 月我国探捕拖网渔船在摩洛哥专属经济区海域采集的沙丁鱼和金色小沙丁鱼耳石样本,利用传统测量法和外形轮廓法分别进行种类识别,为更有效地鉴别鲱科鱼类耳石形态鉴别提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料来源

样本来自上海蒂尔远洋渔业有限公司所属 HUYU855 渔船,总长为 39.20 m,总吨为 413 t,主机功率为 1 492 kW。作业网具采用中层拖网,作业渔法为单拖作业,拖曳时间据渔场鱼群和渔获物数量而定,时间不定,可从 30 min 至 2 h 不等。探捕时间为 2011 年 6-8 月,作业海域为 21°00'N~26°00'N、15°30'W~20°00'W 摩洛哥专属经济区海域。进行随机取样,立即冷冻后带回实验室进行进一步分析。样本基本情况见表 1。

表 1 两种沙丁鱼样本基本信息  
Tab.1 Sample information of *S. aurita* and *S. pilchardus*

种类	叉长范围	尾数	雌性个体	雄性个体
金色小沙丁鱼 <i>S. aurita</i>	167~231 mm	46	35	11
沙丁鱼 <i>S. pilchardus</i>	185~240 mm	53	24	29

### 1.2 生物学测量

根据外部形态的不同,对样本进行分类,然后对分类后的样本进行生物学测量,主要测量鱼

体的叉长(fork length, FL),精确至 1 mm;判断性别,解剖后判定性腺成熟度。性别的确定主要基于对性腺的形状、外观及结构的分析。根据黄海水产研究所改编的《海洋水产资源调查手册》(1981),将性腺成熟度划分为 I-VI 期,并分为性未成熟(I-III 期)、性成熟(IV-V 期)、繁殖后(雄性为排精后,雌性为产卵后,VI 期)3 个等级。随后将耳石从平衡囊内取出,并用水清洗去除表面的杂质。通过均值检验(独立样本 *t* 检验)发现,两种沙丁鱼的左右耳石的形态均不存在差异( $P>0.05$ ),因此本研究均选择右耳石来进行后续研究。

### 1.3 耳石测量

#### 1.3.1 传统径向测量

首先将右耳石置于 Olympus 光学显微镜  $\times 10$  倍下用 CCD 拍照,然后使用 WT-Tiger3000 图像分析软件,先沿水平和垂直 2 个方向进行校准,之后分别测量以下 6 个耳石形态参数值:全长(total length, TL),宽度(total width, TW),背长(dorsal length, DL),背宽(dorsal width, DW),腹鳍长(ventral length, VL),翼叶长(wing length, WL),见图 1。测量结果精确至 0.01 mm,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,否则取它们的平均值<sup>[10]</sup>。

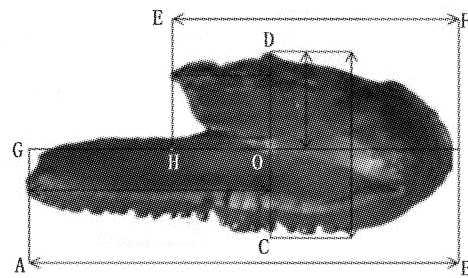


图 1 沙丁鱼属耳石测量示意图

Fig.1 Schematic of measurement of otolith for *S. aurita* and *S. pilchardus*

O 为核心;AB 为全长;CD 为宽度;EF 为背长;DO 为背宽;GO 为腹鳍长;HO 为翼叶长。

#### 1.3.2 外形轮廓提取

采用 TpsDig2.16 软件中的轮廓目标选项,自动逐一读取耳石轮廓数据,每个耳石轮廓被描述为 1 500 个连续的坐标点(x,y),随后分别保存为 TPS 数据文件。接着利用 TPSTOEFA 插件将 TPS 文件转换为 EFAWin 标准化程序可读的 DTA

文件类型,再用 EFAWin 读取 DTA 文件,图 2 表面在不同谐值组的情况下,两种沙丁鱼耳石轮廓模拟“真实”耳石形态的过程。CAMPANA 认为 20 组谐值已能较好地描述耳石轮廓<sup>[14]</sup>,因此,本文取 20 组傅立叶谐值,每一组谐值由 4 个形态系数(coefficients, C),分别用 A、B、C、D 表示,即每个耳石样品轮廓特征由 80 个系数组成。通过 EFAWin 导出具有傅立叶谐值的 OUT 文件,最后

由 TOMINI 插件导出相应的文本文档(.txt),导入 EXCEL 文档中进行后续分析。

由于傅立叶形态特征值对图形化耳石较为敏感(主要在位置、大小和方向等方面),因此所得出的谐值需经过标准化处理,方能应用于随后的数据分析中。经过标准化处理后,前 3 个系数为常数( $A1 = 1, B1 = C1 = 0$ )。最终每个耳石外部轮廓由 77 个系数组成,用于逐步判别分析。

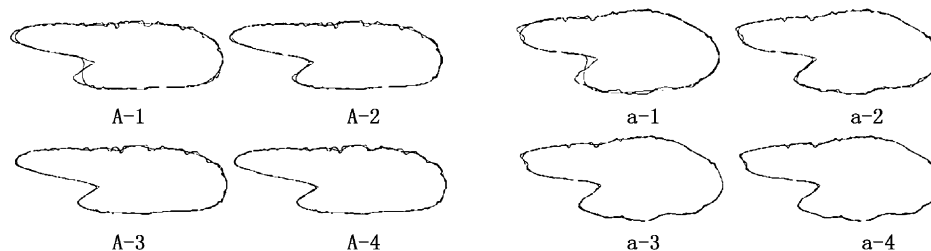


图 2 基于傅立叶分析法的两种沙丁鱼耳石形态重构图

Fig. 2 Reconstruction of morphology of otolith for *S. aurita* and *S. pilchardus* based on Fourier analysis

A-1 ~ A-4 分别为金色小沙丁鱼 5、10、15、20 组谐值耳石重构图; a-1 ~ a-4 分别为沙丁鱼 5、10、15、20 组谐值耳石重构图,光滑线为模拟重构轮廓,不规则线为真实轮廓。

#### 1.4 数据处理

(1) 对两种沙丁鱼耳石进行归类统计,利用均值差异检验(独立样本  $t$  检验),用 Levene's 法进行方差齐性检验,不满足齐性方差时对数据进行反正弦或者平方根处理,同时进行正态检验,对不同种类耳石的各项测量指标进行差异性分析。

(2) 为消除异速生长对耳石形态参数的影响,将 6 个测量参数均除以叉长做标准化处理,将标准化后的参数进行主成分分析(principal component analysis, PCA),选取其中的主要因子,并做出因子关系散点图。

(3) 采用逐步判别分析法(stepwise discriminant analysis, SDA),对两种不同的沙丁鱼进行判别分析,建立判别函数,并计算判别正确率。计算方法参照文献[15]。

(4) 利用傅立叶分析,首先将耳石轮廓提取出的 77 个有效系数用 Levene's 法进行方差齐性检验,剔除不满足方差齐性的参数,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),最后利用逐步判别分析,挑选出合适的因子,建立判别函数,并计算正确率。

以上所有统计方法均用 SPSS 17.0V 进行,作图使用 MS Excel 2010 操作。

## 2 结果

### 2.1 两种沙丁鱼耳石描述与参数统计

两种沙丁鱼耳石形态如图 3。金色小沙丁鱼耳石总体轮廓较为扁平,长宽比较大,耳石表面有较多的突起,核心部有较深的凹陷,耳石开口深,腹喙长较长,生长轮纹较难观察(图 3a);沙丁鱼耳石轮廓浑圆,背部较为突起,表面光滑,核心部较浅,耳石开口较浅,腹喙长较短,生长轮纹隐约可见(图 3b)。从肉眼观察来看,两种沙丁鱼的耳石形态存在一定的差异。

从统计结果来看(表 1),在渔获个体大小相似的情况下,金色小沙丁鱼的耳石各项指标的平均值均小于沙丁鱼。通过均值检验(独立样本  $t$  检验)后发现,全长、宽度、背宽、腹喙长这 4 项指标在两种沙丁鱼耳石形态中存在显著差异( $P < 0.01$ ),而背长和翼叶长则不存在差异( $P > 0.05$ )。金色小沙丁鱼的这两个参数的最大值和最小值也都大于沙丁鱼的同类值,与其他参数有所不同(表 2)。

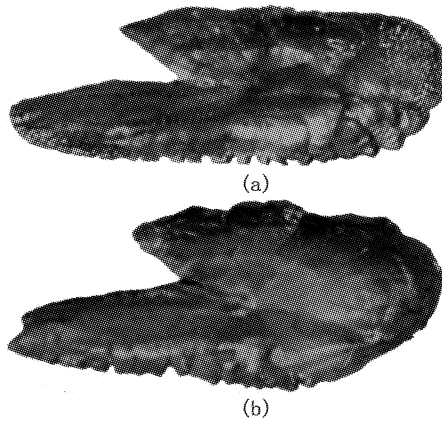


图3 金色小沙丁鱼(a)与沙丁鱼(b)耳石内侧面形态特征  
Fig.3 Morphological characters of otolith for *S. aurita* (a) and *S. pilchardus* (b)

2.3 传统形态测量分析

2.3.1 主成分分析

主成分分析的结果显示,两种沙丁鱼耳石参数值的前2个主成分累计贡献率已达77.0%。其中第一主成分的特征值为2.686,解释了总变异的44.77%。从主成分分析得分来看,第一主成分在全长的变量上得分最高,而第二主成分最高的则是背宽,因此说明两种沙丁鱼在全长和背宽两个形态参数上出现了较大的分化(表3)。

两种沙丁鱼耳石形态指标第一、二主成分因子散点图见图4。根据图4中点的分布可以发现,在第二主成分因子即可将金色小沙丁鱼和沙丁鱼进行较好的区分。从图中可以看出,第一主成分和第二主成分在两种沙丁鱼之间均没有大量的重叠,显示出了较好的区分性。

表2 两种沙丁鱼耳石测量参数比较

Tab.2 Comparison of otolith morphology of *S. aurita* and *S. pilchardus*

参数/mm	金色小沙丁鱼 <i>S. aurita</i>			沙丁鱼 <i>S. pilchardus</i>			P
	最大值	最小值	均值±标准差	最大值	最小值	均值±标准差	
全长 TL	4.38	2.93	3.56±0.35	4.46	3.03	3.85±0.31	<0.01
宽度 TW	2.01	1.15	1.38±0.17	2.03	1.26	1.71±0.13	<0.01
背长 DL	3.63	2.17	2.61±0.30	3.19	2.06	2.70±0.27	>0.05
背宽 DW	1.04	0.54	0.71±0.11	1.26	0.68	0.96±0.11	<0.01
翼叶长 WL	1.50	0.75	1.02±0.16	1.40	0.54	1.05±0.19	>0.05
腹鳍长 VL	2.33	1.60	1.94±0.19	2.97	1.75	2.15±0.25	<0.01

注:P>0.05 为无明显差异;P<0.01 为差异极显著。

表3 传统测量法对两种沙丁鱼耳石形态的主成分分析  
Tab.3 Principal analysis of otolith morphology for *S. aurita* and *S. pilchardus* based on traditional measurement

形态参数	主成分	
	1	2
全长/叉长 TL/FL	0.848	-0.126
宽度/叉长 TW/FL	0.592	0.709
背长/叉长 DL/FL	0.626	-0.655
背宽/叉长 DW/FL	0.471	0.796
翼叶长/叉长 WL/FL	0.584	-0.588
腹鳍长/叉长 VL/FL	0.814	0.081
特征值	2.686	1.934
累计贡献率/%	44.77	77.00

2.3.2 判别分析

用逐步判别分析对沙丁鱼进行分类,Wilks' Lambda 法对6个参数值进行筛选,最终选择了背宽(DW/FL)、背长(DL/FL)和宽度(TW/FL)3项参数来对两种沙丁鱼进行分类,其方差分析的结

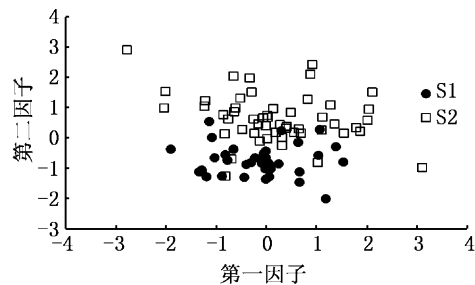


图4 基于传统形态测量法两种沙丁鱼主成分因子分布图

Fig.4 Scatter plot of scores on the 1st and 2nd principal components of *S. aurita* and *S. pilchardus*  
S1 为金色小沙丁鱼,S2 为沙丁鱼。

果均表明对三项指标有显著贡献(P<0.01)。采用这三项指标建立判别函数,具体公式如下:

$$\text{金色小沙丁鱼: } Y = 14384.599 \times DW/FL + 13663.674 \times DL/FL + 460.083 \times TW/FL - 145.322$$

沙丁鱼:  $Y = 16414.184 \times DW/FL + 12376.650 \times DL/FL + 3016.542 \times TW/FL - 154.398$

将两种沙丁鱼样本所挑选出的耳石形态指标带入上述判别函数中,则该样本归入所得 Y 值较大的函数为其所对应的类别。从判别结果来

看,金色小沙丁鱼判别正确率为 84.78%,沙丁鱼为 88.68%,总体正确率为 86.73%。交互验证的结果与初始判别结果类似,金色小沙丁鱼和沙丁鱼分别为 82.61% 和 84.92%,总体正确率为 83.76% (表 4)。

表 4 基于传统测量法的两种沙丁鱼判别分析结果

Tab. 4 Result of classification between *S. aurita* and *S. pilchardus* based on traditional measurement by SDA

逐步判别分析	种类	种类		总计	正确率/%
		金色小沙丁鱼 <i>S. aurita</i>	沙丁鱼 <i>S. pilchardus</i>		
初始判别	金色小沙丁鱼	39	7	46	84.78
	<i>S. aurita</i>				
	沙丁鱼	6	47	53	88.68
交互验证	<i>S. pilchardus</i>				
	金色小沙丁鱼	38	8	46	82.61
	<i>S. aurita</i>				
	沙丁鱼	8	45	53	84.92
	<i>S. pilchardus</i>				

## 2.4 傅立叶分析

### 2.4.1 主成分分析

主成分分析的结果显示,两种沙丁鱼耳石参数值的前 16 个主成分累计贡献率已达 82.82%。其中前 4 个主成分解释了总变异的 50.52%,前 10 个主成分解释了总变异的 72.02% (表 5)。从主成分分析得分来看,前 16 个主成分中得分较高的变量依次为 B5、B2、A14、D1、D15、C17、A19、C12、C11、A18、A20、A17、C14、D16、D9、D3。

表 5 傅立叶分析法对两种沙丁鱼耳石形态的主成分分析

Tab. 5 Principal analysis of otolith morphology for *S. aurita* and *S. pilchardus* based on Fourier analysis

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	17.983	23.354	23.355
2	8.968	11.646	35.001
3	6.482	8.418	43.420
4	5.468	7.101	50.521
5	3.774	4.901	55.422
6	3.666	4.761	60.183
7	2.766	3.592	63.776
8	2.353	3.056	66.832
9	2.122	2.756	69.588
10	1.870	2.429	72.017
11	1.704	2.213	74.230
12	1.585	2.058	76.288
13	1.419	1.843	78.130
14	1.298	1.686	79.816
15	1.164	1.511	81.328
16	1.151	1.495	82.823

两种沙丁鱼耳石形态指标第一、二主成分因子散点图如图 5。根据图中点的分布可以发现,两种沙丁鱼在第一因子的方向上有一定的区别,但是区别不大。从图中可以看出,第一主成分和第二主成分在两种沙丁鱼之间仍然存在较多的重叠,区分性相对较差。

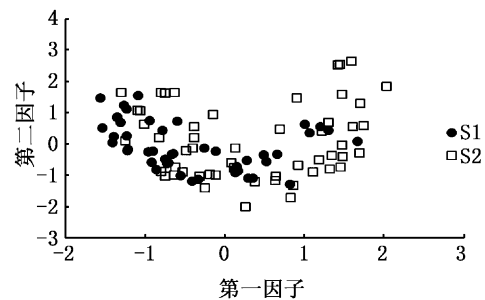


图 5 基于傅立叶分析法两种沙丁鱼主成分因子分布图  
Fig. 5 Scatter plot of scores on the 1st and 2nd principal components of *S. aurita* and *S. pilchardus*  
S1 为金色小沙丁鱼, S2 为沙丁鱼。

### 2.4.2 判别分析

用逐步判别分析对沙丁鱼进行分类,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 D1、C4、D4、C5、C7、A8、B8、B10、C18 九项参数来对两种沙丁鱼进行分类,其方差分析的结果均表明 9 项指标有显著贡献 ( $P < 0.01$ )。采用这 9 项指标建立判别函数,具体公式如下:

金色小沙丁鱼:  $Y = 719.934 \times D1 - 259.608 \times C4 - 1318.700 \times D4 + 713.761 \times C5 - 426.194 \times C7 + 910.845 \times A8 + 893.113 \times B8 + 70.565 \times B10 + 107.253 \times C18 - 173.679$

沙丁鱼:  $Y = 803.321 \times D1 - 95.896 \times C4 - 978.469 \times D4 + 944.333 \times C5 - 56.804 \times C7 + 181.156 \times A8 + 555.752 \times B8 - 490.393 \times B10 - 395.211 \times C18 - 201.110$

将两种沙丁鱼样本所挑选出的傅立叶谐值

带入上述判别函数中,则该样本归入所得 Y 值较大的函数为其所对应的类别。从判别结果来看,正确率均比传统测量法所得的结果有较大的提升。金色小沙丁鱼判别正确率为 95.65%,沙丁鱼为 94.34%,总体正确率为 95.00%。交互验证的结果与初始判别结果类似,金色小沙丁鱼和沙丁鱼分别为 93.48% 和 90.57%,总体正确率为 92.02% (表 6)。

表 6 基于傅立叶分析的两种沙丁鱼判别分析结果

Tab. 6 Result of classification between *S. aurita* and *S. pilchardus* based on Fourier analysis by SDA

逐步判别分析	种类	种类		总计	正确率/%
		金色小沙丁鱼 <i>S. aurita</i>	沙丁鱼 <i>S. pilchardus</i>		
初始判别	金色小沙丁鱼 <i>S. aurita</i>	44	2	46	95.65
	沙丁鱼 <i>S. pilchardus</i>	3	50	53	94.34
交互验证	金色小沙丁鱼 <i>S. aurita</i>	43	3	46	93.48
	沙丁鱼 <i>S. pilchardus</i>	5	48	53	90.57

### 3 分析与讨论

#### 3.1 传统形态测量分析

耳石是一种钙化组织,主要成分为碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )和微量元素<sup>[16]</sup>,且生长伴随鱼的终生;其形成有一定的规律性<sup>[17]</sup>,不易被再吸收,形态结构稳定,是一种种类鉴别的良好研究材料<sup>[18]</sup>。利用主成分分析和判别分析等多元统计方法,将测量的形态参数进行分析,能更好地分析耳石变化的特征,并且对其进行分类。这些方法已经广泛应用于鱼类耳石形态的研究中<sup>[11-13]</sup>。本研究中,采用并测量了两种沙丁鱼耳石的 6 个形态参数,均能较好地表示出其形态的变化。全长(TL)、宽度(TW)、背宽(DW)、腹鳍长(VL)四个参数在两种沙丁鱼中均存在显著差异( $P < 0.01$ ),主成分分析结果认为,两种沙丁鱼主要在全长和背宽两个参数指标上发生了分化。这个特点在肉眼观察耳石图片中也有所发现(图 3)。逐步判别分析的正确率均达到 80% 以上,有着较好的判别效果。对于两个不同的种类来说,造成耳石形态差异最主要的原因就是遗传因素,基因的不同,使得其形成了完全不同的形态特征<sup>[19]</sup>。而通过传统的径向测量法,可以较好地分辨出不

同种类之间的差别,这在其他鱼类耳石形态分辨上也有类似的结果<sup>[20-21]</sup>。

#### 3.2 傅立叶分析

鱼类的耳石形态并不规则,在边缘存在着很多的突起和凹陷。因此传统的形态测量法无法检测到这些微小的变化,而某些微小的变化可能会对判别的结果产生影响。本研究中,前 10 个谐值已经基本可以描绘两种沙丁鱼耳石的形态,而 10-20 个谐值则能更好地描绘出耳石形态的细节(图 2)。CAMPANA 对大西洋鳕(*Gadus morhua*)耳石轮廓进行傅立叶分析后发现,前 10 组谐值已能解释 99.9% 的耳石形态<sup>[14]</sup>,侯刚等<sup>[22]</sup>对北部湾金线鱼(*Nemiptery sp.*)的耳石形态研究也发现了类似的规律。主成分分析结果显示,前 20 组谐值中,前 10 组谐值仅占 31.25%,前 15 组谐值占 62.5%;散点图的结果也有较多的重合,第一主成分和第二主成分并不能很好地地区分两种沙丁鱼。CAMPANA 在分析大西洋鳕种群时认为,在傅立叶分析中最重要的是 2-5 组谐值,第 8 个谐次之后的谐值已经几乎不能说明问题<sup>[14]</sup>,这与本研究有较大的差别。主要可能是因为其研究的内容是针对种群内的判别,而本研究是针对两个不同的种类,且耳石本身形

态存在一定的差异所致。而在判别分析的结果中,其判别分析正确率均超过了 90%,比基于传统形态测量的判别正确率提高了近 10%。说明傅立叶分析对耳石形态的识别具有一定的优势,这在李辉华等<sup>[20]</sup>的研究中也有所体现。在选出的 9 项参数中,有 7 项是在前 8 组谐值内的,占了 77.8%,判别效果和主成分分析有较大的差异。这可能是因为主成分分析是一种非约束性方法,该方法的降维思想所形成的梯度是虚拟的,而判别分析是一种约束性方法,所形成的梯度是实际存在的,在实际应用中,主成分分析可能会对其中的一些因子造成误判,从而影响到结果,因此判别分析的结果显得更为可靠<sup>[23]</sup>。

本文对摩洛哥南部海域捕获的两种沙丁鱼耳石形态进行比较,利用传统形态测量法和傅立叶分析法分别进行判别分析,成功地进行了种类判别,同时对两种方法进行比较,提出了相对更为可靠的分析方法。研究可以发现,两种鱼类耳石的形态差异较为明显,利用传统的形态测量法也有较高的判别正确率,但由于耳石较小,往往测量时会存在一定的误差;利用傅立叶分析法将正确率提升了 10%,该方法的误差较小,可以在今后的研究中推广。同时在今后的研究中,我们应该更加注意个体大小对鱼类耳石的影响<sup>[22,24]</sup>,不同地理环境条件下对耳石生长的影响<sup>[25]</sup>,利用微量元素分析法对鱼类耳石在不同阶段的生活情况进行详细分析,结合地标点等方法对耳石的形态变化进行图形化处理<sup>[26]</sup>,因此能更加深入的研究耳石形态变化的原因。

#### 参考文献:

- [1] FURNESTIN J, FURNESTIN M L. La reproduction de la sardine et de l'anchois des côtes atlantiques du maroc (saisons et aires de ponte) [J]. Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes, 1959, 23(1): 79 - 104.
- [2] ETTAHIRI O. Étude de la phase planctonique de la sardine, *Sardina pilchardus* (Walb.), et de l'anchois, *Engraulis encrasicolus* (L.) des côtes atlantiques marocaines [D]. Université de Bretagne Occidentale, 1996: 262.
- [3] AMENZOU K, FERHAN-TACHINANTE F, YAHYAOU A, et al. Analysis of the cycle of reproduction of *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792) off the Moroccan Atlantic coast [J]. Comptes Rendus Biologies, 2006, 329: 892 - 901.
- [4] ETTAHIRI O, BERRAHO A, VIDY G, et al. Observation on the spawning of *Sardina* and *Sardinella* off the south Moroccan Atlantic coast (21 - 26° N) [J]. Fisheries Research, 2003, 60(2): 207 - 222.
- [5] 陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京:海洋出版社, 2004: 27 - 32.
- [6] MARIANI S, HUTCHINSON W F, HATFIELD E M C, et al. North Sea herring population structure revealed by microsatellite analysis [J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 303: 245 - 257.
- [7] 沈佐锐, 于新文. 昆虫数学形态学研究及其应用展望 [J]. 昆虫学报, 1998, 41(s): 140 - 148.
- [8] BOOKSTEIN F L. Size and shape spaces for landmark data in two dimensions [J]. Statistical Science, 1986, 1(2): 181 - 222.
- [9] ROHLF F J. Relationships among eigenshape analysis, Fourier analysis, and analysis of coordinates [J]. Mathematical Geology, 1986, 18(8): 845 - 854.
- [10] ROHLF F J. Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks [J]. Systematic Biology, 1990, 39(1): 40 - 59.
- [11] 郭弘艺, 魏凯, 唐文乔, 等. 基于矢耳石形态特征的中国鲚属鱼类种类识别 [J]. 动物分类学报, 2010, 35(1): 127 - 134.
- [12] 叶振江, 孟晓梦, 高天翔, 等. 中日两种花鲈 (*Lateolabrax* sp.) 耳石形态的地理变异 [J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(4): 356 - 360.
- [13] 王英俊, 叶振江, 刘群, 等. 细条天竺鱼 (*Apogonichthys lineatus*) 与黑鳃天竺鱼 (*Apogonichthys arafuriae*) 耳石形态识别的初步研究 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(2): 281 - 284.
- [14] 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.
- [15] 李思发, 李晨虹. 尼罗罗非鱼品系间形态差异分析 [J]. 动物学报, 1998, 44(4): 450 - 457.
- [16] 高永华, 李胜荣, 任冬妮, 等. 鱼耳石元素研究热点及常用测试分析方法综述 [J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 11 - 17.
- [17] 窦硕增. 鱼类的耳石信息分析及生活史重建—理论与方法 [J]. 海洋科学集刊, 2007(48): 93 - 113.
- [18] PETURSDOTTIR G, BEGG G A, MARTEINSDOTTIR G. Discrimination between Icelandic cod (*Gadus morhua*) populations from adjacent spawning areas based on otolith growth and shape [J]. Fisheries Research, 2006, 80(2): 182 - 189.
- [19] L'ABÉE-LUND J H, JENSEN A J. Otoliths as natural tags in the systematics of salmonids [J]. Environmental Biology of Fishes, 1993, 36(4): 389 - 393.
- [20] 李辉华, 郭弘艺, 唐文乔, 等. 两种耳石分析法在鲚属种间和种群间识别效果的比较研究 [J]. 淡水渔业, 2013, 43(1): 14 - 18.
- [21] 曾祥波, 张国华. 基于傅立叶耳石形态分析法对几种家鱼仔稚鱼种类判别分析 [J]. 中国水产科学, 2012, 6

- (2): 970–977.
- [22] 侯刚, 冯波, 颜云榕, 等. 北部湾金线鱼, 深水金线鱼与日本金线鱼矢耳石形态识别的初步研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(3): 27–35.
- [23] ANDERSON M J, WILLIS T J. Canonical analysis of principal coordinates: a useful method of constrained ordination for ecology[J]. Ecology, 2003, 84(2): 511–525.
- [24] GAGLIANO M, MCCORMICK M I. Feeding history influences otolith shape in tropical fish[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 278: 291–296.
- [25] REICHENBACHER B, FEULNER G R, SCHULZ-MIRBACH T. Geographic variation in otolith morphology among freshwater populations of *Aphanius dispar* (Teleostei, Cyprinodontiformes) from the southeastern Arabian Peninsula [J]. Journal of Morphology, 2009, 270(4): 469–484.
- [26] 侯刚, 刘丹丹, 冯波, 等. 基于地标点几何形态测量法识别北部湾4种白姑鱼矢耳石形态[J]. 中国水产科学, 2013, 20(6): 1293–1302.

## Using otolith morphology to identify *Sardinella aurita* and *Sardina pilchardus* in south coastal waters of Morocco

FANG Zhou<sup>1,2</sup>, YE Xu-chang<sup>1,2,3,4</sup>, LI Feng-ying<sup>1</sup>, CHEN Xin-jun<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Based on the 46 samples of *Sardinella aurita* and 53 samples of *Sardina pilchardus* taken from the Chinese trawling vessel working in the Morocco coastal waters from June to August in 2011, their otolith morphology was analyzed based on traditional measurement and Fourier analysis. Six of variables were measured on the otolith and differences were compared by *t*-test; digitalized photographs of otolith were transformed to Ellipse Fourier descriptors (EFDs). Finally, six variables and 77 standardized EFDs were analyzed by principal component analysis (PCA) and stepwise discriminant analysis (SDA). The results showed that the total length (TL), total width (TW), dorsal width (DW), and ventral length (VL) had significant differences between two species ( $P < 0.01$ ), whereas dorsal length (DL) and wing length (WL) had no difference ( $P > 0.05$ ). Result of PCA showed that the first and second components made total contribution of mutation for 77.0% by traditional measurement, and the highest variables were total length/fork length (TL/FL) and dorsal width/fork length (DW/FL) respectively, the scatter-plot reveal a good dispersion; there were 16 principal components with 82.8% cumulative contribution by Fourier analysis, but the first two components had too much overlap with a bad separation. SDA showed that three variables of traditional measurement entered in the SDA, total correct classification was 83.76%; 9 harmonics of 77 EFDs entered in SDA with Fourier analysis, and the total correct classification was 92.02%. Overall, Fourier analysis is more effective than traditional measurement in the fish otolith morphology classification.

**Key words:** otolith morphology; *Sardinella aurita*; *Sardina pilchardus*; Fourier analysis; discriminant analysis