

文章编号: 1004 - 2490(2020)03 - 0287 - 09

中国沿海蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态差异

杨林林, 姜亚洲, 刘尊雷, 林 昱, 凌建忠, 李圣法

(中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090)

摘 要: 为阐明中国沿海蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)繁殖群体耳石形态的特异性, 科学判定中国沿海蓝点马鲛繁殖群体的种群归属, 根据2016—2018年4—6月在莱州湾、海州湾、吕四渔场、象山港、沙埕港等蓝点马鲛产卵场采集的242尾2龄蓝点马鲛成熟个体样本, 结合计算出的环率、圆度、椭圆率、矩形趋近率、纵横比、形态因子、半径比和面密度等8个耳石形状指标, 运用相似性分析、非参数多维标度分析、相似性百分比分析探讨了耳石形态的群体间差异。结果显示, 海州湾和吕四渔场蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态不存在显著性差异($P > 0.05$); 象山港和沙埕港蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态不存在显著性差异($P > 0.05$); 渤海、黄海和东海3个海区之间繁殖群体的耳石形态差异均达到了极显著水平($P < 0.01$); 半径比、纵横比、面密度和矩形趋近率是对各个繁殖群体组内相似性贡献度较高的耳石形态典型指标; 面密度、形态因子和半径比则是对各繁殖群体组间相异性贡献度较高的耳石形态分歧指标。通过逐步判别分析建立了5个蓝点马鲛繁殖群体的判别公式, 判别准确率在55.26% ~ 92.59%, 综合判别正确率为71.07%。研究结果表明, 中国沿海蓝点马鲛繁殖群体之间的耳石形态存在显著差异, 渤海、黄海和东海蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态呈现出不同的群体特征, 存在较高的区分度。

关键词: 蓝点马鲛; 中国沿海; 繁殖群体; 耳石; 形态

中图分类号: S 917 **文献标志码:** A

耳石是真骨鱼类生长过程中沉淀在内耳中的一种钙质硬组织, 其形态特征具有显著的种间差异和物种特异性^[1]。耳石形态分析可以定量地解释鱼类种间和群体间的差异, 是物种鉴定和群体区分的一种重要工具, 在鱼类种间和种内判别方面具有良好效果^[2-4]。耳石形态学分析方法主要有可量性状比较法^[5]、椭圆傅里叶分析法^[6-7]、耳石形态指标法等^[8]。同一物种的不同生态群体因受到各自生存环境的胁迫, 在生长和发育方面存在一定差异, 进而影响耳石沉积, 造成群体耳石形态的特异性。

蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)属鲈形目(Perciformes)鲭科(Scombridae)马鲛属, 是一

种暖水性大型中上层经济鱼类, 广泛分布于西北太平洋^[9], 中国的渤海、黄海和东海是其重要产区, 近年来的年渔获量超过40万t^[10]。蓝点马鲛具有长距离洄游习性, 每年在产卵场、索饵场和越冬场之间做季节性洄游。每年的4—6月, 蓝点马鲛繁殖群体陆续从越冬场进入河口、港湾、海岛周围等中国沿海的各个产卵场。分节特征和量度测定的形态学研究将中国沿海的蓝点马鲛划分为黄渤海种群和东海种群^[11-13]; 线粒体DNA和COI序列分析表明东、黄海群体之间没有明显的种群遗传分化^[14-15]; 而核基因组多样性数据(AFLP)分析则显示东、黄海群体之间有显著的地理种群分化^[16]。蓝点马鲛经济价值较

收稿日期: 2019 - 09 - 02

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金(中国水产科学研究院东海水产研究所)资助项目(2016M01); 国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303047); 宁波市重大科技攻关项目(2013C11014)

作者简介: 杨林林(1985—), 男, 江苏南通人, 助理研究员, 从事渔业资源与生态研究。E-mail: seasun107@126.com

通信作者: 李圣法, 研究员。E-mail: shengfa@sh163.net

高,是中国沿海流刺网和拖网作业的重要捕捞对象。科学判定中国沿海各产卵场蓝点马鲛繁殖群体的种群归属,实现资源的可持续利用,成为当前研究的首要任务。本研究以2016—2018年4—6月在莱州湾、海州湾、吕四渔场、象山港、沙埕港等中国沿海蓝点马鲛主要产卵场采集的繁殖群体为研究对象,阐述了中国沿海蓝点马鲛繁殖群体耳石形态的特异性,探讨了耳石形态在中国沿海蓝点马鲛种群判别方面的应用,旨在丰富蓝点马鲛的渔业生物学研究,为中国沿海蓝点马鲛资源的合理利用和科学管理提供理论材料。

1 材料和方法

1.1 样本获取

蓝点马鲛样本于2016—2018年每年的4—6月采集于莱州湾、海州湾、吕四渔场、象山港、沙埕港等产卵场,均为流刺网作业渔获。样本在冰鲜冷藏条件下带回实验室内进行生物学测定。生物学测定的内容包括叉长(fork length, FL,精确到1 mm)、体质量(body weight, BW,精确到1 g)、性腺成熟度等。实验期间共获得性腺成熟度IV期以上的蓝点马鲛性成熟个体322尾,叉长范围在400~1450 mm,体质量范围在640~8220 g。生物学测定后摘取样本的左、右矢耳石,清洗表面后保存于耳石盒中。共获得完整的蓝点马鲛性成熟个体矢耳石301对。因蓝点马鲛繁殖群体左、右耳石形态及雌、雄个体耳石形态不存在显著差异^[17],本研究统一采用左耳石,雌、雄样本合并分析。

1.2 研究方法

1.2.1 耳石形态学测定

耳石超声波清洗后在50℃烘箱中干燥12 h,然后置于室内冷却至恒重。耳石在电子天平上进行称重(精确到1 mg)。因蓝点马鲛耳石属于曲面非对称型耳石,耳石图像采集因角度不同会产生误差,本研究统一将耳石凸面向上、凹面向下置于解剖镜(Nikon SMZ800, ACT-2)下拍摄二维轮廓图形(图1)。利用Image Pro-plus 6.0软件分析耳石轮廓图像,筛选出面积、周长、耳石长、耳石宽、几何中心最长半径、几何中心最短半径等6个尺寸参数,结合耳石质量,计算得出环率、圆度、椭圆率、矩形趋近率、纵横比、形态因子、半径比和面密度等8个形状指标^[18-19]。计算

方法同文献[17]。这8个形状指标在一定程度上可以消除耳石位置、大小等因素对分析结果的影响。

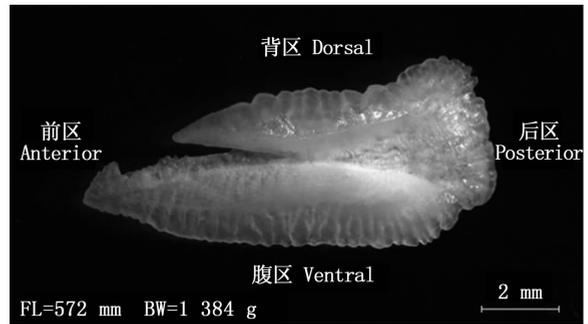


图1 蓝点马鲛矢耳石形态照片

Fig.1 Sagittal otolith of *Scomberomorus niphonius*

1.2.2 耳石年龄鉴定

在完成耳石二维轮廓采集后,将耳石磨片,置于Nikon SMZ800型显微镜下,透射光观察可见明带和暗带相间的年轮。为避免年龄因素对蓝点马鲛耳石形态的影响,实验统一选取2龄的性成熟个体,共计242尾。根据采集海域的不同,将蓝点马鲛样本分为5个繁殖群体组,分别为北海的莱州湾组(G1)、黄海的海州湾组(G2)和吕四渔场组(G3)、东海的象山港组(G4)和沙埕港组(G5)。

1.2.3 数据分析

将耳石形状指标平方根转化及标准化后计算Bray-Curtis相似性系数构建矩阵,利用非参数多维标度(NMDS)排序技术分析蓝点马鲛不同繁殖群体组的耳石形态特征。胁强系数(Stress)为NMDS分析结果的评价标准,当Stress < 0.2时,说明可以用NMDS的二维点图表示,且有一定的解释意义^[20]。

采用单因子相似性分析(ANOSIM)进行不同繁殖群体组间耳石形态差异的显著性检验。运用相似性百分比分析方法(SIMPER)分析造成繁殖群体内相似性的耳石形态典型指标以及造成繁殖群体间相异性的耳石形态分歧指标,计算各形态指标对不同繁殖群体组内相似性和组间相异性的贡献度。通过逐步判别函数分析(DFA)方法筛选测量指标后建立判别函数,计算判别准确率和综合判别率。

统计分析主要通过SPSS 19、PRIMER 7.0等软件完成。

2 结果与分析

2.1 样本组成及耳石形态指标

实验期间,获得的 G1、G2、G3、G4、G5 的样本量分别为 54、46、38、72、32 尾,平均叉长分别为 (568.8 ± 24.2) mm、 (534.8 ± 27.1) mm、 (539.5 ± 30.3) mm、 (583.2 ± 31.9) mm、 (587.1 ± 43.9) mm,平均体质量分别为 (1462.3 ± 440.2) g、 (1140.6 ± 409.2) g、 (1268.5 ± 403.4) g、 (1532.6 ± 518.6) g 和 (1554.1 ± 566.2) g。5 个繁殖群体组耳石形状指标的均值如表 1 所示。

2.2 耳石形态的差异性

ANOSIM 分析结果显示,5 个蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态存在显著性差异 ($R=0.105, P=0.002$)。对繁殖群体进行两两比较后发现,G2 和 G3 的耳石形态不存在显著性差异 ($P>0.05$); G4 和 G5 的耳石形态不存在显著性差异 ($P>0.05$),其他两两之间耳石形态的差异均达到极显著水平 ($P<0.01$) (表 2)。

对蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态数据进行 NMDS 排序,结果显示,胁强系数为 0.12,这说明 NMDS 图能较好地反映各年龄组间耳石形态的相似关系(图 2)。

2.3 耳石形态的相似性和相异性百分比

SIMPER 分析结果显示,G1、G2、G3、G4 和 G5 组内的平均相似性分别为 98.56%、98.48%、98.27%、98.05% 和 98.26%。对 G1 组内相似性贡献较大的耳石形态指标为半径比、纵横比、面密度、矩形趋近率、形态因子和圆度,累积相似性贡献率为 90.31%;对 G2 和 G3 组内相似性贡献率较大的耳石形态指标为半径比、纵横比、面密度、

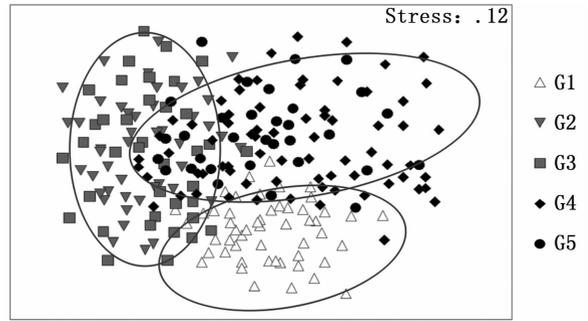


图 2 基于 Bray-Curtis 相似性系数的各繁殖群体耳石形态的 NMDS 排序

Fig. 2 NMDS results for otolith shape of different spawning populations based on Bray-Curtis similarity

矩形趋近率、形态因子、圆度和椭圆率,累积相似性贡献率分别为 97.49% 和 97.75%;对 G4 和 G5 组内相似性贡献率较大的耳石形态典型指标为半径比、纵横比、面密度、矩形趋近率、形态因子和椭圆率,累积相似性贡献率分别为 90.24% 和 90.00%。半径比、纵横比、面密度和矩形趋近率是对各繁殖群体组内相似性贡献度较高的耳石形态典型指标(表 3)。

G1&G2、G1&G3、G1&G4、G1&G5、G2&G3、G2&G4、G2&G5、G3&G4、G3&G5、G4&G5 组间的平均相异性分别为 2.79%、2.78%、2.23%、2.09%、1.61%、2.57%、2.19%、2.54%、2.17%、1.79%。各个繁殖群体组间相异性贡献较大的耳石形态分歧指标不尽相同,主要为面密度、形态因子和半径比(表 4)。各组间相异性贡献百分比在一定程度上反映了蓝点马鲛不同繁殖群体耳石形态的特异性。

表 1 不同繁殖群体的耳石形状参数

Tab. 1 Shape indices of different spawning populations

| 参数 Parameters(±SE) | 繁殖群体 Spawning populations | | | | |
|----------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 |
| 环率 Circularity | 0.015 ± 0.004 | 0.031 ± 0.008 | 0.029 ± 0.007 | 0.017 ± 0.006 | 0.024 ± 0.008 |
| 圆度 Roundness | 0.366 ± 0.020 | 0.382 ± 0.021 | 0.383 ± 0.022 | 0.364 ± 0.020 | 0.366 ± 0.022 |
| 椭圆率 Ellipticity | 0.392 ± 0.024 | 0.371 ± 0.028 | 0.366 ± 0.030 | 0.387 ± 0.026 | 0.387 ± 0.027 |
| 矩形趋近率 Rectangularity | 0.659 ± 0.027 | 0.654 ± 0.029 | 0.648 ± 0.020 | 0.646 ± 0.032 | 0.650 ± 0.035 |
| 形态因子 Form-factor | 0.420 ± 0.034 | 0.475 ± 0.037 | 0.478 ± 0.040 | 0.422 ± 0.045 | 0.429 ± 0.026 |
| 纵横比 Aspect ratio | 2.293 ± 0.126 | 2.185 ± 0.149 | 2.163 ± 0.160 | 2.267 ± 0.144 | 2.270 ± 0.146 |
| 半径比 Radius ratio | 3.705 ± 0.227 | 3.415 ± 0.195 | 3.433 ± 0.202 | 3.756 ± 0.395 | 3.570 ± 0.283 |
| 面密度 Surface density | 1.269 ± 0.104 | 1.056 ± 0.133 | 1.029 ± 0.072 | 1.210 ± 0.364 | 1.132 ± 0.097 |

表 2 不同繁殖群体间耳石形态的相似性分析

Tab. 2 Analysis of similarity test for the otolith shape of different spawning populations

| 检验对象 Test object | R 统计值 R value | 显著性水平 Significance level |
|------------------|---------------|--------------------------|
| G1&G2 | 0.865 | 0.001 |
| G1&G3 | 0.696 | 0.001 |
| G1&G4 | 0.242 | 0.005 |
| G1&G5 | 0.416 | 0.006 |
| G2&G3 | -0.028 | 0.744 |
| G2&G4 | 0.386 | 0.001 |
| G2&G5 | 0.444 | 0.002 |
| G3&G4 | 0.342 | 0.001 |
| G3&G5 | 0.299 | 0.012 |
| G4&G5 | -0.089 | 0.841 |

表 3 繁殖群体内相似性累积贡献率大于 90% 的耳石形态典型指标

Tab. 3 Typifying shape indices with cumulative contributions more than 90% to the within-group similarity

| 参数 Parameters | 繁殖群体 Spawning populations | | | | |
|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 |
| 环率 Circularity | — | — | — | — | — |
| 圆度 Roundness | 8.43 | 8.55 | 8.46 | — | — |
| 椭圆率 Ellipticity | — | 8.36 | 8.44 | 8.57 | 8.54 |
| 矩形趋近率 Rectangularity | 11.11 | 11.22 | 11.27 | 10.96 | 10.99 |
| 形态因子 Form-factor | 8.97 | 9.58 | 9.62 | 8.61 | 8.83 |
| 纵横比 Aspect ratio | 20.18 | 20.38 | 20.55 | 20.75 | 20.71 |
| 半径比 Radius ratio | 25.85 | 25.51 | 25.61 | 26.64 | 26.37 |
| 面密度 Surface density | 15.78 | 13.90 | 13.81 | 14.71 | 14.58 |

注:—为无相似性贡献

Note:— indicates no similarity contribution

表 4 繁殖群体间相异性累积贡献率大于 90% 的耳石形态分歧指标

Tab. 4 Discrimination shape indices with cumulative contributions more than 90% to every two spawning populations dissimilarity

| 参数 Parameters | 繁殖群体 Spawning populations | | | | | | | | | |
|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | G1&G2 | G1&G3 | G1&G4 | G1&G5 | G2&G3 | G2&G4 | G2&G5 | G3&G4 | G3&G5 | G4&G5 |
| 环率 Circularity | 18.90 | 15.39 | 8.80 | 12.10 | 9.08 | 15.58 | 13.48 | 12.23 | 9.97 | 11.10 |
| 圆度 Roundness | 7.29 | 7.29 | 10.72 | 10.63 | 11.80 | 12.33 | 12.84 | 11.49 | 12.07 | 12.05 |
| 椭圆率 Ellipticity | — | 5.73 | — | — | 8.20 | — | — | — | — | — |
| 矩形趋近率 Rectangularity | 5.58 | — | 7.89 | 6.94 | — | 9.51 | 9.35 | 9.30 | 8.85 | 10.18 |
| 形态因子 Form-factor | 14.16 | 13.69 | 12.26 | 8.16 | 11.66 | 20.84 | 20.21 | 20.23 | 19.84 | 15.54 |
| 纵横比 Aspect ratio | 10.31 | 12.62 | 12.27 | 13.24 | 16.42 | 9.29 | 10.02 | 10.84 | 11.65 | 12.53 |
| 半径比 Radius ratio | 9.31 | 9.24 | 15.95 | 13.39 | 15.31 | 14.45 | 13.42 | 14.78 | 13.66 | 15.75 |
| 面密度 Surface density | 29.74 | 30.88 | 26.28 | 29.24 | 20.15 | 13.94 | 15.72 | 16.17 | 18.46 | 17.28 |

注:—为无相异性贡献

Note:— indicates no dissimilarity contribution

2.4 耳石形态的判别分析

对 5 个蓝点马鲛繁殖群体的 8 个耳石形状指标进行逐步判别分析,根据对模型的预测贡献力逐步剔除不相关变量,结果 7 个变量纳入判别分析,各繁殖群体的判别函数方程如下:

$$G1: Y_1 = 70.56X_1 + 86.20X_2 + 2.57X_3 -$$

$$1.93X_4 + 6.20X_5 + 4.14X_6 + 2.01X_7 - 32.64$$

$$G2: Y_2 = 76.32X_1 + 85.66X_2 + 0.60X_3 -$$

$$1.73X_4 + 6.48X_5 + 4.19X_6 + 1.85X_7 - 32.51$$

$$G3: Y_3 = 73.20X_1 + 85.16X_2 - 0.27X_3 -$$

$$1.66X_4 + 6.65X_5 + 4.14X_6 + 1.77X_7 - 32.06$$

$$G4: Y_4 = 70.94X_1 + 85.47X_2 + 4.61X_3 -$$

$$2.04X_4 + 5.80X_5 + 4.17X_6 + 1.80X_7 - 32.04$$

$$G5; Y_5 = 72.13X_1 + 85.13X_2 + 3.62X_3 -$$

$$2.03X_4 + 5.95X_5 + 4.15X_6 + 1.82X_7 - 31.85$$

式中 $X_1 \sim X_7$ 分别代表耳石形态指标环度、圆度、椭圆率、形态因子、纵横比、半径比、面密度。

采用交叉验证法对建立的判别函数进行回判,结果显示,判别准确率在 55.26% ~ 92.59%,综合判别正确率为 71.07%。其中,G1 的判别效果较好,仅有 4 尾错判成 G4;而 G2 有 8 尾(17.39%)错判成 G3,G3 有 17 尾(44.74%)错判成 G2;G4 有 27 尾(37.5%)错判成 G5,G5 有 10 尾(31.25%)错判成 G4。G2 和 G3、G4 和 G5 存在较大程度的相互误判。

3 讨论

3.1 耳石形态的群体差异

耳石形态特征主要受鱼类个体自身的遗传信息和所处环境因素的影响,而性别、年龄、生长等生理特征也能够影响耳石发育及形态特征的形成^[21-23]。已有的研究显示,蓝点马鲛繁殖群体雌、雄个体的耳石形态不存在显著差异,未达到雌雄二型水平,而不同年龄组的耳石形态则存在显著差异^[17]。本研究统一采用 2 龄的性成熟个体,在一定程度上避免了不同发育阶段或年龄组的鱼类个体因自身生理条件及生活履历差异对耳石形态可能造成的影响。

对不同海域 5 个蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态差异进行显著性检验,结果表明,渤海、黄海、东海 3 个不同海区间繁殖群体存在极显著差异,而同一海区繁殖群体的差异并不显著。这与黄海蓝点马鲛群体鉴别的研究结果一致^[24]。半径比、纵横比、面密度和矩形趋近率对繁殖群体组内的相似性贡献度较高,而面密度、形态因

子和半径比对不同繁殖群体组间的相异性贡献度较高。这些耳石形态指标有大小变量,也有轮廓变量。这说明,不同海区之间蓝点马鲛繁殖群体的耳石在长宽、轮廓、厚薄等方面存在较大差异,这可能与海区之间的不同生境条件有关。有研究显示,海流、水团对上层鱼类群体的空间分布、运动迁移和隔离起着重要作用^[25-26]。渤海、黄海和东海拥有不同的海洋水文条件,由此带来的不同温盐度可能直接或间接造成不同海区蓝点马鲛的耳石发育差别。此外,鱼类的摄食活动或营养条件也能影响耳石的沉积比率和形式,进而造成耳石形态的差异^[27-29]。中国沿海的蓝点马鲛存在多个越冬场及产卵场,产卵后即分散索饵^[30]。不同海区的饵料丰富程度和组成不尽相同,这可能造成了不同海区蓝点马鲛的耳石在长宽、厚薄等形态方面的沉积差异。

3.2 基于耳石形态的群体判别

判别分析的结果显示,渤海莱州湾蓝点马鲛繁殖群体的识别成功率最高,达到 82.59%;黄海吕四渔场繁殖群体的识别成功率最低,仅为 55.26%。黄海和东海群体的识别成功率较低是因为相同海区间内的群体误判比例较高。如黄海的海州湾群体和吕四渔场群体存在较大比例相互误判,而东海的象山港群体和沙埕港群体也存在同样情况。总体上,通过耳石形态指标可以有效地将渤海群体、黄海群体与东海群体区分开。渤海由于其半封闭的特性,海流及水团的影响较弱,海洋水文条件不易受外部条件的影响,加之胶东半岛的天然阻隔,极大限制了渤海群体与外界的交流,造成耳石形态的特异性较高,这可能是渤海群体耳石形态识别率较高的原因。黄海群体与东海群体因受不同海流或水团的影响,环境和摄食条件差异较大,加之长江径流的注入极大限制了蓝点马鲛群体的南北向移动,因此群体

表 5 不同繁殖群体的逐步判别分析结果
Tab. 5 Results of stepwise discriminant analysis of spawning populations

| 样本 Groups | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 | 总计 Total | 判别准确率 Accuracy |
|-----------|----|----|----|----|----|----------|----------------|
| G1 | 50 | 0 | 0 | 4 | 0 | 54 | 92.59% |
| G2 | 0 | 37 | 8 | 1 | 0 | 46 | 80.43% |
| G3 | 0 | 16 | 21 | 1 | 0 | 38 | 55.26% |
| G4 | 2 | 0 | 0 | 43 | 27 | 72 | 59.72% |
| G5 | 0 | 0 | 1 | 10 | 21 | 32 | 65.63% |

在耳石形态方面存在一定差异和较大区分度。而黄海和东海的内部群体因所处海洋水文条件和饵料条件近似,耳石形态的差异性较小,内部交流也不存在障碍,因此识别成功率较低,进而存在较大比例的相互误判。

蓝点马鲛在中国沿海的产卵场众多,种群结构复杂,种群内部甚至分化为不同的地理群系^[15]。耳石形态分析的结果表明,渤海、黄海和东海蓝点马鲛繁殖群体的耳石形态差异显著,存在较大的区分度,这与黄海、东海蓝点马鲛繁殖群体为2个种群的研究结果相一致^[13]。有研究显示,渤海与黄海的蓝点马鲛繁殖群体为同一种群^[11],本研究从耳石形态分析上显示出两者存在较大差别,ZHANG等^[31]在一定体长范围内也得出了类似结果。尽管3个海区5个繁殖群体的地理隔离较远,但均有个体在海区间相互误判。这说明中国沿海的蓝点马鲛种群可能存在小比例的个体交流和混合,这在标记放流的研究结果中也有所反映^[10,32]。还有一种可能的解释是,部分个体经历的环境史类似致使耳石形态的群体间差异降低,群体判别的正确率下降。研究结果证明,耳石形态学分析方法可以简单高效地区分鱼类群体,但识别成功率和正确率受环境因素的影响较大。耳石微化学分析可以推演鱼类生活史所处水域的环境状况^[33-35],是一种进行鱼类种群划分和鉴定的有效辅助手段。中国沿海蓝点马鲛的种群划分,特别是渤海与黄海群体,还需要结合耳石微化学分析技术进一步确认。

参考文献:

- [1] MAISEY J G. Notes on the structure and phylogeny of vertebrate otoliths[J]. *Copeia*, 1987(2): 495 - 499.
- [2] 叶振江. 中国海洋鱼类耳石形态学分析及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
YE Z J. Study on otolith shape, taxonomy and application for fishes in China sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [3] MOREIRA C, FROUFE E, VAZ-PIRES P, *et al.* Otolith shape analysis as a tool to infer the population structure of the blue jack mackerel, *Trachurus picturatus*, in the NE Atlantic [J]. *Marine Environmental Research*, 2019(143): 93 - 100.
- [4] NEVES A, VIEIRA A R, SEQUEIRAV, *et al.* Otolith shape and isotopic ratio analyses as a tool to study *Spondyliosoma cantharus* population structure [J]. *Fisheries Research*, 2019(209): 40 - 48.
- [5] 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.
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.
- [6] LORD C, MORAT F, LECOMTE-FINIGERR, *et al.* Otolith shape analysis for three *Sicyopterus* (Teleostei: Gobioidae: Sicydiinae) species from New Caledonia and Vanuatu [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2012, 93(2): 209 - 222.
- [7] 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): 4385 - 396.
- [8] AGÜERAA, BROPHY D. Use of saggital otolith shape analysis to discriminate Northeast Atlantic and Western Mediterranean stocks of Atlantic saury, *Scomberesox saurus* (Walbaum) [J]. *Fisheries Research*, 2011, 110(3): 465 - 471.
- [9] 唐启升. 中国区域海洋学-渔业海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 67 - 69.
TANG Q S. Regional oceanography of China seas-Fisheries oceanography [M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 67 - 69.
- [10] 郑元甲, 李建生, 张其永, 等. 中国重要海洋中上层经济鱼类生物学研究进展[J]. *水产学报*, 2014, 38(1): 159 - 172.
ZHENG Y J, LI J S, ZHANG Q Y, *et al.* Research progress of resource biology of important marine pelagic food fishes in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(1): 159 - 172.
- [11] 韦晟, 周彬彬. 渤、黄海蓝点马鲛种群鉴别的研究[J]. *动物学报*, 1988, 34(1): 71 - 81.
WEI C, ZHOU B B. The identifications of populations of the Spanish mackerel, *Scomberomorus niphonius* (Cuvier Valenciennes) in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 1988, 34(1): 71 - 81.
- [12] 黄克勤, 熊国强. 东海蓝点马鲛种群鉴别研究[J]. *水产科技情报*, 1997, 24(6): 270 - 275.
HUANG K Q, XIONG G Q. Population identification

- of Spanish mackerel, *Scomberomorus niphonius* (Cuvier Valenciennes) in the East China Sea[J]. Fisheries Science & Technology Information, 1997, 24(6): 270-275.
- [13] 水柏年, 孙希福, 韩志强, 等. 黄海、东海蓝点马鲛群体的形态特征分析[J]. 水产学报, 2009, 33(3): 445-451.
- SHUI B N, SUN X F, HAN Z Q, *et al.* Morphological variation analysis among populations of Japanese Spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(3): 445-451.
- [14] SHUI B N, HAN Z Q, GAOT X, *et al.* Mitochondrial DNA variation in the East China Sea and Yellow Sea populations of Japanese Spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* [J]. Fisheries Science, 2009, 75(3): 593-600.
- [15] 曹艳, 章群, 宫亚运, 等. 基于线粒体 *COI* 序列的中国沿海蓝点马鲛遗传多样性[J]. 海洋渔业, 2015, 37(6): 485-493.
- CAO Y, ZHANG Q, GONG Y Y, *et al.* Genetic variation of *Scomberomorus niphonius* in the coastal waters of China based on mtDNA *COI* sequences [J]. Marine Fisheries, 2015, 37(6): 485-493.
- [16] SHUI B N, HAN Z Q, GAOT X, *et al.* Genetic structure of Japanese Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) in the East China Sea and Yellow Sea inferred from AFLP data [J]. African Journal of Biotechnology, 2008, 21(7): 3860-3865.
- [17] 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.
- 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.
- [18] TUSET V M, LOMBARTE A, GONZALEZ J A, *et al.* Comparative morphology of the sagittal otolith in *Serranus* spp. [J]. Journal of fish biology, 2003, 63(6): 1491-1504.
- [19] CAÑÁS L, STRANSKY C, SCHLICKEISEN J, *et al.* Use of the otolith shape analysis in stock identification of anglerfish (*Lophius piscatorius*) in the Northeast Atlantic [J]. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 2012, 69(2): 250-256.
- [20] CLARKE K R, WARWICK R M. Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation[M]. Plymouth: PRIMER-E Limited, 2001: 1-12.
- [21] 于鑫, 曹亮, 南鸥, 等. 基于矢耳石形态分析的凤鲚 (*Coilia mystus*) 群体识别研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 768-774.
- YU X, CAO L, NAN O, *et al.* Stock identification of *Coilia mystus* using otolith shape analysis [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2013, 44(3): 768-774.
- [22] BEGG G A, BROWN R B, Stock identification of haddock *Melanogrammus aeglefinus* on Georges Bank based on otolithshape analysis [J]. Transaction of the American Fisheries Society, 2000(129): 935-945.
- [23] SIMONEAU M, CASSELMAN JM, FORTIN R. Determining theeffect of negative allometry (length/height relationship) onvariation in otolith shape in lake trout (*Salvelinus namaycush*), using Fourier-series analysis [J]. Canadian Journal of Zoology, 2000, 78: 1597-1603.
- [24] 王英俊, 叶振江, 杨永桓, 等. 耳石形态在黄海蓝点马鲛群体鉴别方面的应[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(增刊): 155-158.
- WANG Y J, YE Z J, YANG Y H, *et al.* Stock identification of Spanish Mackerel, *Scomberomorus niphonius* in the Yellow Sea using otolith morphology. [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(Sup.): 155-158.
- [25] TZENG WN. Availability and population structure of spotted mackerel, *Scomber australasicus* in the adjacent waters of Taiwan [J]. Acta Oceanogr. Taiwan, 1988(19): 132-145.
- [26] RICHARDSON D E, MARANCIK K E, GUYON J R, *et al.* Discovery of a spawning ground reveals diverse migration strategies in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(12): 3299-3304.
- [27] LOMBARTE A, LLEONART J. Otolith size changes related withbody growth, habitat depth and temperature [J]. Environmental Biology of Fishes, 1993(37): 297-306.
- [28] GAGLIANO M, MCCORMICK M I. Feeding history influencesotolith shape in tropical fish [J]. Marine Ecology Progress Series, 2004(278): 291-296.
- [29] CARDINALE M, DOERING-ARJES P, KASTOWSKY M, *et al.* Effects of sex, stock, and environment on the shape of known-age Atlantic cod (*Gadus*

- morhua) otoliths[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2004(61): 158 - 167.
- [30] 张 弛. 鱼类耳石形态在蓝点马鲛群体识别和皮氏叫姑鱼年龄估算上的应用实例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- ZHANG C. Application of otolith morphology in stock separation of *Scomberomorus niphonius* and age estimation of *Johnius belengerii* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [31] ZHANG C, YE Z, PANHWAR S K, *et al.* Stock discrimination of the Japanese Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) based on the otolith shape analysis in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2013(29): 368 - 373.
- [32] 毛锡林, 陈永法, 胡雅竹, 等. 蓝点马鲛·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: 462 - 470.
- MAOX L, CHEN Y F, HU Y Z, *et al.* *Scomberomorus niphonius* · Fishery resource status and regional division in East China Sea [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1987: 462 - 470.
- [33] 徐 浩, 黎雨轩, 张 翼, 等. 东海和黄海南部近岸海域小黄鱼稚幼鱼耳石元素指纹特征分析[J]. 海洋渔业, 2015, 37(4): 302 - 309.
- XU H, LI Y X, ZHANG Y, *et al.* Analysis on the otolith core elemental fingerprint of larval and juvenile *Larimichthys polyactis* in the coastal areas of East China Sea and southern Yellow Sea[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(4): 302 - 309.
- [34] 潘新东, 张 弛, 叶振江, 等. 黄海南部蓝点马鲛耳石微量元素[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 908 - 916.
- PAN X D, ZHANG C, YE Z J, *et al.* Trace elements in the otoliths of the Japanese Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) in the southern Yellow Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(4): 908 - 916.
- [35] NELSON T R, POWERS S P. Validation of species specific otolith chemistry and salinity relationships [J]. Environmental Biology of Fishes, 2019, 102(5): 801 - 815.

Morphological comparison in the sagittal otolith of spawning population of *Scomberomorus niphonius* in coastal waters of China

YANG Linlin, JIANG Yazhou, LIU Zunlei, LIN Yu, LING Jianzhong, LI Shengfa

(Key Laboratory of East China Sea Fishery Resources Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: To elucidate the sagittal otolith morphological characteristics of spawning populations of *Scomberomorus niphonius* in coastal waters of China and divide the stocks scientifically, a total of 242 2-year-old samples collected from the Laizhou Bay, Haizhou Bay, Lvsi fishing grounds, Xiangshan Bay, Shacheng Bay from April to June during 2016—2018 were analyzed. Shape indices including circularity, roundness, ellipticity, rectangularity, form-factor, aspect ratio, radius ratio and surface density were used as morphological variables and were statistically analyzed by ANOSIM, NMDS and SIMPER to examine their differences among several spawning populations. The results indicated that there was no significant difference in otolith morphology between the populatinos from Haizhou Bay and Lvsi grounds ($P > 0.05$). Also, the same situation happened between the populatinos from Xiangshan Bay and Shacheng Bay. But the otolith morphology differed significantly between any two populatinos from different sea areas ($P < 0.01$). The radius ratio, aspect ratio, surface density and rectangularity were typical shape indices with high contribution rate to within-populations similarity; and surface density, form-factor and radius ratio were discriminational shape indices with high contribution rate to the every two populatinos dissimilarity. The discriminant function of five spawning groups was established by stepwise discriminant function analysis, which showed the discriminant accuracy ranged from 55.26% to 92.59%, and the general discrimination rate was 71.07%. The results indicated that there was a significant difference in otolith morphology among spawning populations in coastal waters of China. The method based on sagittal otolith morphology was effective in discriminating *Scomberomorus niphonius* from different sea areas. The morphology of otolith of spawning populations of *Scomberomorus niphonius* in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea showed different stock characteristics and high degree of differentiation.

Keywords: *Scomberomorus niphonius*; coastal waters of China; spawning population; sagittal otolith; morphology