

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20053

长江口及邻近海域 4 个不同地理群体凤鲚矢耳石形态差异

宋超^{1, 2, 4}, 杨琴^{1, 3}, 赵峰^{1, 2, 3, 4}, 张涛^{1, 2, 4}, 胡丽娟^{1, 3}, 庄平^{1, 2, 3, 4}

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
2. 农业农村部东海与长江口渔业资源环境科学观测实验站, 上海 200090;
3. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;
4. 上海长江口渔业资源增殖和生态修复工程技术研究中心, 上海 200090

摘要: 为探明相邻海域凤鲚(*Coilia mystus*)群体间的差异性, 分别采集江苏吕四(吕四群体)、上海崇明(崇明群体)、浙江舟山(舟山群体)和浙江温州(温州群体)邻近海域的凤鲚共 240 尾。以凤鲚矢耳石为研究对象, 利用耳石测量法和耳石框架法获得 21 个测量参数, 通过公式转化为 20 个形态指标数据, 并进行多元统计分析。非参数检验显示 4 个群体间 14 个形态指标具有显著性差异($P<0.05$); 应用主成分分析构建了 7 个反映耳石形态特征的主成分, 累计贡献率为 81.79%, 结果显示不同群体耳石的整体形态相似, 各群体间的耳石形态差异主要体现在局部的框架形态指标; 利用贡献率最大的 9 个形态指标构建了 4 个群体的判别方程, 温州群体的判别准确率最高, 为 96.7%, 其次是崇明群体(66.7%)、吕四群体(60.0%)和舟山群体(58.3%); 聚类分析表明崇明和舟山群体距离最近, 其次为吕四群体, 与温州群体距离最远。结果表明, 崇明、舟山和吕四群体间矢耳石形态差异较小, 而温州群体与这 3 个群体的差异最大, 可单独确立为一个生态群体。可见, 短距离洄游性凤鲚不同群体间耳石形态差异大小与群体地理阻隔程度相关。

关键词: 凤鲚; 矢耳石; 耳石形态; 耳石框架; 多元统计分析; 长江口

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)10-1125-11

凤鲚[*Coilia mystus* (Linnaeus, 1758)]隶属于鲱形目(Clupeiformes), 鳓科(Engraulidae), 鳓属, 俗称凤尾鱼、烤籽鱼、籽鲚等, 为河口洄游性鱼类^[1]。凤鲚作为一种短距离洄游性鱼类, 其繁殖群体通常会选择相对较近的河口进行生殖, 由于生活习性的不同以及环境因素的影响, 不同地理群体间往往存在一定差异, 因此对凤鲚资源进行评估和管理, 需要考虑不同地理群体间的差异及联系, 正确鉴别及划分凤鲚群体, 为凤鲚资源保护制定合理的管理单元^[2]。以往的研究都是对地理相隔较远的凤鲚群体进行比较研究。已证实我国

凤鲚至少分为 3 个地方种群, 即长江型、闽江型和珠江型^[3-4], 然而对于地理相隔较近凤鲚群体的差异性研究仅见于个体形态差异方面^[2]。为了更深入地探明邻近水域凤鲚群体的差异性, 还需进行更多的研究证实。

耳石是位于硬骨鱼类头部成对的钙质结构, 其结构形成及变异性受遗传因子及环境因素的影响^[5]。矢耳石在鱼类 3 对耳石中体积最大, 其物种特征最为有效, 多用于鉴定年龄与生长^[6-7]、洄游分布^[8-9]、生境履历^[10-11]和种群结构^[12-13]等相关研究。由于耳石具有独特的形态结构, 其形状、面

收稿日期: 2020-03-04; 修订日期: 2020-04-10.

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目(2017-02-08-00-07-F00075); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD13); 农业农村部农业财政专项(2130135, 2060302); 上海市自然科学基金项目(19ZR1470200).

作者简介: 宋超(1980-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事渔业资源保护和生态修复研究. E-mail: songc@ecsf.ac.cn

通信作者: 赵峰, 研究员, 主要从事河口渔业生态与保护生物学研究, E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn; 庄平, 研究员, 主要从事水生动物生理生态和保护生物学研究, E-mail: pzhuang@ecsf.ac.cn

积、周长、长度及宽度等除了在不同物种中存在差异外，在不同生存环境的同一物种间及同一物种不同群体间也存在一定的差异，目前已广泛应用于鮈属^[14-15]、平鲉属(*Sebastes*)^[16]和膜头鳕属(*Hymenocephalus*)^[17]等同属种类的分化与预测，及短鳍花鮨(*Poecilia mexicana*, *P. sulphuraria*)^[18]、多鳞四指马鲅(*Eleutheronema rhadinum*)^[19]和江鳕(*Lota lota*)^[13]等同种类不同群体的划分。在此基础上，本研究综合利用耳石形态法和耳石框架法对吕四、崇明、舟山和温州 4 个邻近海域凤鲚群体的矢耳石形态进行测量，采用多元统计分析进行差异性比较，旨在探讨应用耳石形态差异对邻近海域凤鲚群体划分的可行性，通过分析不同群体间的差异性来探明长江口凤鲚群体的来源及分布，为长江口不同凤鲚群体划分、凤鲚种质资源保护区划定及管理单元的确立提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究所用 240 尾凤鲚样本分别采自江苏吕四(121°35'51"E; 32°5'49"N)、上海崇明(121°44'57"E; 31°23'22"N)、浙江舟山(122°2'27"E; 29°36'28"N)和浙江温州(120°57'20"E; 28°5'20"N) 4 个邻近海域(图 1)。

采样时间为 2018 年 9—10 月，凤鲚繁殖期基本结束，选取经过了 1 个繁殖周期的 1 龄以上个体，确保其耳石形态相对稳定，获取其左、右矢耳石，分别编号置于 2 mL 离心管中备用(表 1)。

1.2 耳石形态指标测定

利用形态测量法和形态框架法对 4 个群体凤鲚矢耳石样本进行拍照测量。首先，在 OLYMPUS SZX9 光学显微镜下，对矢耳石的形态进行拍照，然后用 Image Pro Plus 6.0 对矢耳石形态参数进行

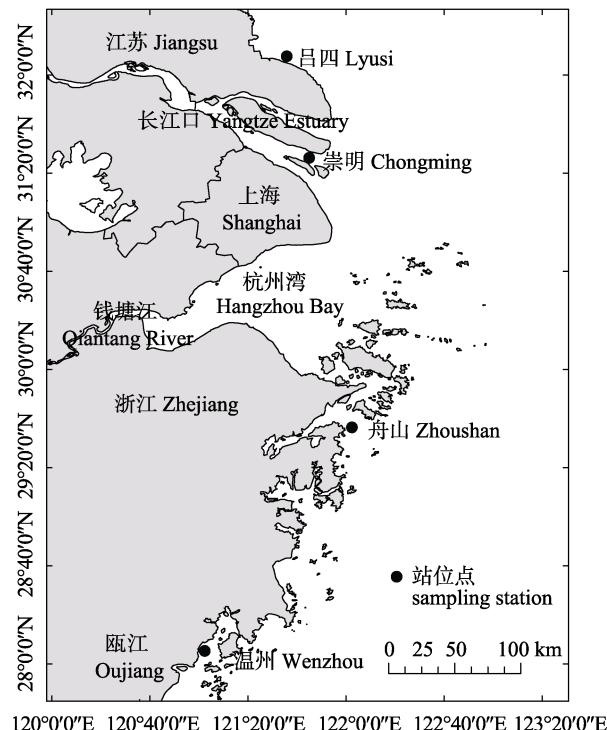


图 1 长江口及邻近海域凤鲚采样位点示意图

Fig. 1 Diagram of sampling stations for *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary and its adjacent waters

测量，包括 8 个尺寸参数：耳石面积、耳石最大半径、耳石最小半径、耳石周长、耳石长、耳石宽、耳石最大 Feret 直径、耳石最小 Feret 直径和 1 个质量参数^[16]，利用 8 个尺寸参数和耳石质量参数通过公式转化获得 9 个测量参数(面密度、圆度、形态因子等)^[13, 20](表 2)。

参照 Turan^[21]的方法对凤鲚矢耳石进行耳石框架测量，获得 12 组耳石框架参数(D_1 ~ D_{12})。为排除耳石大小的影响，将以上 12 组框架参数与 D_3 的比值作为形态度量分析的性状值，获得 11 组框架形态指标(图 2)。

1.3 数据分析

采用 SPSS 25.0 软件对 4 个群体左右矢耳石

表 1 凤鲚样品信息
Tab. 1 Sample information of *Coilia mystus*

群体 population	数量 number	体长/mm body length		体重/g body weight	
		范围 range	$\bar{x} \pm SD$	范围 range	$\bar{x} \pm SD$
吕四 Lyusi (Ls)	60	112~156	130.1±8.93	7.06~15.53	10.80±1.69
崇明 Chongming (Cm)	60	116~157	132.0±10.06	7.26~16.02	10.72±2.41
舟山 Zhoushan (Zs)	60	114~173	126.9±8.38	8.26~24.76	10.13±3.75
温州 Wenzhou (Wz)	60	115~170	135.9±9.06	8.09~26.71	14.32±2.98

表 2 凤鲚耳石的测量参数与形态指标

Tab. 2 Measurement parameters and morphological indices for otoliths of *Coilia mystus*

测量参数 measurement parameter	形态指标 morphological index
面积 area (A)	X_{sd} -面密度 X_{sd} -surface density= OW/A
最大半径 maximum radius (R_{max})	X_{ro} -圆度 roundness= $A(\pi L^2)$
最小半径 minimum radius (R_{min})	X_{ff} -形态因子 format-factor= $(\pi A)P^2$
周长 perimeter (P)	X_{ci} -环状度 circularity= P^2/A
耳石质量 otolith weight (OW)	X_{re} -矩形趋近率 rectangularity= $A/(L \times W)$
耳石长 otolith length (L)	X_{el} -椭圆率 ellipticity= $(L-W)/(L+W)$
耳石宽 otolith width (W)	X_{rr} -半径比 radius ratio= R_{max}/R_{min}
最大 Feret 直径 maximum Feret diameter (F_{max})	X_{fr} -Feret 直径比 Feret ratio= F_{max}/F_{min}
最小 Feret 直径 minimum Feret diameter (F_{min})	X_{ar} -幅形比 aspect ratio= L/W

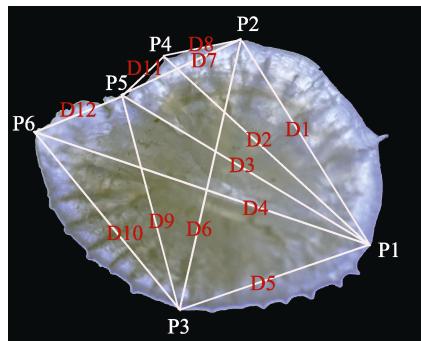


图 2 凤鲚耳石框架测量

P1: 后端顶端; P2: 背部顶端; P3: 腹部顶端; P4: 翼叶顶端;
 P5: 主间沟端点; P6: 基叶端点; D: 各点间直线距离;
 $D_1: P1 \rightarrow P2$; $D_2: P1 \rightarrow P4$;
 $D_3: P1 \rightarrow P5$; $D_4: P1 \rightarrow P6$; $D_5: P1 \rightarrow P3$; $D_6: P2 \rightarrow P3$; $D_7:$
 $P2 \rightarrow P5$; $D_8: P2 \rightarrow P4$; $D_9: P3 \rightarrow P5$; $D_{10}:$
 $P3 \rightarrow P6$; $D_{11}: P4 \rightarrow P5$; $D_{12}: P5 \rightarrow P6$.

Fig. 2 Truss networks for the otolith distance measurements of *Coilia mystus*

P1: posterior point; P2: dorsal point; P3: ventral point;
 P4: antirostrum point; P5: excisural notch point; P6: rostrum point. D: the distance between different points; $D_1: P1 \rightarrow P2$;
 $D_2: P1 \rightarrow P4$; $D_3: P1 \rightarrow P5$; $D_4: P1 \rightarrow P6$; $D_5: P1 \rightarrow P3$;
 $D_6: P2 \rightarrow P3$; $D_7: P2 \rightarrow P5$; $D_8: P2 \rightarrow P4$; $D_9: P3 \rightarrow P5$;
 $D_{10}: P3 \rightarrow P6$; $D_{11}: P4 \rightarrow P5$; $D_{12}: P5 \rightarrow P6$.

的 9 个测量参数和 12 个框架参数进行独立样本 T 检验, 以检验左、右矢耳石间的差异性; 对左矢耳石 20 个形态指标数据进行非参数检验、单因素分析、主成分分析、判别分析和聚类分析等多元统计分析, 探明凤鲚不同群体间的差异性及关联性。

2 结果与分析

2.1 非参数检验和单因素分析

通过对 4 个群体左右矢耳石 9 个测量参数和

12 个框架参数进行独立样本 T 检验, 显示群体内 21 个参数在左、右矢耳石间均无显著性差异($P > 0.05$)。对 4 个群体凤鲚耳石的 20 个形态指标进行非参数检验, 分析群体间矢耳石形态的差异性。结果显示, 4 个群体的耳石形态指标中除 6 组(X_{el} 、 X_{fr} 、 X_{ar} 、 D_5/D_3 、 D_7/D_3 和 D_8/D_3)外, 其他 14 组指标在不同群体间差异显著($P < 0.05$)。对 4 个群体凤鲚耳石的 20 个形态指标做单因素方差分析, 比较不同群体间各指标差异, 发现崇明群体和舟山群体间只有 2 个指标(X_{ro} 和 D_{11}/D_3)差异显著($P < 0.05$), 吕四群体与其他群体间有 2 个指标(D_9/D_3 和 D_{10}/D_3)差异显著($P < 0.05$), 温州群体与其他群体间有 4 个指标(X_{sd} 、 X_{ff} 、 X_{ci} 和 D_2/D_3)差异显著($P < 0.05$)。由差异性指标的平均值比较可知, 舟山群体比崇明群体的耳石圆度更大, 翼叶更突出; 吕四群体的基叶突出不明显, 温州群体的翼叶突出不明显(表 3)。

2.2 主成分分析

为了确定影响凤鲚耳石形态的主要指标, 对 20 个形态指标进行主成分分析, 共获得 7 个主成分(1~7), 累计贡献率为 81.79%, 其中主成分 1 贡献率为 20.96%, 主成分 2~7 的贡献率依次为 18.02%、13.49%、9.97%、7.68%、6.38% 和 5.29% (表 4)。

由表 4 所示, 主成分 1 中贡献最大的 3 个指标为 X_{fr} 、 X_{ar} 和 X_{el} , 主成分 2 中贡献最大的 3 个指标为 D_6/D_3 、 D_4/D_3 、 D_1/D_3 , 主成分 3 中贡献最大的 2 个指标为 D_2/D_3 和 D_5/D_3 。由表 3 可知, 主成分 1 中的主要指标在不同群体间并无显著性差异, 主成分 2 中的主要指标在吕四与崇明和吕四

表3 凤鲚4个群体20个耳石形态指标的平均值及分析结果

Tab. 3 The means and analysis results of 20 otolith morphology indices for 4 populations of *Coilia mystus*n=240; $\bar{x} \pm SD$

指标 index	群体 population				95%置信区间 95% confidence	渐进显著性 P
	吕四 Ls	崇明 Cm	舟山 Zs	温州 Wz		
X_{sd}	0.001±0.000 ^a	0.001±0.000 ^a	0.001±0.000 ^a	0.002±0.000 ^b	0.001–0.001	0.000
X_{ro}	0.875±0.047 ^a	0.867±0.045 ^a	0.903±0.051 ^b	0.859±0.052 ^a	0.869–0.882	0.000
X_{ff}	0.870±0.029 ^a	0.880±0.022 ^a	0.877±0.024 ^a	0.857±0.024 ^b	0.867–0.874	0.000
X_{ci}	14.463±0.508 ^a	14.284±0.364 ^a	14.346±0.402 ^a	14.682±0.406 ^b	14.387–14.501	0.000
X_{re}	0.754±0.036 ^a	0.744±0.032 ^{ab}	0.758±0.036 ^a	0.736±0.026 ^b	0.744–0.752	0.002
X_{cl}	0.046±0.033 ^a	0.044±0.025 ^a	0.034±0.026 ^a	0.044±0.033 ^a	0.038–0.046	0.089
X_{rr}	1.453±0.107 ^a	1.418±0.084 ^a	1.410±0.068 ^a	1.431±0.078 ^a	1.417–1.439	0.134
X_{fr}	0.868±0.041 ^a	0.870±0.032 ^a	0.884±0.031 ^a	0.878±0.044 ^a	0.870–0.880	0.034
X_{ar}	1.100±0.075 ^a	1.094±0.056 ^a	1.071±0.058 ^a	1.094±0.0734 ^a	1.081–1.098	0.089
D_1/D_3	0.777±0.047 ^a	0.807±0.041 ^b	0.788±0.044 ^{ac}	0.7943±0.047 ^{bc}	0.786–0.798	0.002
D_2/D_3	0.980±0.031 ^a	0.988±0.032 ^a	0.976±0.33 ^a	0.960±0.033 ^b	0.972–0.980	0.000
D_4/D_3	1.219±0.039 ^a	1.237±0.040 ^{bc}	1.224±0.038 ^{ab}	1.245±0.033 ^c	1.226–1.236	0.000
D_5/D_3	0.866±0.034 ^a	0.872±0.036 ^a	0.863±0.038 ^a	0.864±0.032 ^a	0.862–0.871	0.767
D_6/D_3	1.260±0.053 ^a	1.291±0.053 ^b	1.274±0.048 ^{ab}	1.295±0.049 ^b	1.273–1.287	0.001
D_7/D_3	0.610±0.056 ^a	0.593±0.037 ^a	0.608±0.046 ^a	0.597±0.047 ^a	0.596–0.608	0.152
D_8/D_3	0.371±0.081 ^a	0.366±0.034 ^a	0.360±0.045 ^a	0.358±0.042 ^a	0.357–0.370	0.690
D_9/D_3	0.935±0.098 ^a	0.977±0.044 ^b	0.990±0.062 ^b	0.991±0.048 ^b	0.964–0.982	0.000
D_{10}/D_3	0.874±0.094 ^a	0.929±0.051 ^b	0.928±0.056 ^b	0.944±0.046 ^b	0.910–0.927	0.000
D_{11}/D_3	0.273±0.038 ^a	0.256±0.036 ^b	0.277±0.034 ^a	0.252±0.038 ^b	0.260–0.269	0.000
D_{12}/D_3	0.360±0.088 ^a	0.370±0.040 ^a	0.368±0.045 ^a	0.386±0.043 ^a	0.364–0.378	0.000

注: 对各变量的解释见表2。同一行不同上标字母表示群体间差异显著($P<0.05$)。Note: Illustration for the variables were shown in tab. 2. The different superscript letters in the same line indicate significant difference among different populations ($P<0.05$).

表4 4个凤鲚群体耳石形态指标的主成分载荷矩阵和贡献率

Tab. 4 Principal component matrix and contribution rates of otolith morphology indices for 4 *Coilia mystus* populations

变量 variable	主成分 principal component						
	1	2	3	4	5	6	7
X_{sd}	-0.085	0.314	-0.142	-0.386	0.187	-0.364	0.175
X_{ro}	-0.665	-0.387	0.149	0.021	-0.189	0.503	0.258
X_{ff}	-0.187	-0.498	0.123	0.728	0.336	-0.132	-0.109
X_{ci}	0.188	0.494	-0.123	-0.729	-0.334	0.137	0.102
X_{re}	0.296	-0.318	-0.181	0.352	-0.262	0.565	0.381
X_{cl}	0.893	0.146	-0.297	0.248	-0.014	-0.069	0.033
X_{rr}	0.531	0.267	0.117	0.026	-0.337	0.294	-0.086
X_{fr}	-0.896	-0.167	0.261	-0.204	0.004	0.009	0.015
X_{ar}	0.894	0.150	-0.298	0.243	-0.017	-0.068	0.029
D_1/D_3	-0.183	0.696	0.028	0.250	0.276	0.209	-0.016
D_2/D_3	0.050	0.201	0.746	0.227	-0.155	-0.135	0.180
D_4/D_3	-0.122	0.766	0.320	0.081	0.036	0.085	0.101
D_5/D_3	0.128	0.259	0.675	0.227	-0.336	-0.162	0.068
D_6/D_3	-0.043	0.769	0.366	0.223	0.202	0.103	-0.022

(待续 to be continued)

(续表 4 Tab. 4 continued)

变量 variable	主成分 principal component						
	1	2	3	4	5	6	7
D_7/D_3	0.489	-0.184	0.587	-0.325	0.358	0.182	-0.119
D_8/D_3	0.426	-0.161	0.513	-0.188	0.444	0.010	0.423
D_9/D_3	-0.475	0.525	-0.477	0.216	0.035	0.080	-0.105
D_{10}/D_3	-0.169	0.576	-0.268	0.019	0.462	0.369	-0.016
D_{11}/D_3	0.192	-0.107	0.413	-0.103	-0.121	0.290	-0.729
D_{12}/D_3	-0.347	0.413	0.090	0.276	-0.496	-0.268	0.017
特征值 characteristic value	4.192	3.604	2.699	1.994	1.535	1.275	1.057
贡献率/% contribution rate	20.96	18.02	13.49	9.97	7.68	6.38	5.29
累计贡献率/% cumulative contribution	20.96	38.98	52.48	62.45	70.12	76.50	81.79

注: 对各变量的解释见表 2.

Note: Illustration for the variables were shown in tab.2.

与温州群体间有差异, 主成分 3 中的主要指标在温州与其他群体间有差异。故由主成分 1 和 2 构成的散点图中(图 3a), 不同群体的主体形态指标高度重叠, 仅有局部指标呈现出差异。在主成分 1 和 2 构成的散点图(图 3a)中, 吕四群体与其他群体间的差异较大, 吕四群体的分布更分散; 而在主成分 2 和 3 构成的散点图(图 3b)中, 主要呈现为吕四和温州与其他群体的差异较大, 而吕四和温州群体各自分布相对集中。由此可见, 通过主成分 1 和 2 构成的散点图, 并不能把 4 个群体有

效地区分, 说明不同群体的耳石整体形态相似, 尤其对于主成分 1 所显示的 3 个形态测量指标(X_{fr} 、 X_{ar} 和 X_{el})在不同群体间并无显著性差异(表 3), 进一步说明不同凤鲚群体间的差异性主要表现在局部的框架形态指标。

2.3 判别分析

对耳石形态指标进行逐步判别分析, 获得以 9 个形态指标为自变量的判别方程, 其中包括 3 个测量形态指标和 6 个框架形态指标(表 5)。从各指标的判别系数可见, 吕四群体 X_{rr} 的系数最大,

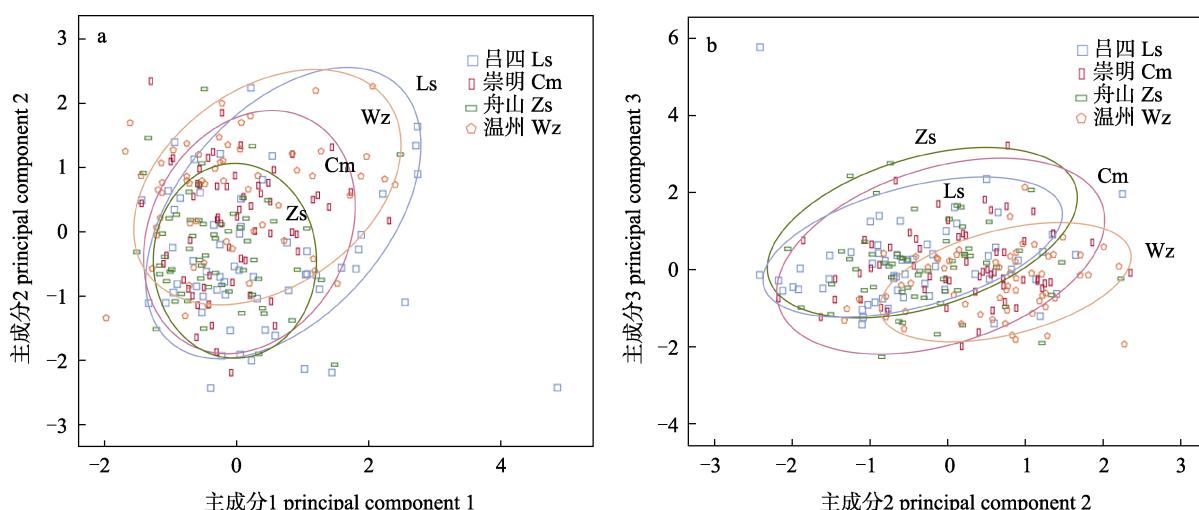


图 3 凤鲚 4 个群体耳石形态指标第 1、2 主成分(a)和第 2、3 主成分(b)散点图

Fig. 3 Scatter diagram of principal component 1 and 2 (a), and principal component 2 and 3 (b) of otolith morphology indices for 4 *Coilia mystus* populations

表 5 凤鲚 4 个群体耳石形态指标的线性判别式函数表
Tab. 5 Linear discriminated functions of otolith morphology indices for 4 *Coilia mystus* populations

指标 index	群体 population			
	吕四凤鲚 Ls	崇明凤鲚 Cm	舟山凤鲚 Zs	温州凤鲚 Wz
面密度 $X_{sd}(X_1)$	79575.949	75003.415	78362.677	95171.400
圆度 $X_{ro}(X_2)$	543.165	536.557	553.718	539.328
形态因子 $X_{rr}(X_3)$	216.779	207.724	209.824	215.650
$D_1/D_3(X_4)$	118.286	129.532	119.966	98.147
$D_2/D_3(X_5)$	687.929	698.096	683.528	599.507
$D_4/D_3(X_6)$	294.171	289.456	288.250	339.978
$D_5/D_3(X_7)$	127.284	137.925	137.528	174.045
$D_{10}/D_3(X_8)$	145.621	158.624	162.330	154.944
$D_{11}/D_3(X_9)$	111.737	102.097	121.753	94.435
常量 constant	-1142.894	-1149.995	-1157.231	-1158.949

D_5/D_3 和 D_{10}/D_3 的系数最小, 主要反映出的耳石特征为以 D_3 为分界线的背部和腹部分布不均衡, 腹部体积较小, 基叶突出不明显; 崇明群体 D_1/D_3 和 D_2/D_3 的系数最大, X_{sd} 、 X_{ro} 和 X_{rr} 的系数最小, 主要反映出的耳石特征为圆度小, 背部和腹部分布不均衡, 背部体积较大, 翼叶突出; 舟山群体 X_{ro} 、 D_{10}/D_3 和 D_{11}/D_3 的系数最大, D_4/D_3 的系数最小, 主要反映出的耳石特征为圆度大, 背部和腹部分布均衡, 主间沟明显, 翼叶和基叶均向主间沟方向靠近; 温州群体 X_{sd} 、 D_4/D_3 和 D_5/D_3 的系数最大, D_1/D_3 、 D_2/D_3 和 D_{11}/D_3 的系数最小, 主要反映出的耳石特征为背部和腹部分布不均衡, 腹部体积较大, 翼叶突出不明显。

由表 5 中的判别式函数表, 建立各群体的判别方程如下:

吕四群体:

$$Y_{Ls}=79575.949X_1+543.165X_2+216.779X_3+118.286X_4+687.929X_5+294.171X_6+127.284X_7+$$

$$145.621X_8+111.737X_9-1142.894$$

崇明群体:

$$Y_{Cm}=75003.415X_1+536.557X_2+207.724X_3+129.532X_4+698.096X_5+289.456X_6+137.925X_7+158.624X_8+102.097X_9-1149.995$$

舟山群体:

$$Y_{Zs}=78362.677X_1+553.718X_2+209.824X_3+119.966X_4+683.528X_5+288.250X_6+137.528X_7+162.330X_8+121.753X_9-1157.231$$

温州群体:

$$Y_{Wz}=95171.400X_1+539.328X_2+215.650X_3+98.147X_4+599.507X_5+339.978X_6+174.045X_7+154.944X_8+94.435X_9-1158.949$$

逐步判别结果显示, 在 4 个群体的 240 尾凤鲚个体中, 总体判别成功率为 70.4%。其中吕四、崇明和舟山群体的判别成功率较低, 均低于 70%, 而温州群体判别成功率最高, 为 96.7%。交互验证结果与逐步判别结果类似(表 6)。吕四、崇明和舟山 3 个群体的个体多混杂在一起, 吕四和舟山均有 21.7% 的个体判为崇明群体, 崇明群体中分别

表 6 凤鲚 4 个群体通过耳石形态指标的判别分析结果

Tab. 6 Results of discriminant analysis for 4 *Coilia mystus* populations by otolith morphology indices

方式 method	群体 population	预测分类 predicted category				判别准确率/% discrimination accuracy	综合判别率/% comprehensive discrimination rate
		Ls	Cm	Zs	Wz		
逐步判别 stepwise discrimination	Ls	36	13	10	1	60.0	70.4
	Cm	10	40	9	1	66.7	
	Zs	7	13	35	5	58.3	
	Wz	1	0	1	58	96.7	
交叉验证 cross verification	Ls	33	13	13	1	55.0	67.1
	Cm	10	40	9	1	66.7	
	Zs	7	16	32	5	53.3	
	Wz	2	1	1	56	93.3	

有 16.7% 和 15% 的个体判为吕四和舟山群体; 但对温州群体而言, 仅有 1.67% 的个体分别判为吕四和舟山群体, 而没有个体判为崇明群体。可见, 吕四、崇明和舟山 3 个群体间的交流较多, 表现为明显的多群体混栖特征, 而温州群体与其他群体间几乎没有交流。

从判别分析散点图的组质心距离可见, 崇明与舟山群体的距离最近, 组质心均位于第 2 象限; 其次为吕四群体, 组质心位于第 3 象限; 而温州群体与其他群体的距离最远, 组质心位于第 1 象限。由判别分析散点图可见, 吕四、崇明和舟山 3 个群体间多有重叠, 而温州群体与其他 3 个群体区分明显, 几乎不与其他 3 个群体混淆(图 4)。

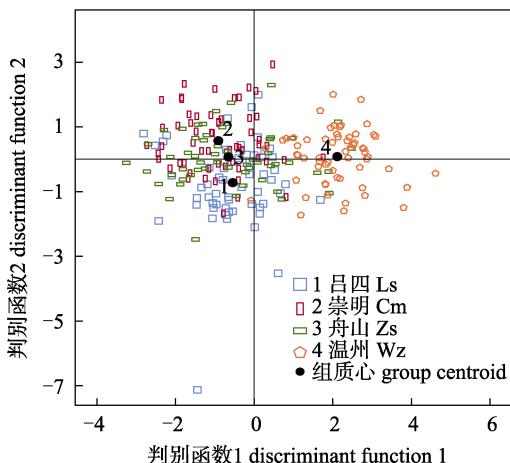


图 4 凤鲚 4 个群体耳石形态指标典型判别分析散点图
Fig. 4 Scatter plot of canonical discriminant scores for morphological indices of otoliths in 4 *Coilia mystus* populations

2.4 聚类分析

对 4 个群体 20 个形态指标的平均值进行系统聚类, 采用组间连接的方法, 以欧氏距离衡量不同群体间的距离(表 7)。可见, 崇明与舟山群体间

表 7 凤鲚 4 个群体耳石形态指标间的欧氏距离

Tab. 7 Euclidean distance among the otolith morphological indices for 4 *Coilia mystus* populations

群体 population	欧氏距离 Euclidean distance			
	1	2	3	4
1 吕四 Ls	-	0.204	0.155	0.248
2 崇明 Cm	0.204	-	0.091	0.401
3 舟山 Zs	0.155	0.091	-	0.345
4 温州 Wz	0.248	0.401	0.345	-

的距离最小, 为 0.091; 崇明与温州群体间的距离最大, 为 0.401。

聚类树状图显示, 崇明群体和舟山群体首先聚为第一小类, 然后吕四群体与第一小类聚为第二小类, 最后与温州群体相聚。可见, 崇明群体与舟山群体的关系最近, 与温州群体关系最远(图 5)。

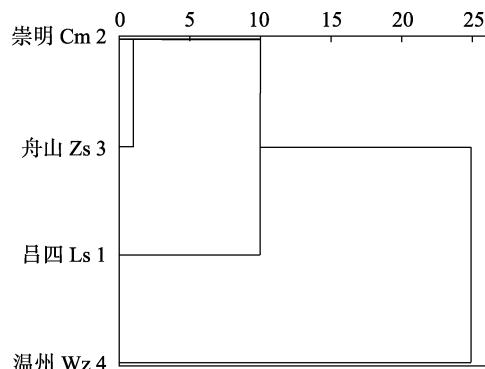


图 5 凤鲚 4 个群体基于耳石形态指标的聚类树状图

Fig. 5 Clustering dendrogram of 4 *Coilia mystus* populations based on otolith morphology indices

3 讨论

3.1 样品选取和数据获取方法

对鱼类种内分化问题的研究是渔业资源保护与管理的基础。鱼类的种内分化主要是指某一物种不同地理群体在繁殖、洄游及生境等方面表现出一定的差异^[22], 这种差异可能使得某一群体的分化达到亚种水平, 对这种差异的研究常利用个体形态、耳石形态、耳石微化学及分子生物学等方法^[23-24]。已有研究表明矢耳石的形态结构在鱼类达到性成熟才趋于稳定^[25-26], 耳石形态结构的不稳定性会影响群体划分, 凤鲚 1 龄即可达性成熟^[27], 本研究均选用经过了 1 个繁殖周期后的 1 龄以上个体作为研究对象, 从而排除了年龄过低对耳石形态分析的影响。矢耳石形态学研究方法作为一种物种鉴别及群体划分的有效手段, 其分析方法通常包括 4 种: 矢耳石形态测量法^[25]、耳石框架法^[15]、地标点法^[28]和椭圆傅里叶分析法^[29]。不同分析方法都可以对群体进行鉴别, 但对不同鱼类的鉴别准确率往往存在一定差异。在对柔鱼类(Ommastrephidae)^[30]的矢耳石进行判别比较中, 认为椭圆傅里叶分析法正确率高于传统

矢耳石形态测量法；但在鲽科鱼类(Pleuronectidae)^[31]的判别中两种方法均具有较高的准确率。以往研究中，鱼类种群的识别和划分多利用矢耳石形态测量法和椭圆傅里叶法，而对鮈属鱼类的种间及种内群体间矢耳石研究中，多使用矢耳石形态测量法^[32-34]和矢耳石框架法^[35]，两种方法各有优势，故本研究选用两种方法相结合来分析长江口及邻近海域 4 个凤鲚群体的差异性。本研究中，4 个凤鲚群体矢耳石各测量参数在左右矢耳石间均无显著性差异，这与大多数洄游性鱼类一致^[13,25,36]，故本研究选取左矢耳石的形态指标进行多元统计分析。

3.2 耳石形态差异及原因探讨

本研究中，单因子方差分析和主成分分析均显示，长江口及邻近海域凤鲚不同群体间耳石的整体形态相似，尤其是主体测量形态指标间差异不显著，各群体间的差异性主要体现在局部的框架形态指标。利用线性函数对不同群体间耳石形态的差异性进行判别，筛选出 9 个差异性指标，其中框架形态指标(6 个)明显多于测量形态指标(3 个)，可见耳石框架法更适合于相邻水域群体间的耳石差异性研究。对不同群体的差异性指标比较可见，舟山群体的圆度最大，耳石的背部和腹部分布均衡，主间沟明显，翼叶和基叶均突出明显；另外 3 个群体的耳石背部和腹部分布不均衡，其中，崇明群体的耳石背部体积较大，翼叶突出；吕四群体的耳石腹部体积较小，基叶突出不明显；温州群体的耳石腹部体积较大，翼叶突出不明显。由判别结果可知，长江口及邻近海域不同群体凤鲚的耳石形态整体差异不明显，总体判别成功率较低(70.4%)，该判别率与卢明杰^[35]对不同群体刀鲚(*Coilia nasus*)的判别率相似(68.28%)，而高于其对短领鲚的判别率(54.25%)。本研究中，除温州群体的判别率较高(96.3%)外，其他 3 个群体的判别率均在 70% 以下。由此可见，吕四、崇明和舟山 3 个群体间的交流较多，表现为明显的多群体混栖特征，而温州群体与其他群体间的交流较少。从组质心距离和欧氏距离可见，温州群体与其他 3 个群体间的组质心距离最远，欧氏距离最大。判别分析散点图和聚类分析树状图呈现

出一致的结果，即崇明与舟山群体的差异最小，其次为吕四群体，而温州群体与其他 3 个群体间具有明显差异，该研究结果与凤鲚个体形态差异分析的结果一致^[2]，可以把温州群体确立为单独的生态群体。

不同群体间耳石形态差异的原因与群体所处的生境条件有关，不同分布水域的水温、盐度、饵料等生境存在较大差异，进而造成不同群体矢耳石在元素沉积过程中形成独特的形态结构^[33,37-39]。吕四、崇明和舟山群体所处的位置较近，其分布的生境条件类似，从而导致了 3 个群体耳石形态表现出较高的同质性，而温州群体处于瓯江北部，与其他群体相隔较远，地理的阻碍以及生活史和环境史的差异导致群体间缺乏交流^[40-41]，从而产生较大的差异。另外，不同群体的耳石形态差异也与洄游习性相关^[42]，凤鲚作为短距离洄游性鱼类，产卵场主要分布在近岸的河口区域^[1]。吕四群体虽处于黄海海域，但吕四附近几乎没有较大的河口，吕四群体在繁殖时期洄游到距离较近的长江口进行繁殖；崇明和舟山群体都可洄游至长江口和钱塘江口进行繁殖；温州群体分布较远，可到瓯江口进行繁殖，几乎不与其他 3 个群体产生混淆^[2]。通过微卫星 DNA 和线粒体 cyt b 基因标记对不同地理群体凤鲚的遗传差异研究表明，长江、闽江和珠江不同地理群体间凤鲚的遗传分化明显，不同群体间的分化可能已达亚种水平^[23-24]。通过对邻近海域不同地理群体凤鲚的个体形态和耳石形态差异分析表明，温州群体与长江口邻近海域其他群体间存在明显差异，但温州群体的分布水域位于长江和闽江之间，其与长江群体间的遗传分化水平还有待进一步研究^[2]。因此，不同群体间的耳石形态差异除了与其地理分布和洄游习性相关外，还与群体间的遗传、环境、自然选择等有关^[37-38,42]。对于短距离洄游的凤鲚，不同群体间耳石形态差异与其地理阻隔程度有关，地理位置相近群体间的生境条件类似，耳石形态差异较小，地理阻隔较远群体间的遗传分化明显，耳石形态差异较大。

本研究采用多元统计分析的方法，对长江口及邻近海域凤鲚群体的耳石形态差异性进行研究，

通过本研究既可筛选相邻群体间耳石的局部形态差异, 又可以对不同来源的群体进行有效划分, 证实了通过耳石形态差异对邻近水域不同凤鲚群体区分的可行性和有效性。通过该研究初步确立了长江口凤鲚群体主要包括吕四群体、崇明群体和舟山群体, 长江口凤鲚资源的管理单元应集中在吕四以南和舟山以北的东海水域为主。研究结果为长江口不同凤鲚群体的划分、凤鲚种质资源保护区的划定及管理单元的确立提供了技术支持和理论依据。

参考文献:

- [1] Zhuang P, Zhang T, Li S F, et al. Fishes of the Yangtze Estuary[M]. 2th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 124-127. [庄平, 张涛, 李圣法, 等. 长江口鱼类[M]. 第 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2018: 124-127.]
- [2] Yang Q, Zhao F, Song C, et al. Analysis of morphological variations among four different geographic populations of *Coilia mystus* in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(3): 294-303. [杨琴, 赵峰, 宋超, 等. 长江口及邻近海域凤鲚 4 个不同地理群体的形态差异[J]. 海洋渔业, 2019, 41(3): 294-303.]
- [3] Cheng Q Q, Ma C Y, Cheng H P, et al. Mitochondrial DNA diversity of *Coilia mystus* (Clupeiformes: Engraulidae) in three Chinese estuaries[J]. Environmental Biology of Fishes, 2008, 83(3): 277-282.
- [4] Zhang S Y. Fauna Sinica. Osteichthyes, Acipenseriformes, Elopiformes, Clupeiformes, Gonorynchiformes[M]. Beijing: Science Press, 2001: 148-154. [张世义. 中国动物志·硬骨鱼纲 鲤形目 海鲢目 鲱形目 鼠鱥目[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 148-154.]
- [5] 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]. Fisheries Research, 2016, 176: 39-47.
- [6] Karlou-Riga C. Otolith morphology and age and growth of *Trachurus mediterraneus* (Steindachner) in the Eastern Mediterranean[J]. Fisheries Research, 2000, 46(1-3): 69-82.
- [7] Megalofonou P. Comparison of otolith growth and morphology with somatic growth and age in young-of-the-year bluefin tuna[J]. Journal of Fish Biology, 2006, 68(6): 1867-1878.
- [8] Yatsu A, Mochioka N, Morishita K, et al. Strontium/Calcium ratios in statoliths of the neon flying squid, *Ommastrephes bartrami* (Cephalopoda), in the North Pacific Ocean[J]. Marine Biology, 1998, 131(2): 275-282.
- [9] Yang J, Arai T, Liu H, et al. Reconstructing habitat use of *Coilia mystus* and *Coilia ectenes* of the Yangtze River estuary, and of *Coilia ectenes* of Taihu Lake, based on otolith strontium and calcium[J]. Journal of Fish Biology, 2006, 69(4): 1120-1135.
- [10] Dou S Z. An introduction to fish otolith research: techniques and applications[M]//*Studia Marina Sinica*. Beijing: Science Press, 2007, 48: 93-113. [窦硕增. 鱼类的耳石信息分析及生活史重建——理论、方法与应用[M]//海洋科学集刊. 北京: 科学出版社, 2007, 48: 93-113.]
- [11] Yang Q, Zhao F, Song C, et al. Habitat history reconstruction of *Coilia mystus* from the Yangtze River Estuary and its adjacent sea area[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(6): 1175-1184. [杨琴, 赵峰, 宋超, 等. 长江口及邻近海域凤鲚生境履历重建[J]. 中国水产科学, 2019, 26(6): 1175-1184.]
- [12] Zhang G H, Dan S G, Miao Z G, et al. Otolith morphology of six Cyprinid species with the use in species and stock discriminations[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1999, 23(6): 683-688. [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.]
- [13] Fang H H, Song L, Gao T X. Morphological comparison in the otolith of burbot (*Lota lota*) from different communities[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(4): 33-39. [方华华, 宋林, 高天翔. 不同群体江鳕耳石形态的差异性分析[J]. 海洋湖沼通报, 2015(4): 33-39.]
- [14] Guo H Y, Tang W Q, Wei K, et al. Morphologic characters of the sagittal otoliths of the fishes of the Genus *Coilia* from China[J]. Chinese Journal of Zoology, 2007, 42(1): 39-47. [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.]
- [15] Jiang T, Yang J, Liu H B, et al. A comparative study of the morphology of sagittal otolith in *Coilia nasus*, *Coilia mystus* and *Coilia nasus taihuensis*[J]. Marine Sciences, 2011, 35(3): 23-31. [姜涛, 杨健, 刘洪波, 等. 刀鲚、凤鲚和湖鲚矢耳石的形态学比较研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(3): 23-31.]
- [16] Zhang F X, Zhang X M, Qin L Z, et al. Sagittae morphology used in the discrimination of the fish of *Sebastodes* and the comparison of sagittal research method[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(4): 28-39. [张凤侠, 张秀梅, 覃乐政, 等. 基于矢耳石形态的平鲉属(*Sebastodes*)鱼类鉴别及研究方法比较[J]. 海洋学报, 2015, 37(4): 28-39.]
- [17] Schwarzhans W. Head and otolith morphology of the genera *Hymenocephalus*, *Hymenogadus* and *Spicomacrurus* (Muraenidae), with the description of three new species[J]. Zootaxa, 2014, 3888(1): 1-73.
- [18] Schulz-Mirbach T, Riesch R, de León F J G, et al. Effects of extreme habitat conditions on otolith morphology: A case study on extremophile live bearing fishes (*Poecilia mexicana*, *P. sulphuraria*)[J]. Zoology, 2011, 114(6): 321-334.
- [19] Yang Y, Zhuang P, Zhang T, et al. Morphological variation

- of *Eleutheronema rhadinum* in four geographical populations along China Coast[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(6): 849-854. [杨阳, 庄平, 张涛, 等. 多鳞四指马鲅 4 个地理群体的形态差异[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(6): 849-854.]
- [20] Fang C, Guo Z M, Xian W W, et al. The application of otolith morphology in life history and group recognition of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in the Yangtze River Estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(8): 57-67. [方聪, 郭治明, 线薇薇, 等. 耳石形态在长江口小黄鱼生活史研究及群体识别中的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(8): 57-67.]
- [21] Turan C. The use of otolith shape and chemistry to determine stock structure of Mediterranean horse mackerel *Trachurus mediterraneus* (Steindachner)[J]. Journal of Fish Biology, 2006, 69(Suppl C): 165-180.
- [22] Zhang K X. Using intraspecific differentiation characteristics of fish to reform China's traditional fish culture system[J]. Freshwater Fisheries, 1985, 15(4): 37, 21. [张亢西. 利用鱼类种内分化特点努力改革我国传统养鱼制度浅谈[J]. 淡水渔业, 1985, 15(4): 37, 21.]
- [23] Cheng Q Q, Ma C Y, Zhuang P, et al. Genetic structure and evolution characters in three populations of *Coilia mystus* based on cytochrome b gene segment sequence of mitochondrial DNA[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(1): 1-7. [程起群, 马春艳, 庄平, 等. 基于线粒体 cyt b 基因标记探讨凤鲚 3 群体遗传结构和进化特征[J]. 水产学报, 2008, 32(1): 1-7.]
- [24] Chen F, Cheng Q Q. Microsatellite DNA diversity of *Coilia mystus* (Clupeiformes: Engraulidae) in three Chinese estuaries[J]. Iranian Journal of Fisheries Sciences, 2012, 11(2): 271-282.
- [25] Yang L L, Jiang Y Z, Lin Y, et al. On sagittal otolith morphology for reproductive population of *Scomberomorus niphonius* in the Xiangshan Bay[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(1): 10-18. [杨林林, 姜亚洲, 林昱, 等. 象山港蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态分析[J]. 海洋渔业, 2018, 40(1): 10-18.]
- [26] Campana S E. Photographic Atlas of Fish Otoliths of the Northwest Atlantic Ocean[M]. Ottawa: Canadian Science Publishing, 2004: 133.
- [27] Wang H H, Zhang T, Song C, et al. Age structure and growth characteristics of reproductive population of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(6): 609-615. [王焕焕, 张涛, 宋超, 等. 长江口凤鲚繁殖群体的年龄结构和生长特性[J]. 海洋渔业, 2016, 38(6): 609-615.]
- [28] Jiang T, Zheng Z 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. [姜涛, 郑朝臣, 黄洪辉, 等. 基于地标点法的珠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.]
- [29] 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. [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.]
- [30] Su H, Fang Z, Chen X J. Comparative study of Ommastrephidae species identification based on statolith shape[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(4): 293-301. [苏杭, 方舟, 陈新军. 基于两种形态学方法的柔鱼类耳石判别比较[J]. 海洋渔业, 2015, 37(4): 293-301.]
- [31] 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. [方华华, 董晓煜, 李翔, 等. 2 种耳石分析法在 3 种鲽科鱼类中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2017(3): 98-105.]
- [32] Guo H Y, Wei K, Tang W Q, et al. Sibling species discrimination for Chinese genus of *Coilia* fishes based on sagittal otolith morphology[J]. Acta Zootaxonomica Sinica, 2010, 35(1): 127-134. [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.]
- [33] Dou S Z, Yu X, Cao L. Otolith shape analysis and its application in fish stock discrimination: A case study[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(4): 702-712. [窦增硕, 于鑫, 曹亮. 鱼类矢耳石形态分析及其在群体识别中的应用实例研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(4): 702-712.]
- [34] Li H H, Guo H Y, Tang W Q, et al. Comparative study of two otolith shape analysis for genus *Coilla* species and stocks identification[J]. Freshwater Fisheries, 2013, 43(1): 14-18. [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.]
- [35] Lu M J. Studies on otolith morphometry and microchemistry of *Coilia nasus* collected from the Poyang Lake[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015. [卢明杰. 鄱阳湖水域刀鲚耳石的形态学和微化学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.]
- [36] Zhang X X, Ye Z J, Wang Y J, et al. Study on otolith morphology of *Chelidonichthys spinosus* in the Qingdao coastal waters[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(4): 622-626. [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.]
- [37] Lombarte A, Leonart J. Otolith size changes related with body growth, habitat depth and temperature[J]. Environmental Biology of Fishes, 1993, 37(3): 297-306.
- [38] 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(2): 158-167.
- [39] Gagliano M, McCormick M I. Feeding history influences otolith shape in tropical fish[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 278: 291-296.
- [40] Petursdottir G, Begg G A, Marteinsdottir G. Discrimination between Icelandic cod (*Gadus morhua* L.) populations from adjacent spawning areas based on otolith growth and shape[J]. Fisheries Research, 2006, 80(2-3): 182-189.
- [41] 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.
- [42] Wang D T. A comparative study of the morphology and bioaccumulation of elements of different geographical populations of *Coilia nasus*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. [王丹婷. 不同水域刀鲚的形态和元素积累特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.]

Otolith morphological variations among four geographic populations of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary and its adjacent waters

SONG Chao^{1, 2, 4}, YANG Qin^{1, 3}, ZHAO Feng^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Tao^{1, 2, 4}, HU Lijuan^{1, 3}, ZHUANG Ping^{1, 2, 3, 4}

1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
2. Scientific Observing and Experimental Station of Fisheries Resources and Environment of the East China Sea and Yangtze Estuary, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200090, China;
3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Shanghai Engineering Research Center of Fisheries Stock Enhancement and Habitat Restoration of the Yangtze Estuary, Shanghai 200090, China

Abstract: To explore differences in the *Coilia mystus* populations of the Yangtze Estuary and its adjacent waters, 240 individuals were collected from four populations of Lyusi (Ls population), Chongming Island in Shanghai (Cm population), Zhoushan (Zs population) and Wenzhou (Wz population). Twenty-one morphological parameters of the sagittal otolith were measured by otolith measurements and the otolith frame method. Twenty morphological indices transformed from the 21 morphological parameters were analyzed by multivariate statistical analyses. Non-parametric tests showed that there were significant differences in 14 of the morphological indices among the 4 populations. Principal component analysis constructed 7 principal components of the otolith morphological characteristics, with a cumulative contribution rate of 81.79%. The overall shape of the otoliths was similar among populations, and the differences were mainly reflected in the local frame morphological indices. The discriminant equation of the 4 populations was constructed using the 9 parameters with the greatest contribution rates. The discriminant accuracy of the Wz population was highest (96.7%), followed by the Cm (66.7%), Ls (60.0%), and Zs populations (58.3%). Cluster analysis showed that the Cm and Zs populations were closest, followed by the Ls population, and the Wz population had the furthest distance. The shape of the sagittal otolith in the Cm population was similar to the Zs and Ls populations, and there were significant differences in the otolith morphology of the Wz population versus the other 3 populations. These results indicate that Wz is an ecological population. Therefore, the differences in otolith morphology between populations of *C. mystus* with short-distance migratory habits are related to their geographical distribution. Otolith shape varied little among geographically close groups with similar habitats but was larger in groups with geographic barriers and genetic differentiation. Variability in the size of the otolith is related to the degree of geographic isolation.

Key words: *Coilia mystus*; sagittal otolith; otolith morphology; otolith frame structure; multivariate statistical analysis; Yangtze Estuary

Corresponding author: ZHAO Feng, E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn; ZHUANG Ping, E-mail: pzhuang@ecsf.ac.cn