

DOI: 10.12264/JFSC2024-0193

综合鱼体、耳石形态与耳石微化学的硃洲族和闽-粤东族大黄鱼的种群识别

阳敏¹, 秦蛟¹, 古龙^{1,2}, 李若静¹, 赵娜¹, 张博¹

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524000;

2. 西华师范大学环境科学与工程学院, 四川 南充 637002

摘要: 大黄鱼(*Larimichthys crocea*)是中国沿海重要的经济鱼类, 但由于捕捞过度 and 遗传多样性丧失, 近年来其资源面临严重威胁。为研究刻画硃洲族大黄鱼种质资源的表型特征, 本研究利用湛江硃洲族和漳州闽-粤东族的海捕大黄鱼样品, 综合鱼体形态、耳石形态和耳石微化学分析对两个族群进行了种群判别。主成分分析结果表明, 鱼体形态前 2 个主成分不能完全分隔两个族群, 而耳石形态能完全分隔。方差分析显示两个族群在鱼体形态和耳石形态上均呈现显著差异($P<0.05$)。根据形态变形图和 t 检验发现, 相比于闽-粤东族群, 硃洲族群鱼体形态整体较为细长, 胸鳍基部较短($P<0.05$); 硃洲族群耳石整体轮廓较扁, 听沟颈部较粗, 背后方第一个凹陷较深($P<0.001$)。耳石微化学元素分析发现: 硃洲族大黄鱼耳石钡钙比值和锶钙比值显著高于闽-粤东族群($P<0.0001$), 锰钙比值显著低于闽-粤东族群($P<0.0001$), 镁钙比值无显著差异($P>0.05$)。两个种群从耳石核心到边缘各测量点的锶钙比值相差最大, 基本没有交叉。判别分析发现鱼体形态判别正确率(85.2%)略低于耳石形态(100%)和耳石微化学判别正确率(100%)。以上结果表明鱼体形态、耳石形态和微化学对硃洲族和闽-粤东族大黄鱼的种群识别均具有出色的效能。本研究将为大黄鱼硃洲族和闽-粤东族的种群判别和渔业管理提供科学支撑。

关键词: 大黄鱼; 种群判别; 形态; 地标点法; 耳石微化学; 硃洲族; 闽-粤东族

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)12-1511-13

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)是我国重要经济鱼类, 主要分布在中国黄海南部至南海雷州半岛以东 60 m 等深线以内的沿海海域^[1]。根据不同海域形态、生态学特征和分布区的差异, 大黄鱼种群可分为岱衢族、闽-粤东族和硃洲族, 分别分布于南黄海至东海北部、台湾海峡至南海粤东以及南海粤西^[2-3]。20 世纪 70 年代中期, 大黄鱼捕捞产量曾达到约 20 万 t, 随后二十年间下降了超过 90%^[4]。20 世纪 80 年代起, 随着人工繁育和养殖业的发展, 到 2023 年, 养殖产量已达捕捞产量的 7 倍^[5]。然而, 目前养殖业高度依赖福建闽-粤东

族野生群体, 面临遗传多样性丧失的风险。因此, 保护和利用其他地区的大黄鱼种质资源, 如硃洲族大黄鱼, 是保障大黄鱼渔业健康和可持续发展的关键^[6-7]。

种群判别是渔业资源保护和利用的基础, 近年来, 国内外种群判别技术取得显著进展, 多种识别方法的信息整合有助于得出客观可靠的结论^[8-9]。鱼类形态是种群判别的基础方法, 传统研究手段包括形态学测量和框架法, 随着图像分析技术的发展, 二维轮廓法和地标点法推广开来。耳石形态也被证明是有效的种群区分手段, 传统方法包

收稿日期: 2024-06-12; 修订日期: 2024-09-03.

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2023A1515010580); 广东省实验室创新领军人才项目(ZJW-2023-01); 湛江市海洋青年人才项目(2022E05015, 2023E0006).

作者简介: 阳敏(1998-), 女, 硕士, 从事鱼类生态学研究. E-mail: yangmin1802@163.com

通信作者: 张博, 研究员, 从事鱼类种质资源和遗传育种研究. E-mail: zb611273@163.com

括耳石形态量度特征和几何形态指标分析,而新方法则采用二维轮廓法和地标点法^[10-11]。此外,耳石微化学分析能够记录鱼类整个生活史过程的信息,特别适用于区分栖息地环境条件不同的种群,是种群鉴定的有力工具^[12-13]。目前,大黄鱼的相关研究涵盖了多个种群的传统形态学分析^[2-3,14]、遗传学研究^[15]、养殖与野生群体的形态和耳石特征比较^[16],以及不同养殖方式下大黄鱼的形态差异^[17-18]。然而,较新的种群判别技术的应用和多种方法的综合分析评价尚不充分,特别是对南海区硃洲族大黄鱼关键特征的研究较为缺乏。

本研究基于 2023 年 9—10 月采集的广东湛江硃洲族海捕大黄鱼样本和福建漳州闽-粤东族海捕大黄鱼样本,结合鱼体形态地标点、耳石形态地标点和耳石微化学分析 3 种较新的种群判别方法,通过比较 3 种方法在种群判别中的效能,提升种群鉴定的准确性和可靠性。通过研究两个种群之间的形态和耳石差异,为大黄鱼自然群体的划分和判别提供技术支持,并为大黄鱼新的种质资源开发利用提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验的硃洲族大黄鱼样本捕获于广东湛江硃洲岛海域(20.69935°N, 110.76061°E),闽-粤东族大黄鱼采捕自福建漳州漳浦县六鳌镇近海(23.86273°N, 117.80277°E)。样本经冰冻保存运输至实验室后编号并拍照,测量其体重、体长和全长。随后,摘取矢耳石用去离子水清洗后保存于离心管中,并在显微镜下统一拍照。

实验中使用的硃洲族大黄鱼共 28 尾,体长平均值为(18.31±1.36) cm,范围为 15.50~21.50 cm,雌雄比为 1.8:1;闽-粤东族大黄鱼共 20 尾,体长平均值为(15.35±0.67) cm,范围为 14.20~16.40 cm,雌雄比为 0.67:1。根据鳞片年龄判读,所有实验样本均为 1 龄鱼。

1.2 实验方法

1.2.1 鱼体形态图像采集 选择形态完整的大黄鱼样本进行图像采集。将样本固定在泡沫板上,用大头针展开各鳍,确保标本自然伸展,无异常

弯曲,然后逐尾拍照。拍摄过程中,固定相机,使镜头与标本拍摄面完全垂直,保持标本的摆放位置、拍摄聚焦部位一致^[19-20]。

1.2.2 耳石形态图像采集 所有样本选用左矢耳石进行形态学研究。为了确保矢耳石近轴面,即听沟所在平面,水平朝上,具体操作如下:在培养皿中铺设一层黑色橡皮泥,将左耳石听沟朝上放置并轻压使其接触橡皮泥。最后,用长钢尺轻压耳石,确保其与培养皿表面保持同一平面。耳石置于体视显微镜(Leica M205FA,德国徕卡公司)下,用相同倍率统一拍摄耳石照片(图 1)。

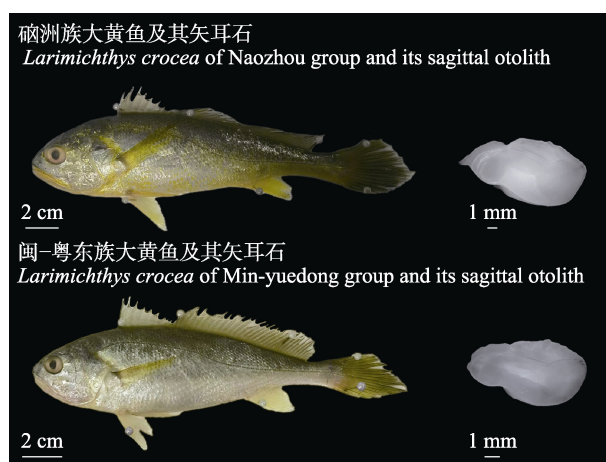


图 1 硃洲族、闽-粤东族大黄鱼及其矢耳石
Fig. 1 *Larimichthys crocea* and corresponding sagittal otolith of Naozhou and Min-yuedong groups

1.2.3 地标点选择与提取 地标点是指具有明显特征且易于辨识的点,分为 3 类: I 型为不同组织间的交点, II 型为结构中的凹陷或凸起点, III 型为结构中的极值点^[10,21]。本研究根据大黄鱼鱼体形态特点选取 16 个地标点(图 2),根据耳石特点选取 13 个地标点(图 3),涵盖 3 种类型。利用 Tpsdig2 version 2.32 软件选取每个样本的鱼体和耳石地标点,所有样本的地标点数量和相对顺序保持一致,分别建立鱼体和耳石形态地标点数据文件^[22]。鱼体和耳石形态数据分别进行分析。

1.2.4 耳石微化学测定 耳石微化学分析统一使用右耳石。将耳石用指甲油包埋固定后,沿横截面切割,固定在载玻片上,依次使用 500 目、2000 目和 4000 目砂纸进行打磨和抛光,并在显微镜下

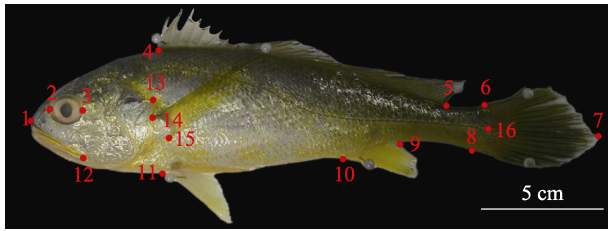


图 2 大黄鱼鱼体形态地标点

1. 吻端(III 型), 2. 眼前缘(II 型), 3. 眼后缘(II 型), 4. 背鳍起点(I 型), 5. 背鳍基部末端(I 型), 6. 尾鳍基部上端(I 型), 7. 尾鳍末端(III 型), 8. 尾鳍基部下端(I 型), 9. 臀鳍基部末端(I 型), 10. 臀鳍起点(I 型), 11. 腹鳍起点(I 型), 12. 下颌末端(II 型), 13. 鳃盖骨末端(II 型), 14. 胸鳍基部上端(I 型), 15. 胸鳍基部下端(I 型), 16. 尾柄末端(II 型).

Fig. 2 Fish landmarks of *Larimichthys crocea*

1. Tip of snout (type III), 2. the anterior margin of the eye (type II), 3. the posterior margin of the eye (type II), 4. origin of dorsal fin (type I), 5. posterior end of dorsal fin base (type I), 6. upper insertion of caudal fin base (type I), 7. tip of caudal fin (type III), 8. lower insertion of caudal fin base (type I), 9. posterior end of anal fin base (type I), 10. origin of anal fin (type I), 11. origin of pelvic fin (type I), 12. distal tip of mandible (type II), 13. the posterior margin of the operculum (type II), 14. upper insertion of pectoral fin (type I), 15. lower insertion of pectoral fin (type I), 16. distal tip of caudal peduncle (type II).

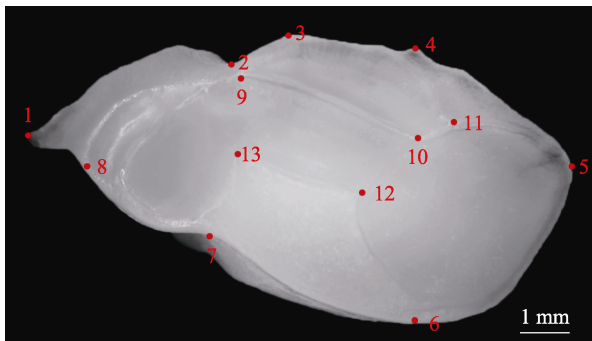


图 3 大黄鱼左耳石地标点位置图

1. 耳石后端顶点(III 型), 2. 耳石背后方凹点(II 型), 3. 耳石背后方凸点(II 型), 4. 耳石背前方凸点(III 型), 5. 耳石前端顶点(III 型), 6. 以 4 为基点作垂线与腹部轮廓的交点(I 型), 7. 耳石腹后方凹点(II 型), 8. 听沟最后端(III 型), 9. 听沟后部与中部的上交点(I 型), 10. 听沟前部与中部的上交点(I 型), 11. 上听沟最前端(III 型), 12. 听沟前部与中部的下交点(I 型), 13. 听沟后部与中部的下交点(I 型).

Fig. 3 Landmarks of left otolith of *Larimichthys crocea*

1. Posterior endpoint of otoliths (type III), 2. posterior dorsal notch of otoliths (type II), 3. posterior dorsal protrusion of otoliths (type II), 4. anterior dorsal protrusion of otoliths (type III), 5. anterior tip of otoliths (type III), 6. the intersection of the vertical line drawn from landmark 4 and the ventral outline (type I), 7. posterior ventral notch of otoliths (type II), 8. posterior endpoint of sulcus acusticus (type III), 9. the upper junction of the posterior and middle parts of the sulcus acusticus (type I), 10. the upper junction of the anterior and middle parts of the sulcus acusticus (type I), 11. anterior tip of upper sulcus acusticus (type III), 12. the lower junction of the anterior and middle parts of the sulcus acusticus (type I), 13. the lower junction of the posterior and middle parts of the sulcus acusticus (type I).

观察调整使核心充分暴露。处理后的耳石切片经超声波清洗后干燥备用^[23]。利用激光剥蚀电感等离子质谱法(LA-ICP-MS)实验测定镁(Mg)、钙(Ca)、锰(Mn)、锶(Sr)和钡(Ba)。实验在上海凯来谱科技有限公司实验室完成, 使用 ESL 公司 193 nm 波长 NWRImageGEO 型号激光和 Agilent 公司 8900 型号四级杆质谱联用系统。实验方法为样品-标准品间插法, 即采用碳酸盐标样 MACS-3 作为标准品, 每扫 9 个样品插入一组标样。扫描前后各插入 10 s 的预热和冲洗时间, 扫描速度为 10 $\mu\text{m/s}$, 每个元素单次扫描时间为 0.06 s。从耳石核心至边缘进行扫描(图 4)。

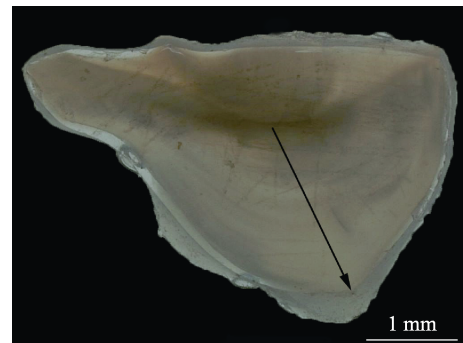


图 4 耳石微化学测定分析扫描示意图

箭头指示激光剥蚀方向和路径。

Fig. 4 Schematic diagram for otolith chemistry analysis
The arrow indicates the direction and path of laser ablation.

1.3 统计分析

在 R 软件中使用 geomorph 4.0.6 包中的 gpagen 函数对所有样本地标点进行普氏叠印(Procrustes superimposition)^[24-26], 普氏叠印通过迭代对每个样本中的地标点进行平移置中、旋转和缩放, 保留其相对形状信息, 得到标准化地标点^[27-28]。使用 gm.prcomp 函数对标准化地标点进行主成分分析^[25-26], 使用 ggplot2 3.4.2 包绘制前二个主成分的散点图。使用 Momocs1.4.1 包中的 PCldkContrib 函数对前两个主成分所代表的形态变异作网格图(<https://rfrelat.github.io/CoralFishes>)^[29]。为了检验两个种群间的形态差异及判断体型和性别对形态的影响, 使用 geomorph 4.0.6 包中的 procD.lm 函数开展方差分析^[24,30]。使用 tpsRelw1.75 软件计算相对扭曲主成分分析中不同地标点的贡献率。使用 geomorph 4.0.6 包中的 plotRefToTarget

函数进行薄板样分析,以闽-粤东族大黄鱼为参照,绘制硃洲族大黄鱼的变形图^[25-26]。使用geomorph 4.0.6包中的interlmkdist函数提取经普氏叠印后的关键地标点之间的距离,地标点间距离经鱼体体长或耳石5号与8号地标点间距离标准化后,应用 t 检验比较两个种群间的各地标点间距离差异。使用SPSS27.0软件对两个种群的鱼体和耳石形态主成分分别进行逐步判别分析,根据默认的 F 值逐步筛选出最重要的主成分,进而采用贝叶斯法进行判别,各组先验概率相等。

耳石中各元素含量远小于Ca含量,统一用“(元素含量/Ca含量) $\times 10^{-3}$ ”表示各元素含量^[23]。对两个种群的各元素比值平均值进行 t 检验之前,需对每个耳石样本的各元素比值平均值进行 $\log(x+1)$ 转换,以满足正态性和方差齐性。比较两个种群生活史过程中栖息环境的差异时,根据每个样本从耳石核心到边缘每10 μm 的平均值,绘制各个种群耳石微化学元素变化曲线和置信区间。耳石微化学判别方法与形态判别方法相同。

2 结果与分析

2.1 鱼体和耳石形态差异

2.1.1 主成分分析 鱼体形态主成分分析结果显示,共提取了26个主成分,其中前3个主成分对总体变异的解释率分别为29.74%、24.90%和10.55%,累积贡献率为65.19%。根据第一、第二主成分得分做的散点图(图5a)可知,仅前2个主成分不能完全将两个种群分隔开来。第一主成分主要解释了胸鳍基部长度和体高的变异,第二主成分主要代表体高的变异(图5c)。方差分析结果表明,两个种群的鱼体形态具有显著差异($P=0.022$),硃洲族大黄鱼和闽-粤东族大黄鱼随体型大小均无显著变化($P=0.822$, $P=0.738$),且不同性别之间无显著差异($P=0.352$, $P=0.299$)。

耳石形态主成分分析结果显示,共提取了22个主成分,其中前3个主成分对总体变异的解释率分别为22.98%、20.04%和13.30%,累积贡献率为56.33%。根据第一、第二主成分得分做的散点

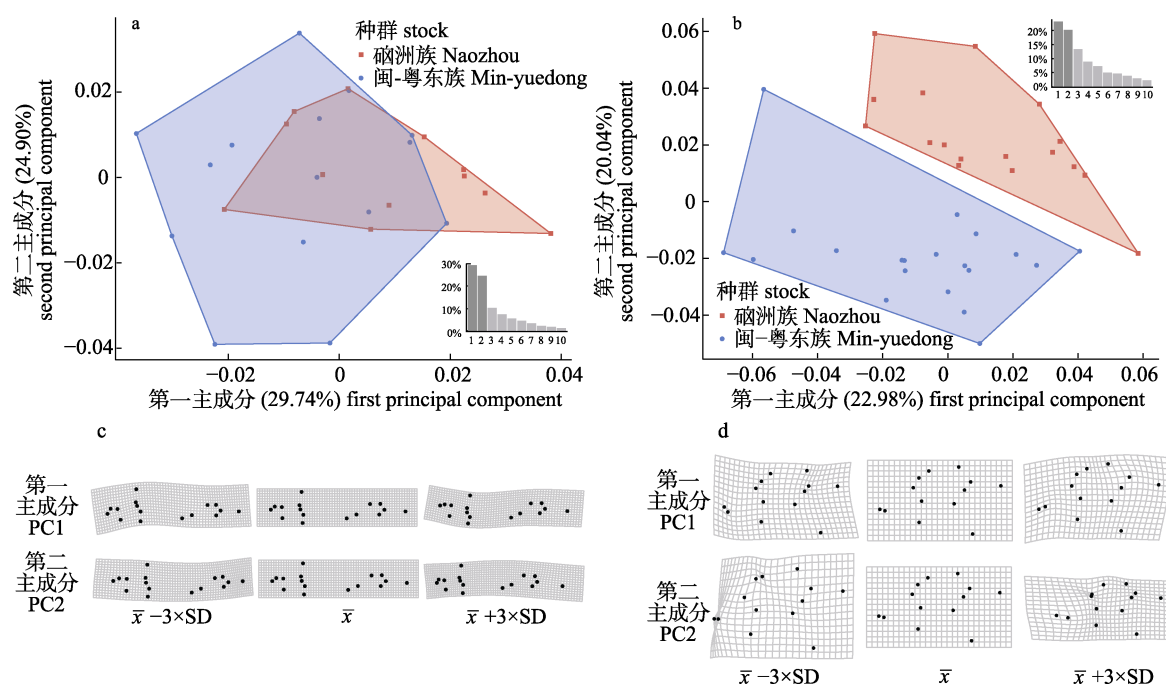


图5 大黄鱼(*Larimichthys crocea*) 硃洲族、闽-粤东族2个种群鱼体形态和耳石形态主成分散点图

a. 鱼体形态主成分散点图; b. 耳石形态主成分散点图; c. 鱼体形态前两个主成分代表的形态差异;
d. 耳石形态前两个主成分代表的形态差异。

Fig. 5 Principal component scatter plots for discriminating the Naozhou and Min-yuedong stocks of *Larimichthys crocea*
a. PCA plot of fish morphology; b. PCA plot of otolith morphology; c. Variation represented by the first two principal components of fish morphology; d. Variation represented by the first two principal components of otolith morphology.

图(图 5b)可知, 前 2 个主成分可很好地将两个种群分隔开来。第一主成分主要体现了耳石听沟前部与中部的上交点(10 号)与上听沟最前端(11 号)距离的差异, 第二主成分主要解释了耳石整体形态圆扁、听沟粗细、后端突刺和背后方第一个凹陷的差异(图 5d)。两个种群的耳石形态具有显著差异($P=0.001$), 硃洲族大黄鱼耳石形态随体型大小有显著差异($P=0.001$), 闽-粤东族大黄鱼随体型大小无显著变化($P=0.250$), 且不同性别之间均无显著差异($P=0.683$, $P=0.152$)。

2.1.2 地标点贡献率 鱼体形态相对扭曲主成分分析中, 贡献率较大的地标点是 14、13 和 2 号地标点, 其贡献率分别为 32.97%、18.72%和 12.40%。耳石形态相对扭曲降维分析中, 贡献率较大的地标点是 8、1 和 2 号地标点, 其贡献率分别为 24.95%、18.46%和 15.71%, 听沟地标点(9~13 号)的总贡献率为 33.41%(表 1)。

表 1 大黄鱼鱼体、耳石不同地标点在
相对扭曲中的贡献率
Tab. 1 Contributions of each *Larimichthys crocea* or
otolith landmarks in relative warps

鱼体地标点 fish landmark	贡献率 contribution	耳石地标点 otolith landmark	贡献率 contribution
1	5.06%	1	18.46%
2	12.40%	2	15.71%
3	4.82%	3	5.45%
4	0.42%	4	1.10%
5	1.40%	5	0.12%
6	3.61%	6	0.06%
7	0.04%	7	0.75%
8	1.97%	8	24.95%
9	1.03%	9	10.01%
10	0.50%	10	10.02%
11	1.27%	11	8.17%
12	0.89%	12	2.28%
13	18.72%	13	2.93%
14	32.97%		
15	9.03%		
16	5.86%		

2.1.3 形态变形图 硃洲族和闽-粤东族大黄鱼的鱼体和耳石形态地标点, 分别经普氏叠印后, 以闽-粤东族为参照绘制硃洲族大黄鱼的变形图

(图 6), 并对关键地标点之间的标准化距离进行种群间的 t 检验(表 2)。从鱼体形态变形图可以发现, 相比于闽-粤东族(图 6c), 硃洲族大黄鱼(图 6a)背鳍起点(4 号)与腹鳍起点(11 号)的距离更短($P=0.0006$), 表示硃洲族大黄鱼体高相对较小, 即整体形态更加细长; 硃洲族大黄鱼胸鳍基部长度(14 号、15 号的距离)比闽-粤东族大黄鱼更短($P=0.0031$), 且更靠近腹部。此外, 硃洲族大黄鱼的眼径(2 号、3 号的距离)比闽-粤东族大黄鱼略长, 背鳍基部(4 号、5 号的距离)略短, 臀鳍基部(9 号、10 号的距离)略短, 但差异不显著($P>0.05$)(表 2)。

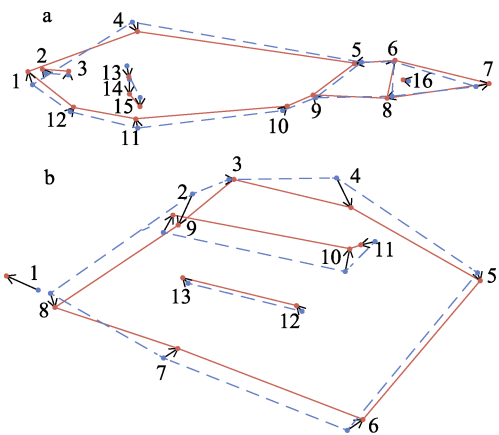


图 6 相对于闽-粤东族大黄鱼的硃洲族
大黄鱼鱼体形态和耳石形态变形图
a. 相对于闽-粤东族的硃洲族大黄鱼鱼体变形图;
b. 相对于闽-粤东族的硃洲族大黄鱼耳石变形图。变异扩大
3 倍。红色实线为硃洲族大黄鱼, 蓝色虚线为闽-粤东族大
黄鱼, 黑色箭头指示相对于闽-粤东族大黄鱼的硃洲族大
黄鱼的形态变化。
Fig. 6 *Larimichthys crocea* fish and otolith deformation diagram
of Naozhou group using Min-yuedong group as a reference
a. fish deformation diagram of Naozhou group using Min-yuedong
group as a reference; b. otolith deformation diagram of Naozhou
group using Min-yuedong group as a reference.
Variations are magnified 3 times. The red solid line represents
Naozhou group, the blue dashed line represents Min-yuedong
group, and the black arrows indicate the morphological changes
of the Naozhou group relative to the Min-yuedong group.

从耳石形态变形图可以发现, 相比于闽-粤东族大黄鱼耳石(图 6d), 硃洲族大黄鱼耳石轮廓整体较扁; 硃洲族大黄鱼耳石(图 6b)的听沟颈部明显更粗(9、10 号连线与 12、13 号连线); 硃洲族大黄鱼耳石后端顶点(1 号)与听沟最后端(8 号)相距较远($P=0.0009$), 即后端突刺延伸较长, 而闽-

粤东族大黄鱼耳石样本的这两个地标点相距很近, 后端通常不具突刺, 为缓和的突起。硃洲族大黄鱼耳石轮廓背后方第一个凹陷较深(2 号), 致使其与听沟后部与中部的上交点(9 号)相距很近 ($P<0.0001$), 而闽-粤东族大黄鱼耳石轮廓背后方第一个凹陷较浅。此外, 相比于闽-粤东族大黄鱼耳石, 硃洲族耳石听沟前部与中部的上交点(10 号)与上听沟最前端(11 号)相距较近($P<0.0001$)(表 2)。

表 2 大黄鱼硃洲族、闽-粤东族 2 个种群鱼体和耳石地标点之间的距离
Tab. 2 Distance of fish or otolith landmarks in Naozhou and Min-yuedong groups of *Larimichthys crocea*

鱼体地 标点距离 distance of fish landmark	$\bar{x} \pm SD$		差异显著性 P	耳石地标点 距离 distance of otolith landmark	$\bar{x} \pm SD$		差异显 著性 P
	硃洲族 Naozhou	闽-粤东族 Min-yuedong			硃洲族 Naozhou	闽-粤东族 Min-yuedong	
1-12	0.134±0.014	0.124±0.013	0.0575	1-8	0.067±0.027	0.036±0.023	0.0009
1-13	0.259±0.011	0.257±0.014	0.6027	2-9	0.074±0.021	0.115±0.017	0.0000
2-3	0.064±0.003	0.060±0.005	0.0560	4-6	0.560±0.015	0.591±0.016	0.0000
4-5	0.608±0.015	0.619±0.014	0.0753	9-10	0.431±0.019	0.435±0.019	0.5058
4-11	0.266±0.011	0.283±0.010	0.0006	9-13	0.137±0.009	0.134±0.014	0.3530
8-9	0.201±0.014	0.203±0.014	0.6974	10-11	0.075±0.009	0.100±0.017	0.0000
9-10	0.088±0.009	0.095±0.008	0.0826	10-12	0.153±0.012	0.138±0.013	0.0008
14-15	0.052±0.003	0.056±0.003	0.0031	12-13	0.275±0.020	0.275±0.014	0.9497

注: 鱼体地标点距离均经体长标准化, 耳石地标点距离经 5-8 号地标点距离标准化。
Note: all fish landmark distances are standardized by body length, and otolith landmark distances are standardized by the distance between landmarks 5 and 8.

2.2 耳石微化学差异

两个种群各样本耳石元素比值平均值的 t 检验结果表明, 硃洲族和闽-粤东族大黄鱼耳石钡钙比值、锶钙比值和锰钙比值均有显著差异 ($P<0.0001$), 而镁钙比值无显著差异($P>0.05$)。其中硃洲族大黄鱼耳石钡钙比值和锶钙比值显著大于闽-粤东族, 而锰钙比值显著小于闽-粤东族 ($P<0.001$, 表 3)。

表 3 大黄鱼耳石微化学元素比值
Tab. 3 Element: Ca ratios of *Larimichthys crocea* otolith chemistry

	$\bar{x} \pm SD$			范围 range		中位数 median	
	硃洲族 Naozhou	闽-粤东族 Min-yuedong	差异显 著性 P	硃洲族 Naozhou	闽-粤东族 Min-yuedong	硃洲族 Naozhou	闽-粤东族 Min-yuedong
Mg/Ca	0.052±0.014	0.058±0.017	0.2733	0.036-0.094	0.041-0.089	0.048	0.052
Sr/Ca	5.054±0.252	4.144±0.245	<0.0001	4.542-5.430	3.501-4.511	5.097	4.161
Ba/Ca	0.027±0.006	0.017±0.004	<0.0001	0.016-0.041	0.011-0.026	0.027	0.015
Mn/Ca	0.011±0.002	0.021±0.003	<0.0001	0.007-0.015	0.017-0.027	0.010	0.021

两个种群从耳石核心到边缘各测量点的锶钙比值相差最大, 且一直保持着明显差距, 基本没有交叉重叠, 其次是钡钙比值和锰钙比值, 两个种群略有交叉。两个种群各个元素比值从耳石核心到边缘的变化趋势整体相近: 镁钙比值初期下降, 随后非常不稳定; 锶钙比值波动下降后上升; 钡钙比值持续波动下降; 锰钙比值初期上升, 随后波动下降(图 7)。

2.3 三种方法的判别效果

对大黄鱼鱼体形态主成分进行逐步判别分析, 筛选出 3 个变量: 第 4、第 1 和第 5 主成分, 判别方程的特征值为 1.503, 判别方程有效性检验显著性 $P<0.001$, 表明判别方程有效。硃洲族误判了 3 个样本, 判别正确率为 75%; 闽-粤东族误判了 1 个样本, 判别正确率为 93.3%; 整体判别正确率为 85.2%。对大黄鱼耳石形态主成分进行逐步判

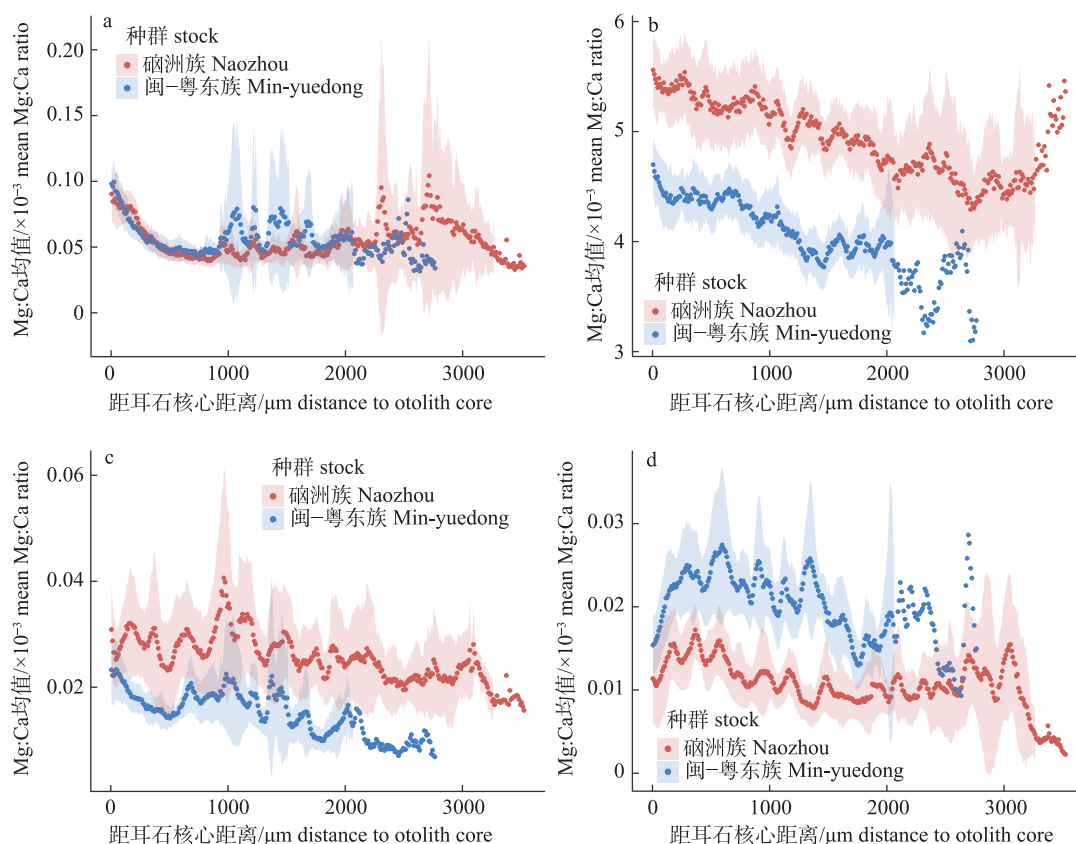


图 7 硃洲族和闽-粤东族大黄鱼耳石所有样本四个元素比值平均值从耳石核心到边缘的变化
阴影为置信区间, 置信水平为 95%.

Fig. 7 Variation in mean element: Ca ratios of all otolith samples from core to edge points, distinguishing the two stocks of *Larimichthys crocea*
Shadow represents the confidence interval with a 95% confidence level.

别分析, 筛选出 7 个变量: 第 2、第 1、第 6、第 5、第 4、第 9 和第 19 主成分, 判别方程特征值为 10.868, 判别方程有效性检验显著性 $P < 0.001$, 表明判别方程有效。整体判别正确率为 100%。对大黄鱼耳石微化学进行逐步判别分析, 筛选变量排除了镁钙比, 判别方程特征值为 13.295, 判别方程有效性检验显著性 $P < 0.001$, 表明判别方程有效。判别函数为 $y = -0.996 \text{ Mn/Ca} + 0.563 \text{ Sr/Ca} + 0.528 \text{ Ba/Ca}$ 。整体判别正确率为 100% (表 4)。

3 讨论和结论

3.1 不同种群鱼体形态差异

同一鱼类物种不同群体之间的形态差异受到环境条件、选择、遗传分化和表型可塑性的影响, 个体大小、性别等也可能造成形态差异^[31-32]。本研究的样本大小均匀, 方差分析结果排除了个体

大小和性别对鱼体形态的影响。在经过普氏叠印标准化后, 两个种群之间的鱼体形态差异显著 ($P < 0.05$), 主要表现在相比于闽-粤东族, 硃洲族大黄鱼的整体较为细长, 胸鳍基部较短。历史研究表明, 硃洲族大黄鱼相比于闽-粤东族大黄鱼尾柄较粗, 眼径略长^[3], 本研究中两者也有此区别, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。

水环境条件是影响鱼类形态差异的最重要环境因子, 如水流和水温等^[33]。在水流强的环境下, 鱼类体型偏向纺锤型, 身体前部更深更宽, 体高较大, 尾柄浅窄, 以最小化阻力并稳定游泳, 而在水流较弱的环境中, 鱼类的结构则有助于加速和转向^[34-36]。在河流环境中, 鱼类相比于水库或湖泊中的鱼类, 头部更大, 背鳍靠后且背鳍基部更长^[31]。漳州闽-粤东族大黄鱼主要分布在台湾海峡和粤东水域, 受到台湾暖流和沿岸流共同影响, 表、

表 4 大黄鱼鱼体形态、耳石形态和耳石微化学的逐步判别结果

Tab. 4 Results of stepwise discriminant analysis based on *Larimichthys crocea* fish landmarks, otolith landmarks and otolith chemistry respectively

	判别方程特征值 eigenvalue of discriminant equation	组别 group	数量 number	判别准确率/% accuracy rate	预测分类 forecast and classify	
					硃洲族 Naozhou	闽-粤东族 Min-yuedong
鱼体形态 fish landmarks	1.503	硃洲族	12	75	9	3
		闽-粤东族	15	93.3	1	14
耳石形态 otolith landmarks	10.868	硃洲族	17	100	17	
		闽-粤东族	20	100		20
耳石微化学 otolith chemistry	13.295	硃洲族	14	100	14	
		闽-粤东族	15	100		15

中、底层水流流速都较大;硃洲族大黄鱼分布在珠江口以西至琼州海峡以东的海域,该海区具有内湾性特点,表层水流流速较大,中、底层流速较小^[37-39]。本研究结果显示,相比于硃洲族大黄鱼,闽-粤东族大黄鱼体高较大、胸鳍基部较长,这可能与其栖息水域的强水流有关。

在高水温环境中,鱼类基础代谢能量需求增加,部分生长能量被转移用于基础代谢,因此鱼类个体较小^[40]。广东大黄鱼渔获体长比浙江大黄鱼渔获体长较小^[41]。高温环境下的鱼类在形态上通常表现为头长、眼径长、体高较小,甚至腹鳍发育退化^[40,42]。食物减少导致鱼类生长放缓时,鱼类形态也表现出头长、眼径长、体高较小^[42]。硃洲族大黄鱼栖息在水温高的南海水域,闽-粤东族大黄鱼栖息在水温较低的东海南部、南海北部水域,且南海鱼类区系种类数量比东海多一倍以上,南海大黄鱼的生存竞争和敌害较之东海大大加强^[3]。硃洲族大黄鱼眼径略长、体高较小可能与其分布水域水温较高、食物竞争较强相关。

3.2 不同种群耳石形态差异

耳石形态广泛用于种内群体判别^[11,22,43-46]和种间判别^[47-50],且在鱼类个体发育研究中有重要地位^[51-53]。硃洲族大黄鱼与闽-粤东族大黄鱼的耳石形态存在显著差异,主成分分析和判别分析均有效区分了这两个种群,其耳石形态差异主要表现在:相比于闽-粤东族,硃洲族大黄鱼耳石整体轮廓较扁,听沟颈部较粗,背后方第一个凹陷较深。

耳石形态受遗传、个体发育、环境因子、摄食和运动量等因素影响^[54],生活在深水的物种或

群体的耳石往往较小、形状更圆更简单^[55-56],运动量较小、底栖摄食的鱼类耳石比运动量较大、中上层摄食的鱼类更圆更简单^[54]。本研究发现,闽-粤东族大黄鱼的耳石比硃洲族大黄鱼耳石略圆,且其耳石相对于体长较小。大黄鱼不同种群栖息水域、运动量缺乏相关研究,这种耳石差异是否与之相关有待验证。

耳石听沟是矢耳石表面的凹陷,连接听觉感官斑和耳石^[57]。在耳石形态判别群体的研究中,耳石听沟形态是形态差异的主要来源^[58],也是种内不同个体发育阶段区分、种间判别的一个有效工具^[59-60]。硃洲族大黄鱼耳石的听沟颈部明显比闽-粤东族大黄鱼耳石听沟颈部更粗,耳石听沟的五个地标点对耳石形态差异的贡献率之和为33.41%。在同为石首鱼科的3种鱼类的种群判别中,听沟形态也是耳石形态差异的主要来源,听沟轮廓判别效果与耳石轮廓判别效果相近^[60]。

3.3 不同种群耳石微化学差异

耳石微化学已应用于众多鱼类的种群判别,包括耳石整体或局部元素的判别^[61-64]。本研究发现,硃洲族大黄鱼的锶钙比值和钡钙比值均显著高于闽-粤东族大黄鱼,而锰钙比值显著低于后者($P<0.0001$),镁钙比值无显著差异($P>0.05$)。

耳石元素的沉积因种而异,受到环境(盐度、温度、水体元素浓度)、遗传和生理因素(生长率、个体发育、繁殖和食物)等多种因素影响^[63,65-66]。研究表明,盐度和温度对耳石锶钙比值有正向影响,而水体锶浓度与耳石锶钙比值的正相关性在不同研究中差异较大,这表明其他因素和水体锶浓

度范围对研究结果影响较大; 水体钡浓度与耳石钡钙比值有较强正相关, 盐度对其有负面影响而温度无影响, 温度和盐度的交互作用比较复杂^[65,67]。锰钙比值与水体中锰浓度无关, 但与温度负相关^[68]。镁钙比值与水体中镁浓度无关, 在高盐组中温度对其无影响, 在其他低盐组中温度对其有正向影响^[67], 另有海水鱼研究发现温度和盐度对耳石镁钙比值无影响^[69]。硃洲族大黄鱼栖息水域温度高、盐度高, 漳州闽-粤东族大黄鱼栖息水域温度较低, 且由于河流汇入近岸盐度较低^[39]。硃洲族大黄鱼和闽-粤东族大黄鱼的耳石钡钙比值、锰钙比值的差异可以由温盐差异解释, 而钡钙比值不能, 可能钡钙比值受到水体钡浓度等因素的影响。因此, 耳石微化学研究应结合水域温盐特征和微量元素浓度等环境特征, 以更好地理解环境与特定鱼类物种的耳石微化学关系。

耳石核心到边缘各元素的比值永久地记录着鱼类整个生活史过程中栖息环境、生理等因素的变化^[70]。两个大黄鱼种群的整个耳石钡钙比值、钡钙比值、锰钙比值基本没有交叉, 表明其栖息水体的温盐等特征基本保持不同, 即这两组样本的栖息水域大致没有重叠。不过本研究中样本均为 1 龄, 两个种群高龄大黄鱼之间是否会出现栖息水域重叠, 有待进一步研究。耳石微化学元素随到耳石核心距离的变化趋势基本一致, 这可能是因为两个种群不同发育阶段的元素沉积能力变化是一致的, 或者两者在发育过程中的环境变化是一致的。大黄鱼产卵场通常在河口湾及岛屿间的低盐浅水区, 仔稚鱼在附近海域索饵育肥, 随着发育逐渐向深水区移动, 秋末冬初渔场水温降低时, 幼鱼向深水区的越冬场洄游^[37]。期间, 盐度、温度、水体元素浓度等环境因素共同影响着耳石微量元素的沉积, 影响较为复杂。未来研究应结合耳石微化学和耳石日轮, 并跟踪鱼类生活史和环境共同探讨鱼类生活史过程中的耳石微化学沉积规律, 特别是对产卵场和育幼场等关键栖息水域的调查研究。

3.4 三种方法的判别效果比较

鱼体形态、耳石形态和耳石微化学均能有效判别大黄鱼硃洲族和闽-粤东族种群, 其中耳石形

态和耳石微化学能完全正确区分两个种群。判别效能的差异可能与遗传因素和环境因素对 3 种表征的相对影响大小有关。研究表明, 遗传因素和环境因素共同作用于鱼体形态差异, 且仅有一项研究同时探讨了遗传和环境因素的作用, 遗传因素对鱼体形态差异的解释率远高于环境因素^[35,71]。即使在没有遗传差异的情况下, 两个种群的耳石形状仍存在表型区别^[72], 种间耳石形态在成鱼个体间存在显著差异, 在幼鱼个体间无显著差异, 种内的个体发育过程中耳石形态发生较大变化^[59]。这反映了生态和环境变化对耳石形态的影响可能超过遗传因素^[73]。耳石微化学主要受环境因子和生理因素影响, 且生理因素起重要作用^[65,74]。因此, 两个大黄鱼地理群体间耳石形态和耳石微化学判别效果优于鱼体形态的原因在于, 两个种群间遗传差异较小, 环境和生理差异更强地体现在耳石形态和耳石微化学上, 而在鱼体形态上表现较弱。

参考文献:

- [1] Lin X Z. Biological characteristics and resources status of three main commercial fishes in offshore waters of China[J]. Journal of Fisheries of China, 1987, 11(3): 187-194. [林新濯. 中国近海三种主要经济鱼类的生物学特性与资源现状[J]. 水产学报, 1987, 11(3): 187-194.]
- [2] Tian M C, Xu G Z, Jin R X. The geographical variation of the morphological characters and the problem of geographical populations in the large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* (Richardson)[J]. Studia Marina Sinica, 1962, 2: 79-97. [田明诚, 徐恭昭, 金日秀. 大黄鱼形态特征的地理变异和地理种群问题[J]. 海洋科学集刊, 1962, 2: 79-97.]
- [3] Xu G Z, Luo B B. The geographical variation of the population structure in the large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea*(Richardson)[J]. Studia Marina Sinica, 1962, 2: 98-109. [徐恭昭, 罗秉征. 大黄鱼种群结构的地理变异[J]. 海洋科学集刊, 1962, 2: 98-109.]
- [4] Liu M, de Mitcheson Y S. Profile of a fishery collapse: Why mariculture failed to save the large yellow croaker[J]. Fish and Fisheries, 2008, 9(3): 219-242.
- [5] Bureau of Fisheries, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China Fishery Statistical Yearbook 2023[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2023[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.]

- [6] Li Z B, Fang X, Chen J, et al. Loss of the genetic diversity in cultivated populations of *Pseudosciaena crocea* by AFLP[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(4): 446-450. [黎中宝, 方秀, 陈锦, 等. 大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)养殖群体遗传多样性的降低[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(4): 446-450.]
- [7] Xu P, Ke Q Z, Su Y Q, et al. Protection and utilization status and prospect of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) germplasm resources[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(4): 674-682. [徐鹏, 柯巧珍, 苏永全, 等. 大黄鱼种质资源保护与利用现状及建议[J]. 水产学报, 2022, 46(4): 674-682.]
- [8] Cadrin S X, Friedland K D, Waldman J R. Stock Identification Methods: Applications in Fishery Science[M]. 2nd eds. London: Academic Press, 2013: 1-3
- [9] Pita A, Casey J, Hawkins S J, et al. Conceptual and practical advances in fish stock delineation[J]. *Fisheries Research*, 2016, 173: 185-193.
- [10] Chen X J, Fang Z, Su H, et al. Review and application of geometric morphometrics in aquatic animals[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(12): 1873-1885. [陈新军, 方舟, 苏杭, 等. 几何形态测量学在水生动物中的应用及其进展[J]. 水产学报, 2013, 37(12): 1873-1885.]
- [11] Yang M, Liu L, Wu Z, et al. Morphology and otolith morphology of *Chelon affinis* populations in the coastal waters of China[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(3): 329-337. [阳敏, 刘璐, 吴桢, 等. 中国近海梭梭群体形态学和耳石形态学研究[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(3): 329-337.]
- [12] Campana S E. Otolith elemental composition as a natural marker of fish stocks[M]//Stock Identification Methods. Amsterdam: Elsevier, 2005: 227-245.
- [13] Tanner S E, Reis-Santos P, Cabral H N. Otolith chemistry in stock delineation: A brief overview, current challenges and future prospects[J]. *Fisheries Research*, 2016, 173: 206-213.
- [14] Zhang Y Q, Guo H Y, Liu B S, et al. Analysis of morphological differences in five large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) populations[J]. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2024, 76(1): 1-9.
- [15] Ma J K. Germplasm resource and population genetics analysis of *Larimichthys crocea* in the offshore of China[D]. Xiamen: Xiamen University, 2021. [马军凯. 中国近海大黄鱼种质资源现状及群体遗传学分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.]
- [16] Wang Y, Ke Q Z, Liu J F, et al. Comparison on morphology, scales and otolith characteristics between cultured stock and wild stock of *Larimichthys crocea*[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(2): 149-156. [王映, 柯巧珍, 刘家富, 等. 大黄鱼养殖群体和野生群体形态、鳞片及耳石特征比较[J]. 海洋渔业, 2016, 38(2): 149-156.]
- [17] Zhang Y Z, Wang Z Y, Lin L M, et al. Comparative study on differences of morphologic characters of seven different stocks of the cultured large yellow croakers (*pseudosciaena crocea*) belonging to the Min-Yuedong tribe in Guanjingyang Sea area, Fujian Province[J]. *Journal of Jimei University Natural Science*, 2005, 10(3): 193-199. [张雅芝, 王志勇, 林利民, 等. 养殖条件下闽-粤东族大黄鱼不同群体形态特征的比较研究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2005, 10(3): 193-199.]
- [18] Shen W L, Wu X F, Shentu J K, et al. The effects of different diets and culture environments on the morphological variations in the large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(6): 70-77. [沈伟良, 吴雄飞, 申屠基康, 等. 不同饵料及养殖环境对大黄鱼(*Larimichthys crocea*)形态差异的影响[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(6): 70-77.]
- [19] Bai M, Yang X K. Application of geometric morphometrics in biological researches[J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2007, 44(1): 143-147. [白明, 杨星科. 几何形态测量法在生物形态学研究中的应用[J]. 昆虫知识, 2007, 44(1): 143-147.]
- [20] Zhang X X, Zhu Q Y, Zhao J. Geometric morphometric analysis of body-form variability in populations of *Tanichthys albonubes*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(9): 1365-1373. [张秀霞, 朱巧莹, 赵俊. 利用几何形态测量学方法分析唐鱼群体的形态变异[J]. 水产学报, 2017, 41(9): 1365-1373.]
- [21] Zelditch M. A landmark book on landmark data morphometric tools for landmark data: Geometry and biology fred L. bookstein[J]. *BioScience*, 1998, 48(10): 855-858.
- [22] Xu Y, Jiang T, Liu H B, et al. Population identification for *Coilia nasus* in Anhui section of the Changjiang river based on otolith geometric morphometric analysis[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(9): 1497-1505. [许颖, 姜涛, 刘洪波, 等. 基于耳石几何形态测量学的长江安徽江段刀鲚群体识别研究[J]. 水生生物学报, 2023, 47(9): 1497-1505.]
- [23] Xu Y J, Tang X Y, Yan X J, et al. Speculation of migration routes of *Larimichthys crocea* in the East China Sea based on otolith microchemistry[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(9): 128-140. [许永久, 唐心悦, 严小军, 等. 基于耳石微化学的东海大黄鱼洄游路线推测[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 128-140.]
- [24] Adams D C, Otárola-Castillo E. Geomorph: An r package for the collection and analysis of geometric morphometric shape data[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2013, 4(4): 393-399.
- [25] Adams D, Collyer M, Kaliontzopoulou A, et al. Geomorph:

- Software for geometric morphometric analysis [CP]. Comprehensive R Archive Network, 2016
- [26] Baken E K, Collyer M L, Kaliontzopoulou A, et al. Geomorph v4.0 and gmShiny: Enhanced analytics and a new graphical interface for a comprehensive morphometric experience[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, 12(12): 2355-2363.
- [27] Gower J C. Generalized Procrustes analysis[J]. *Psychometrika*, 1975, 40(1): 33-51.
- [28] Rohlf F J, Slice D. Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks[J]. *Systematic Biology*, 1990, 39(1): 40-59.
- [29] Quitau M, Frelat R, Bonhomme V, et al. Traits, landmarks and outlines: Three congruent sides of a tale on coral reef fish morphology[J]. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(4): e8787.
- [30] Nash: C M, Lungstrom L L, Hughes L C, et al. Phylogenomics and body shape morphometrics reveal recent diversification in the goatfishes (Syngnatharia: Mullidae)[J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2022, 177: 107616.
- [31] Cadrin S X. Advances in morphometric identification of fishery stocks[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2000, 10(1): 91-112.
- [32] Tzeng T D. Morphological variation between populations of spotted mackerel (*Scomber australasicus*) off Taiwan[J]. *Fisheries Research*, 2004, 68(1): 45-55.
- [33] Barlow G W. Causes and significance of morphological variation in fishes[J]. *Systematic Zoology*, 1961, 10(3): 105-117.
- [34] Swain D P, Holtby L B. Differences in morphology and behavior between juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) rearing in a lake and in its tributary stream[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 46(8): 1406-1414.
- [35] Langerhans R B. Predictability of phenotypic differentiation across flow regimes in fishes[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2008, 48(6): 750-768.
- [36] Haas T C, Blum M J, Heins D C. Morphological responses of a stream fish to water impoundment[J]. *Biology Letters*, 2010, 6(6): 803-806.
- [37] Su Y Q. Breeding and farming of pseudosciaena crocea[M]. Beijing: Ocean Press, 2004. [苏永全. 大黄鱼养殖[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.]
- [38] Li M Y, Miao L, Chen J, et al. Division of populations for pseudosciaena crocea based on population ecology concept: Discussion[J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2013, 26(1): 1-5. [李明云, 苗亮, 陈炯, 等. 基于种群生态学概念论大黄鱼种群的划分[J]. 宁波大学学报(理工版), 2013, 26(1): 1-5.]
- [39] Zhang Z X. Observation and analysis of the coastal current and its adjacent current system in the China offshore waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. [张志欣. 中国近海沿岸流及毗邻流系的观测与分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.]
- [40] Lema S C, Bock S L, Malley M M, et al. Warming waters beget smaller fish: Evidence for reduced size and altered morphology in a desert fish following anthropogenic temperature change[J]. *Biology Letters*, 2019, 15(10): 20190518.
- [41] Xie Z M. Aquaculture Techniques for Large Yellow Croaker [M]. Beijing: Jindun Press, 2004. [谢忠明. 大黄鱼养殖技术[M]. 北京: 金盾出版社, 2004.]
- [42] Lema S C, Nevitt G A. Testing an ecophysiological mechanism of morphological plasticity in pupfish and its relevance to conservation efforts for endangered Devils Hole pupfish[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(Pt 18): 3499-3509.
- [43] 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.
- [44] Torres G J, Lombarte A, Morales-Nin B. Sagittal otolith size and shape variability to identify geographical intraspecific differences in three species of the genus *Merluccius*[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2000, 80(2): 333-342.
- [45] Tuset V M, Lozano I J, González J A, et al. Shape indices to identify regional differences in otolith morphology of comber, *Serranus cabrilla* (L., 1758)[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2003, 19(2): 88-93.
- [46] Yedier S, Bostancı D, Konaş S, et al. Comparison of otolith morphology of invasive big-scale sand smelt (*Atherina boyeri*) from natural and artificial lakes in Turkey[J]. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 2019, 18: 635-645.
- [47] Tuset V M, Lombarte A, González J A, et al. Comparative morphology of the sagittal otolith in *Serranus* spp[J]. *Journal of Fish Biology*, 2003, 63(6): 1491-1504.
- [48] Monteiro L R, Di Benedetto A P M, Guillermo L H, et al. Allometric changes and shape differentiation of *Sagitta* otoliths in sciaenid fishes[J]. *Fisheries Research*, 2005, 74(1): 288-299.
- [49] He T, Cheng J, Qin J G, et al. Comparative analysis of otolith morphology in three species of *Scomber*[J]. *Ichthyological Research*, 2018, 65(2): 192-201.
- [50] Jawad L A, Shamsan E F, Aguilar G, et al. Scanning electron microscopy and morphological analysis reveal differences in

- the otolith morphology of three species of the family Lethrinidae (Teleostei: Perciformes) from Yemen[J]. Anatomical Record (Hoboken, N J, 2023, 306(3): 651-664.
- [51] Liu Z Y, Li S F, Xu X M, et al. Morphological development and microstructure of sagittal otolith of large yellow croaker, *Larimichthys crocea* during larval and early juvenile stages[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(5): 863-871. [刘志远, 李圣法, 徐献明, 等. 大黄鱼仔稚鱼不同发育阶段矢耳石形态发育和微结构特征[J]. 中国水产科学, 2012, 19(5): 863-871.]
- [52] Vignon M. Ontogenetic trajectories of otolith shape during shift in habitat use: Interaction between otolith growth and environment[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2012, 420: 26-32.
- [53] Biolé F G, Callicó Fortunato R, Thompson G A, et al. Application of otolith morphometry for the study of ontogenetic variations of *Odontesthes argentinensis*[J]. Environmental Biology of Fishes, 2019, 102(10): 1301-1310.
- [54] Assis I O, da Silva V E L, Souto-Vieira D, et al. Ecomorphological patterns in otoliths of tropical fishes: Assessing trophic groups and depth strata preference by shape[J]. Environmental Biology of Fishes, 2020, 103(4): 349-361.
- [55] Wilson R R. Depth-related changes in *Sagitta* morphology in six macrourid fishes of the Pacific and Atlantic Oceans[J]. Copeia, 1985, 1985(4): 1011-1017.
- [56] Gauldie R. An eco-morphological explanation of individual variability in the shape of the fish otolith: Comparison of the otolith of *Hoplostethus atlanticus* with other species by depth[J]. Journal of Fish Biology, 2002, 60(5): 1204-1221.
- [57] Platt C, Popper A N. Fine structure and function of the ear[M]//Tavolga W N, Popper A N, Fay R R, eds. Proceedings in Life Sciences. New York: Springer New York, 1981: 3-38.
- [58] Jiang T, Zheng 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. [姜涛, 郑朝臣, 黄洪辉, 等. 基于地标点法的九龙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.]
- [59] Montanini S, Stagioni M, Valdrè G, et al. Intra-specific and inter-specific variability of the sulcus acusticus of sagittal otoliths in two gurnard species (Scorpaeniformes, Triglidae)[J]. Fisheries Research, 2015, 161: 93-101.
- [60] Song J J. Otolith and sulcus morphology analyses and their applications in stock discrimination of three Sciaenids [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018. [宋俊杰. 耳石和听沟形态分析方法及其在三种石首科鱼类群体判别中的应用[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.]
- [61] Patterson H M, McBride R S, Julien N. Population structure of red drum (*Sciaenops ocellatus*) as determined by otolith chemistry[J]. Marine Biology, 2004, 144(5): 855-862.
- [62] Bergenius M A J, Mapstone B D, Begg G A, et al. The use of otolith chemistry to determine stock structure of three epinepheline serranid coral reef fishes on the Great Barrier Reef, Australia[J]. Fisheries Research, 2005, 72(2): 253-270.
- [63] Avigliano E, de Carvalho B M, Leisen M, et al. Otolith edge fingerprints as approach for stock identification of *Genidens barbatus*[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 194: 92-96.
- [64] Wang Y J, Kong X, Zhao W X, et al. Microchemical characteristics of otoliths and stock discrimination of *Hexagrammos otakii* from the Bohai and Yellow Seas[J]. Marine Sciences, 2023, 47(1): 54-65. [王英俊, 孔晓, 赵文溪, 等. 渤、黄海大泷六线鱼耳石微化学特征与群体判别[J]. 海洋科学, 2023, 47(1): 54-65.]
- [65] Izzo C, Reis-Santos P, Gillanders B M. Otolith chemistry does not just reflect environmental conditions: A meta-analytic evaluation[J]. Fish and Fisheries, 2018, 19(3): 441-454.
- [66] Nazir A, Khan M A. Using otoliths for fish stock discrimination: Status and challenges[J]. Acta Ichthyologica et Piscatoria, 2021, 51(2): 199-218.
- [67] Miller J A. Effects of water temperature and Barium concentration on otolith composition along a salinity gradient: Implications for migratory reconstructions[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, 405(1-2): 42-52.
- [68] Miller J A. The effects of temperature and water concentration on the otolith incorporation of Barium and manganese in black rockfish *Sebastes melanops*[J]. Journal of Fish Biology, 2009, 75(1): 39-60.
- [69] Bath Martin G, Thorrold S R. Temperature and salinity effects on magnesium, manganese, and Barium incorporation in otoliths of larval and early juvenile spot *Leiostomus xanthurus*[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 293: 223-232.
- [70] Campana S E, Chouinard G A, Hanson J M, et al. Otolith elemental fingerprints as biological tracers of fish stocks[J]. Fisheries Research, 2000, 46(1): 343-357.
- [71] Keeley E R, Parkinson E A, Taylor E B. The origins of ecotypic variation of rainbow trout: A test of environmental vs. genetically based differences in morphology[J]. Journal

- of Evolutionary Biology, 2007, 20(2): 725-736.
- [72] Geladakis G, Batargias C, Somarakis S, et al. Stock discrimination of gilthead seabream (*Sparus aurata* Linnaeus, 1758) through the examination of otolith morphology and genetic structure[J]. Fishes, 2023, 8(6): 291.
- [73] Burke N, Brophy D, King P A. Shape analysis of otolith annuli in Atlantic herring (*Clupea harengus*); a new method for tracking fish populations[J]. Fisheries Research, 2008, 91(2): 133-143.
- [74] Sturrock A M, Hunter E, Milton J A, et al. Quantifying physiological influences on otolith microchemistry[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2015, 6(7): 806-816.

Stock discrimination of *Larimichthys crocea* from Naozhou and Min-yuedong groups based on fish morphology, otolith morphology and chemistry

YANG Min¹, QIN Jiao¹, GU Long^{1,2}, LI Ruojing¹, ZHAO Na¹, ZHANG Bo¹

1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524000, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, China

Abstract: *Larimichthys crocea*, an economically important fish species along the coast of China, has faced severe threats to its resources in recent years due to overfishing and loss of genetic diversity. To characterize the phenotypic traits of the less-studied Naozhou group of *L. crocea*, a combination of fish morphology, otolith morphology, and otolith chemistry was employed to discriminate the two stocks of *L. crocea*, the Naozhou and Min-yuedong groups sampled in Zhanjiang and Zhangzhou, respectively. The results of the principal component analysis indicated that the two populations could not be separated by the first two principal components of fish morphology, but could be distinctly separated by otolith morphology. Analysis of variance (ANOVA) indicated significant differences in fish and otolith morphologies between the two stocks ($P < 0.05$). The deformation diagram of fish morphology showed that Naozhou individuals were generally more elongated, with relatively shorter pectoral fin bases than Min-Yuedong individuals ($P < 0.05$). A deformation diagram of otolith morphology revealed that the otoliths of the Naozhou stock were more compressed overall, exhibiting a thicker neck in the sulcus and a relatively deeper first posterior dorsal depression than those of the Min-Yuedong stock ($P < 0.001$). Otolith chemical analysis revealed that the Ba/Ca and Sr/Ca ratios in the otoliths of the Naozhou stock were significantly higher than those in the Min-Yuedong stock, whereas the Mn/Ca ratio was significantly lower ($P < 0.0001$). There were no significant differences in the Mg/Ca ratios ($P > 0.05$). The Sr/Ca ratios exhibited the most pronounced differences between the two stocks from the core to the edge of the otolith when compared to the ratios of Ba, Mg, and Mn with Ca, with virtually no overlap at the measurement points. Discriminant analysis results indicated that the discrimination accuracy based on fish morphology (85.2%) was lower than that based on otolith morphology (100%) and chemistry (100%). The morphological differences between the two groups may be related to the differences in water flow and temperature between their habitats, with the Naozhou group inhabiting lower-flow and higher-temperature environments. Variations in otolith chemistry can be partly explained by salinity and temperature. Fish morphology, otolith morphology, and microchemical analyses demonstrated sufficient efficacy in the stock identification of the Naozhou and Min-yuedong groups of *L. crocea*. These findings provide a scientific basis for stock discrimination and fishery management of *L. crocea*.

Key words: *Larimichthys crocea*; stock discrimination; morphology; landmarks; otolith microchemistry; Naozhou group; Min-yuedong group

Corresponding author: ZHANG Bo. E-mail: zb611273@163.com.