

基于几何形态测量学的秋刀鱼雌雄个体形态差异分析和鉴定

殷兴俊¹, 花传祥^{1,2,3}, 朱清澄^{1,2,3}

1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306

2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306

3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306

摘要: 秋刀鱼 (*Cololabis saira*) 广泛分布于西北太平洋海域, 是中国远洋渔业的主要捕捞对象之一。为探究其雌、雄个体间的形态差异并有效区分其性别, 根据 2022 年 5—11 月西北太平洋公海采集的 150 尾秋刀鱼样本的鱼体图片和生物学数据, 首次采用几何形态测量学的地标点法对雌、雄秋刀鱼进行形态学研究, 并通过判别分析构建了性别鉴定模型。其中样本分为 2 批, 第 1 批 107 尾用于形态分析和鉴定模型的构建, 第 2 批 43 尾用于检验模型的实际应用情况。结果表明, 在相对扭曲主成分分析中, 第 1 和第 2 主成分分别解释了总变异的 63.43% 和 11.79%, 降维效果和散点图区分效果均较好。其中 I 型和 II 型地标点的累积贡献率分别为 57.94% 和 41.83%, 说明在秋刀鱼雌、雄个体的形态区分上, I 型和 II 型地标点的作用较大, III 型地标点的作用较小。薄板样条分析结果显示, 秋刀鱼雌、雄个体的形态差异主要表现在眼部、躯干前部和尾部。第 1 批 107 尾秋刀鱼的判别分析和交叉验证结果显示, 判别正确率分别为 91.6% 和 88.8%。将该模型用于第 2 批 43 尾秋刀鱼的性别鉴定时, 判别正确率为 88.45%。综上所述, 几何形态测量学分析可以作为秋刀鱼形态学研究和性别鉴定的有效方法。

关键词: 秋刀鱼; 几何形态测量学; 地标点法; 形态差异; 性别鉴定

中图分类号: S 931

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Analysis of morphological differences and discrimination between female and male *Cololabis saira* based on geometric morphometrics

YIN Xingjun¹, HUA Chuanxiang^{1,2,3}, ZHU Qingcheng^{1,2,3}

1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China

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

Abstract: Pacific saury (*Cololabis saira*) is widely distributed in the Northwest Pacific Ocean and is one of the main targets of Chinese pelagic operations. To investigate the morphological differences between female and male individuals and differentiate the two sexes effectively, we applied geometric land mark method morphometrics for the first time on 150 Pacific saury samples which were collected from the Northwest Pacific high seas during May–November, 2022, so as to analyze their morphology and establish a sex differentiation model via discriminant analysis with fish images and biological data. The samples were divided into two batches: Batch 1 (107 individuals) was used for morphological analysis and model construction, while Batch 2 (43 individuals) was used to test the model's practical application. The results show that in the relative warp analysis, the first and second principal components explained 63.43% and 11.79% of the total variation, respectively, with good dimensionality reduction and

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-06-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2401302)

作者简介: 殷兴俊 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源。E-mail: 18262304951@163.com

通信作者: 花传祥 (1982—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为远洋渔业系统集成。E-mail: cxhua@shou.edu.cn

scatter plot separation effects. Landmark I and II contributed cumulatively to 57.94% and 41.83% of the variance, respectively, indicating that these landmark types play a significant role in the discrimination between two sexes, whereas Landmark III had lesser influence. The results of the thin-plate spline analysis show that the morphological differences between them were mainly in the eyes, the front part of the trunk and the tail. The results of discriminant analysis and cross-validation of Batch 1 showed correct discrimination rates of 91.6% and 88.8%, respectively. When applying the model to Batch 2 for sex discrimination, the correct discrimination rate was 88.45%. Thus, geometric morphometrics analysis is an effective method for morphological studies and sex identification of *C. saira*.

Keywords: *Cololabis saira*; Geometric morphometrics; Land mark method; Morphological differences; Sex discrimination

性别鉴定是鱼类生物学研究的重要组成部分,对鱼类的资源评估和保护十分重要^[1]。然而,多数鱼类在非繁殖期缺乏明显的外部性别特征,导致性别识别面临极大挑战^[2]。目前,对于雌、雄形态差异不明显的鱼类,常用的鉴定方法有解剖观察^[1]、性腺组织切片^[3]、超声波技术^[4]及性别特异性DNA分子标记^[5]等。这些鉴定方法虽然准确率较高,但需侵入鱼体内部,导致检测鱼死亡,且工作量大、耗时长^[6]。相比之下,利用大量鱼类样本的传统形态测量数据和框架指标来进行鉴定是一种更为有效的方法,对尖头塘鳢(*Eleotris oxycephala*)^[2]、暗纹东方鲀(*Takifugu fasciatus*)^[7]、日本鲈(*Scomber japonicus*)和澳洲鲈(*S. australasicus*)^[8]等的鉴定准确率可达70%~89%。但该方法存在仅依赖直线距离表达复杂的生物形态^[9],忽视整体形态变化与几何信息的完整性^[10],且易出现参数重叠,阻碍对局部形态差异的识别等^[11-12]局限性。因此,传统方法难以精确揭示生物形态演变规律,而如何高效获取与精准分析生物样本形态信息,已成为生物学研究的核心问题。直至1980—2000年,Bookstein和Rohlf等开创了几何形态测量学(Geometric morphometrics, GM)这一新方法^[13-15],该方法摒弃了数据的不同源性、不可重复性以及大小和形状无法分开讨论的缺点,同时能够将形态量化和可视化,从而更好地反映物种的形态变化规律,被广泛应用于各个领域。

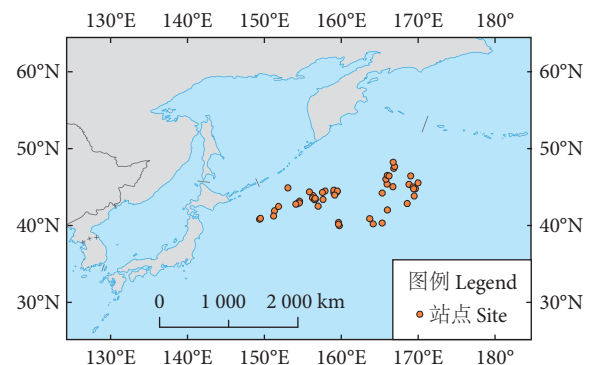
秋刀鱼(*Cololabis saira*)隶属于颌针鱼目、竹刀鱼科、秋刀鱼属,是冷温性中上层高度洄游鱼类,广泛分布于西北太平洋亚热带到温带海域^[16]。国内外对于秋刀鱼的研究主要集中在生物学^[17]、渔场分布^[18-19]、渔情预报^[20]以及渔具、渔法^[21]等方面,其形态学研究多集中于耳石在年龄生长与空间分布等方面的应用^[22],而对雌、雄个体形态差异的研究匮乏。此外,其性别鉴定依赖于性腺的解

剖观察,虽然两者性腺在形态、大小、颜色之间有着较为明显的差异^[23],但鉴定过程易受个体大小、发育阶段及人为操作误差等影响,且必须对样本进行剖杀,造成样本资源浪费,因此需要一个更为有效且非损伤的方法^[24]。几何形态测量学的地标点法,指通过选取显著特征点、收集数据,并运用统计学方法对比组间差异,可以有效揭示形态特征变化,具有数据采集简便、分析快捷的优势^[25]。鉴于上述考虑,本研究首次运用该方法,以秋刀鱼雌、雄个体为对象,通过选取特征点、采集信息并进行统计分析,旨在揭示其两性形态差异,评估地标点法在秋刀鱼性别鉴定中的效果,以期提供便捷、高效的鉴定手段,丰富秋刀鱼的形态学研究。

1 材料与方法

1.1 材料

秋刀鱼样本由蓬莱京鲁渔业有限公司的“鲁蓬远渔027”生产船在西北太平洋公海海域采集,采样时间为2022年5—11月,采样范围为149°E—170°E, 40°N—48°N(图1)。记录捕捞地点和时间后,对样本进行冷冻储存。随机采集样本161尾,通过解剖观察性腺以获取其性别信息,该步骤实施



审图号: GS粤(2024)1939号

图1 西北太平洋秋刀鱼采样点

Fig. 1 Sampling sites of *C. saira* in northwest Pacific

双盲鉴定策略,即由 2 位独立人员分别进行,对比结果以验证其一致性,确保研究数据准确。鉴定结果显示 161 尾样本中,150 尾可以准确鉴定性别,8 尾因性腺特征不明显、样本保存状态不佳或操作失误,致使其性别无法准确鉴定,3 尾因判定结果存在分歧,同样视作性别无法准确鉴定。因此,剔除 11 尾无法鉴定性别的个体后,最终以 150 尾样本作为研究对象,将其分为两批;第 1 批共

107 尾,雌性 52 尾、雄性 55 尾,用于地标点法的形态分析以及分类模型的构建;第 2 批共 43 尾,雌性 25 尾、雄性 18 尾,将该批样本带入所构建的分类模型进行性别鉴定,比对预测性别和实际性别,用于检验该模型的实际应用,即对性别未知秋刀鱼的鉴定准确率。一般来说,性成熟的秋刀鱼体长为 250~314 mm,且雌、雄个体的体长无明显差异^[26],样本的具体信息见表 1。

表1 秋刀鱼的采样信息
Table 1 Sampling information of *C. saira*

样本批次 Batch of samples	性别 Sex	样本数 Number of samples/尾	体长 Body length/mm		体质量 Body mass/g	
			范围 Range	均值±标准差 Mean±SD	范围 Range	均值±标准差 Mean±SD
第 1 批 Batch 1	雌♀	52	219~281	260.65±13.36	65.3~109.2	75.90±12.92
	雄♂	55	237~301	272.75±10.53	72.9~115.3	97.71±12.73
第 2 批 Batch 2	雌♀	25	235~297	258.40±10.61	79.2~111.6	92.56±10.14
	雄♂	18	244~286	266.86±11.37	76.3~117.9	94.12±13.62

1.2 图像的获取和处理

在保证秋刀鱼鱼体形态保存完好的情况下,对样本进行解冻和固定,确保样本处于自然伸展状态,然后添加比例尺,使用相机对其进行拍照。本研究使用的相机型号为 Nikon D800,将相机固定在三脚架上并使用无线快门进行拍摄,防止抖动。将样本平放至桌面,始终保持镜头垂直于样本,且间距在 40 cm 左右。为保证后续形态分析的响应效率,对样本图片批量进行灰度化处理,降低图像中的噪音和冗余信息,便于后续使用。

1.3 几何形态测量学分析

1.3.1 地标点的建立和提取

地标点在形态分析中可分为 3 种类型^[27]: I 型

地标点指不同组织间的交点,可被具体定位;II 型地标点指形态结构中的凹凸点;III 型地标点指形态结构中的极值,由相对其他地标点位置定义,严格来说算半地标点^[28]。结合地标点的定义和具体要求,本研究选取了 17 个地标点,其中 4、7、11、12、14—17 为 I 型地标点,2、3、5、6、8、9、13 为 II 型地标点,1 和 10 为 III 型地标点(图 2、表 2)。使用 R 语言 geomorph 包中的“digitize2d”函数设置好比例尺并对样本进行地标点的构建,此过程重复 2 遍取平均值,以避免测量误差^[29],然后进行最小平方和法则回归分析检验地标点选取的有效性,最后使用“readmulti.tps”函数读取坐标数据供后续分析使用。

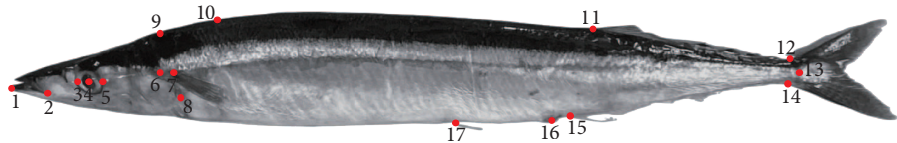


图2 秋刀鱼鱼体的地标点位置
Fig. 2 Location of landmarks on body of *C. saira*

1.3.2 平均形和薄板样条分析

对于第 1 批 107 尾秋刀鱼,使用“gpagen”函数进行广义普鲁克提斯分析 (Generalized procrustes analysis, GPA),对所有样本的地标点进行平移、旋转和缩放,达到叠印的效果,排除非形态变异的干

扰^[27,30],计算所有样本地标点的平均坐标,得到平均形。根据平均形使用“gm.prcomp”函数进行相对扭曲主成分分析,并保存输出后所有样本的相对扭曲得分 (Relative warps scores, RW) 矩阵供后续分析使用^[31]。使用“plotRefToTarget”函数进行薄板

表2 地标点类型与定义
Table 2 Landmark types and definition

地标点类型 Landmark type	定义 Definition
I 型地标点 Landmark I	
4	眼中心
7	胸鳍起点
11	背鳍起点
12	尾鳍基部上端
14	尾鳍基部下端
15	臀鳍起点
16	消化道末端开口
17	腹鳍起点
II 型地标点 Landmark II	
2	口裂末端
3	眼前缘
5	眼后缘
6	鳃盖上缘
8	鳃盖后缘
9	以 7 点向上作垂线与鱼体的交点
13	尾柄末端
III 型地标点 Landmark III	
1	吻端
10	躯干前部最大弯曲处

样条分析 (Thin-Plate spline, TPS)^[32], 得到各样本的形变网格图, 并将网格图与平均形进行比较, 以实现秋刀鱼雌、雄形态差异的可视化。以上所有分析均在 R 语言 4.2.0 版本中的 “geomorph” 包中完成。

1.3.3 判别分析

根据第 1 批 107 尾秋刀鱼的相对扭曲得分, 使用 R 语言 MASS 包中的 “lda” 函数和 caret 包中的 “train” 函数分别进行逐步判别分析 (Stepwise discriminant analysis, SDA) 和交叉验证 (Cross-Validation, CV), 构建并评估性别鉴定模型, 判别方法采用 Bayes 法, 交叉验证采用留一交叉验证法 (Leave-One-Out Cross-Validation, LOOCV)^[32]。再将第 2 批的 43 尾秋刀鱼沿用相同的地标点构建方法, 与第 1 批的 107 尾同时进行相对扭曲主成分分析, 将得出的相对扭曲得分带入所构建的鉴定模型中, 再通过解剖确定实际性别, 与模型预测结果对比, 从而验证模型的鉴定准确率。

2 结果

2.1 几何形态分析

最小平方和法则回归分析结果显示, 本研究中的秋刀鱼鱼体地标数据点的切空间距离 (y 轴) 和普氏距离 (x 轴) 的回归系数为 0.999 973, 接近 1, 说明本研究所选取的地标点有效, 可用于下一步分析。

根据地标点坐标数据计算得出的秋刀鱼雌、雄鱼体的平均形, 以及所有地标点的叠印效果如图 3 所示。根据平均形进行相对扭曲主成分分析, 结果显示共提取了 30 个主成分, 其中第 1 主成分 (PC1) 贡献率为 63.43%, 第 2 主成分 (PC2) 贡献率为 11.79%, 累积贡献率为 75.22%, 说明前 2 个主成分可以概括秋刀鱼雌、雄个体间的主要形态差异。PC1 和 PC2 的散点图见图 4, 雌、雄个体间有少量散点重叠且形成各自较为集中的 2 个区域, 说明主成分散点图的区分效果较好。17 个地标点在

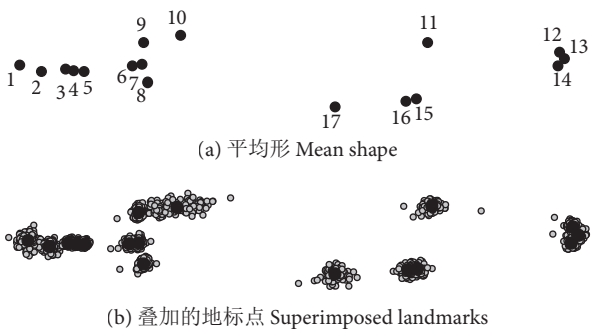


图3 秋刀鱼鱼体所有地标点的平均形和叠加示意图
Fig. 3 Diagrams of mean shape and superimposition of all landmarks on body of *C. saira*

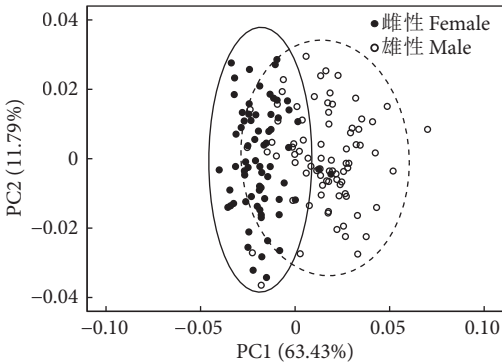


图4 不同性别秋刀鱼形态特征的第 1 和第 2 主成分散点示意图

注: 实线和虚线分别代表雌性和雄性的置信区间。

Fig. 4 Scatter plots of PC1 and PC2 of different sexes of *C. saira*

Note: Solid and dashed lines represent confidence intervals for females and males, respectively.

相对扭曲主成分分析过程中的贡献率显示, I 型地标点累积贡献率为 57.94%, 其中地标点 4 和 7 的贡献率较高, 分别为 46.47% 和 5.11%; II 型地标点累积贡献率为 41.83%, 其中地标点 3 和 5 的贡献率较高, 分别为 17.21% 和 15.14%; III 型地标点的累积贡献率仅为 0.197%, 说明在秋刀鱼雌、雄个体的形态区分中, I 型和 II 型地标点的作用较大, III 型地标点的作用较小(表 3)。

2.2 形态差异可视化

通过薄板样条分析对秋刀鱼雌、雄个体的鱼体网格进行扭曲变形, 得出网格形变图(图 5)。结果显示, 相对于网格平均形而言, 秋刀鱼雌、雄个体的形态差异在地标点 3、4、5、9、10、12、13 和 14 上区别较为明显(眼部、躯干前部和尾部)。这些形态差异具体表现为雌性的眼中心往眼后缘偏移而雄性往眼前缘偏移; 雌性躯干部最大弯曲处较雄性更加接近头部; 雌性尾鳍基部下端相较于上端向左偏移且远离尾柄末端, 而雄性的尾鳍基部下端与上端较为对齐且略微向右偏移, 同时靠近尾柄末端。

2.3 判别分析

将第 1 批 107 尾样本的 30 个相对扭曲得分建立 Bayes 判别函数, 采用逐步判别分析和交叉验证的方法进行判别分析。结果显示, 在进行逐步判别分析时, RW1、RW4、RW5、RW6、RW7、RW8、RW18、RW25 等 8 个变量被纳入判别函数, 同时组平均值的同等检验(One-way ANOVA)显示, 这 8 个变量的均值均不相等($p<0.05$), 表明可以用于预测模型的构建。采用 Wilks' Lambda 检

表3 每个地标点在相对扭曲主成分分析中的贡献率
Table 3 Contribution rate of each landmark on relative warps

地标点 Landmark	贡献率 Contribution rate/%
1	0.15
2	1.53
3	17.21
4	46.47
5	15.14
6	4.62
7	5.11
8	0.19
9	0.14
10	0.05
11	0.01
12	1.03
13	3.01
14	0.88
15	2.15
16	2.31
17	0.02

验对由 8 个相对扭曲得分构建的鉴定模型进行残余区别力分析, 结果显示模型性能较好($p<0.01$), 故可作为判别分析的有效依据, 判别方程系数见表 4。对第 1 批的 107 尾秋刀鱼进行性别回判, 结果显示, 52 尾雌性里有 6 尾被错判, 判别正确率

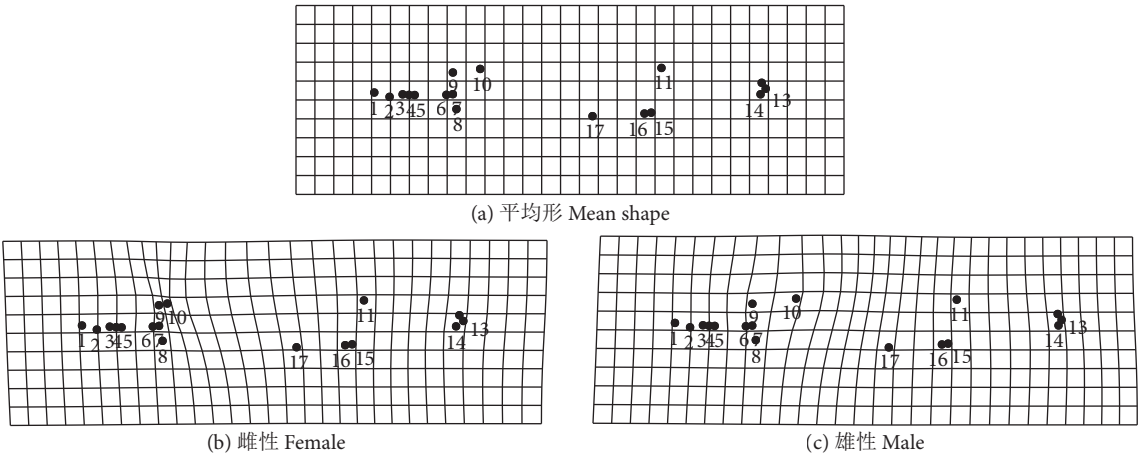


图5 不同性别秋刀鱼的网格变形图和变异可视化(变异扩大 3 倍)

Fig. 5 Grid deformation and variation visualization of different sexes of *C. saira* (Variation are enlarged 3 times)

为 88.5%; 55 尾雄性里有 3 尾被错判, 判别正确率为 94.5%; 综合判别正确率为 91.6%。交叉验证结果显示, 52 尾雌性里有 8 尾被错判, 判别正确率为 86.4%; 55 尾雄性里有 4 尾被错判, 判别正确率为 92.7%; 综合判别正确率为 88.8% (表 5)。尽管交叉验证的正确率低于逐步判别分析, 但两者均保持在较高水平, 表明模型预测效果较好, 具有良好的泛化性能。

表4 秋刀鱼鱼体的雌雄判别方程系数
Table 4 Coefficients of female and male discrimination functions for body of *C. saira*

性状 Characteristics	方程 1 雌性 Function 1 for female	方程 2 雄性 Function 2 for male
RW1	-30.086	26.344
RW4	95.254	-91.117
RW5	86.747	-54.486
RW6	122.796	-99.142
RW7	-59.675	54.684
RW8	-42.726	132.809
RW18	529.118	-580.991
RW25	385.023	-363.849
常数 Constant	-1.532	-1.466

注: RW 表示相对扭曲得分。
Note: RW represents relative warps scores.

表5 第 1 批秋刀鱼的雌雄判别结果
Table 5 Results of female and male discrimination in Batch 1 of *C. saira*

项目 Item	实际性别 Actual sex	预测性别 Predicted sex		判别正确率 Identification accuracy/%	综合正确率/% Total accuracy/%
		雌性 Female	雄性 Male		
逐步判别分析 SDA	雌♀	46	6	88.5	91.6
	雄♂	3	52	94.5	
交叉验证 CV	雌♀	44	8	86.4	88.8
	雄♂	4	51	92.7	

利用该模型对第 2 批 43 尾秋刀鱼进行性别鉴定并解剖比对实际性别, 结果显示, 43 尾秋刀鱼中, 实际雌性有 25 尾, 其中有 3 尾被错判, 判别正确率为 88%; 实际雄性有 18 尾, 其中有 2 尾被错判, 判别正确率为 88.9%; 综合判别正确率为 88.45% (表 6), 判别正确率较高, 表明模型在应对性别未知的样本时仍能保持稳健的预测效能。

表6 判别方程对第 2 批秋刀鱼的雌雄判别结果
Table 6 Results of function for female and male discrimination in Batch 2 of *C. saira*

实际性别 Actual sex	预测性别 Predicted sex		判别正确率 Identification accuracy/%	综合正确率 Total accuracy/%
	雌性 Female	雄性 Male		
雌性 Female	22	3	88.0	88.45
雄性 Male	2	16	88.9	

3 讨论

3.1 地标点方案的选取

几何形态测量学的地标点法中, 地标点位置和数量的选取很大程度上会直接影响其实际应用效果。不恰当的位置选择可能导致重要形态特征遗漏, 而数量增加虽能提升特征描述的精确度, 但过量可能导致数据冗余, 数量不足则无法充分描述形态^[33]。此外, 样本量同样影响形态分析结果^[34]。本研究首次尝试将该技术应用于秋刀鱼的鱼体形态研究, 从而实现对秋刀鱼雌、雄个体形态差异的分析和鉴定, 其地标点的位置和数量均根据地标点的具体定义和原理进行构建。结果表明 I 型和 II 型地标点对于形态区分的效果较好, III 型地标点的作用不明显, 其中眼部地标点 3、4、5 的贡献率较高, 在选取时不可忽略。这可能与秋刀鱼的趋光性有关, 雌性秋刀鱼在产卵后会改变以往垂直运动的习性且眼睛对光的反应会变得不敏感^[35], 从而导致眼部形态与雄性产生差异。尽管最小平方和回归验证了地标点的有效性, 形态差异与判别分析表现良好, 但地标点方案与样本量对形态分析的具体影响尚待探究。未来研究需明确不同方案与样本量下的最优配置, 以优化形态分析效能。

3.2 几何形态测量学在水生动物中的应用

几何形态测量学方法因其诸多优势, 已被广泛应用在水生动物的群体鉴别^[36]、个体形态发育^[37]、分类鉴定^[38]等研究领域。张秀霞等^[39]采用地标点法对不同群体间唐鱼 (*Tanichthys albonubes*) 的鱼体形态进行研究, 结果显示其群体形态差异主要在眼径大小和头部形态上, 且群体鉴别的综合正确率达 94.8%, 能有效识别唐鱼群体。韩需武等^[40]采用地标点法对 2 个群体柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 的胴体进行形态学分析, 结果显示 2 个群体在不同的胴长组间有不同的生长模式, 且不同群体的个体形态发育在不同生长阶段变化规律不一

致。侯刚等^[41-42]运用地标点法分别对4种金线鱼属(*Nemipterus*)和4种白姑鱼属(*Pennahia*)进行耳石识别研究,结果显示分类鉴定的综合正确率分别达0.55%和86.7%。本研究利用地标点法对秋刀鱼的鱼体进行形态学分析,结果显示秋刀鱼雌、雄个体的主要形态差异位于眼部、躯干前部和尾部,并已经可以有效地进行性别鉴定,对于第1批和第2批样本的综合判别正确率达91.6%和88.45%,准确率较高。同时交叉验证也显示模型稳定性较高,在秋刀鱼雌、雄个体的形态差异分析与鉴定中表现出较好的效果,表明该方法可以作为秋刀鱼形态学分析的有效手段,在秋刀鱼的个体形态发育和群体识别等方面同样有着较好的应用前景。

3.3 判别模型的适用性

判别分析是利用样本的已知分类信息来构建判别函数,通过样本回判和交叉验证评估模型准确性与稳定性,面对新的样本只需将其特征值带入判别函数即可判别其归属。本研究在性别鉴定中,尽管模型正确率高,但仍存在错判现象,可能原因包括地标点人为选取产生的主观误差、秋刀鱼样本未完全解冻导致其形态非自然伸展以及拍摄误差等。

在判别函数的使用上,传统形态测量学模型参数(如体长、全长等)可在测量后直接带入判别模型以确定新样本的归属。相比之下,几何形态测量学模型参数为相对扭曲得分,需通过新、旧样本共同进行相对扭曲主成分分析获得。然而,这会引发2个问题:首先,经新旧样本共同分析后,原先用于构建模型的旧样本相对扭曲得分会随之发生改变,此时继续沿用原始模型对新样本进行性别鉴定是否合理;其次,是否应该从经共同分析而改变后的相对扭曲得分中,选择已知性别的旧样本重新构建判别模型,再用于新样本的鉴别。哪种方法更为可靠,尚未见相关研究。

本研究以第1批的107尾样本构建判别模型并进行性别回判,对于第2批43尾新样本,选择直接应用第1批样本构建的原始模型进行性别鉴定,且取得了较高的鉴定正确率。本研究认为,对于第1种方法,尽管旧样本相对扭曲得分因共同分析而有所变化,但如果原始模型构建时采用的统计方法具备稳健性,且新样本的地标点数据处理遵循与旧样本相同的标准化流程,理论上该模型仍应保持一定的泛化能力,适用于新样本的性别鉴定。此方

法的优势在于操作简便,避免了模型的重新训练,节约了时间和计算成本。对于第2种方法,选择重新构建判别模型,再用于对新样本的鉴定,可以捕捉到可能因数据重分析带来的模式变化,以提高模型对新样本的适应性和预测精度。2种方法都有一定的适用条件,第1种适用于原始模型性能稳定、新样本处理与旧样本一致、重新分析旧样本得分变化不大或对模型影响较小的情况;第2种适用于新样本数量充足且具有代表性或希望捕捉可能的模式变化以提升预测精度的情况。在实际应用中,可以结合实际情况、数据特性以及对模型性能的要求,权衡选择适合的方法。此外,可以进行交叉验证或独立测试集验证,以比较2种方法下模型对新样本的预测性能,从而做出最优决策。

4 结论

本研究主要采用几何形态测量学的地标点法,进行了秋刀鱼雌、雄个体的形态差异分析和鉴定。结果表明,秋刀鱼雌、雄个体的主要形态差异位于眼部、躯干前部和尾部,同时利用第1批的107尾秋刀鱼构建了判别模型,该模型在用于性别回判和第2批的43尾秋刀鱼性别鉴定时表现出了较高的正确率。可见,将几何形态测量学的地标点法用于秋刀鱼形态分析和性别鉴定是可行的。本研究的形态分析和判别结果虽较好,但仍存在一定不足,主要体现在2点:1)未系统评估地标点选取方案及样本量对形态分析的具体影响;2)采样范围较广,区域间形态差异对分析结果的潜在作用仍是一个未经充分探讨的问题。因此,后续应侧重于以下2个方面:1)通过对比分析不同地标点方案与样本量下模型的表现,找出最佳的分析配置;2)纳入区域因素,通过细化样本区域的划分与比较分析,揭示并校正区域特异性形态特征对总体判别效能的可能影响,完善秋刀鱼的形态学理论基础,进而为秋刀鱼的形态学分析提供更加准确、有效的研究方法。

参考文献:

- [1] 赵峰,章龙珍,庄平,等. 鲟科鱼类性别鉴别技术的研究进展及其应用[J]. 海洋渔业, 2009, 31(2): 215-220.
- [2] 陈宇舒. 尖头塘鳢(*Eleotris oxycephala*)雌雄个体形态差异分析[J]. 渔业研究, 2023, 45(4): 346-355.
- [3] 韩伟国,刘新富,孟振,等. 醋酸洋红染色技术在大菱鲆幼鱼生理性别鉴定中的应用[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(6): 37-42.

- [4] BLYTHE B, HELFRICH L A, BEAL W E, et al. Determination of sex and maturational status of striped bass (*Morone saxatilis*) using ultrasonic imaging[J]. *Aquaculture*, 1994, 125(1/2): 175-184.
- [5] FERGUSON A, TAGGART B J, PRODOHL A P, et al. The application of molecular markers to the study and conservation of fish populations, with special reference to *Salmo*[J]. *J Fish Biol*, 2006, 47(1): 103-126.
- [6] 仇登高, 徐世宏, 刘鹰, 等. 超声成像技术在大西洋鲑早期性别及发育期鉴别的应用研究[J]. *海洋科学*, 2016, 40(6): 23-29.
- [7] 毕宜慧, 张鑫宇, 李杰, 等. 暗纹东方鲀雌雄个体形态差异及其判别分析[J]. *海洋渔业*, 2021, 43(5): 563-572.
- [8] 邵锋, 陈新军, 李纲, 等. 东黄海鲈鱼形态差异分析[J]. *上海水产大学学报*, 2008, 17(2): 204-209.
- [9] 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.
- [10] 韩需武, 陈新军, 方舟, 等. 基于鱼体和耳石形态的东海两种鲈属鱼类判别分析[J]. *海洋渔业*, 2020, 42(2): 161-169.
- [11] SLICE D E. Modern morphometrics in physical anthropology [M]. New York: Springer US, 2005: 325-330.
- [12] BRENO M, LEIRS H, VAN DONGEN S. Traditional and geometric morphometrics for studying skull morphology during growth in *Mastomys natalensis* (Rodentia: Muridae)[J]. *J Mammal*, 2011, 92(6): 1395-1406.
- [13] FRED L, BOOKSETINFL. Size and shape spaces for landmark data in two dimensions[J]. *Stat Sci*, 1986, 1(2): 175-184.
- [14] BOOKSTEINFL. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 18, 435.
- [15] ROHLF F J, SLICE D E. Extensions of the procrustes method for the optimal superimposition of landmarks[J]. *Syst Zool*, 1990, 39(1): 40-59.
- [16] 朱清澄, 花传祥. 西北太平洋秋刀鱼渔业[M]. 北京: 海洋出版社, 2017: 1-2.
- [17] NAKAYA M, MORIOKA T, FUKUNAGA K, et al. Growth and maturation of Pacific saury *Cololabis saira* under laboratory conditions[J]. *Fish Sci*, 2010, 76(1): 45-53.
- [18] 张孝民, 石永闯, 李凡, 等. 基于 MAXENT 模型预测西北太平洋秋刀鱼潜在渔场[J]. *上海海洋大学学报*, 2020, 29(2): 280-286.
- [19] KIMURA N, OKADA Y, MAHAPATRA K. Relationship between saury fishing ground and sea surface oceanographic features determined from satellite data along the northeastern coast of Japan[J]. *J Mar Sci Technol*, 2004, 2(2): 1-12.
- [20] 朱文涛, 陈新军, 汪金涛, 等. 基于灰色系统的西北太平洋秋刀鱼资源丰度预测[J]. *广东海洋大学学报*, 2018, 38(6): 13-17.
- [21] 石永闯, 朱清澄, 张衍栋, 等. 基于模型试验的秋刀鱼鳃提网网索张力性能研究[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(3): 704-712.
- [22] 花传祥, 高玉珍, 朱清澄, 等. 基于耳石微结构的西北太平洋秋刀鱼 (*Cololabis saira*) 年龄与生长研究[J]. *海洋学报*, 2017, 39(10): 46-53.
- [23] 杨明树. 西北太平洋公海秋刀鱼繁殖生物学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 5-6.
- [24] 李非, 朱清澄, 花传祥, 等. 西北太平洋秋刀鱼主要体征及繁殖特性研究[J]. *水产科学*, 2019, 38(2): 173-181.
- [25] 朱国平, 刘芳沁. 几何形态测量学及其在鱼类生态学研究中的应用进展[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(5): 1180-1189.
- [26] ICHII T, NISHIKAWA H, MAHAPATRA K, et al. Oceanographic factors affecting interannual recruitment variability of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the central and western North Pacific[J]. *Fish Oceanogr*, 2018, 27(5): 445-457.
- [27] ROHLF F J, BOOKSTEIN F L. Proceedings of the Michigan morphometrics workshop[M]. New York: University of Michigan Museum of Zoology, 1990: 1-380.
- [28] 张锋, 李萍. 几何形态测量学在古生物学研究中的应用概况[J]. *古生物学报*, 2016, 55(4): 518-531.
- [29] VISCOSI V, CARDINI A. Leaf morphology, taxonomy and geometric morphometrics: a simplified protocol for beginners[J]. *PLoS One*, 2018, 6(10): e25630.
- [30] 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.
- [31] SAUER F G, PFITZNER W P, JÖST H, et al. Using geometric wing morphometrics to distinguish *Aedes japonicus japonicus* and *Aedes koreicus*[J]. *Parasit Vectors*, 2023, 16(1): 417-418.
- [32] KEMP F. Modern applied statistics with S[J]. *J R Stat Soc Ser D Statist*, 2003, 52(4): 704-705.
- [33] AKINOBU W. How many landmarks are enough to characterize shape and size variation?[J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0198341.
- [34] CARDINI A, SEETAH K, BARKER G. How many specimens do I need? Sampling error in geometric morphometrics: testing the sensitivity of means and variances in simple randomized selection experiments[J]. *Zoomorphology*, 2015, 134(2): 149-163.
- [35] 郁岳峰, 张勋, 黄洪亮, 等. 秋刀鱼鳃提网集鱼方法的研究[J]. *浙江海洋学院学报 (自然科学版)*, 2006(2): 154-156.
- [36] CRESPI-ABRIL A C, JOSEBARO P, MORSAN E M, et al. Analysis of the ontogenetic variation in body and beak shape of the *Illex argentinus* inner shelf spawning groups by geometric morphometrics[J]. *J Mar Biol Assoc UK*, 2010, 90(3): 547-553.
- [37] ZISCHKE T M, GRIFFITHS P S, TIBBETTS R I, et al. Stock identification of wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Pacific and Indian Oceans using morphometrics and parasites[J]. *ICES J Mar Sci*, 2013, 70(1): 164-172.
- [38] 陈楠桦, 梁仁杰, 白义, 等. 基于几何形态测量学的四种滨螺形态差异与系统发生关系研究[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(6): 1365-1374.
- [39] 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.
- [40] 韩需武, 王超, 方舟, 等. 基于几何形态测量的不同群体柔鱼个体形态生长变化[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(3): 483-493.
- [41] 侯刚, 王学锋, 朱立新, 等. 基于几何形态测量学的4种金线鱼矢耳石识别研究[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(3): 496-503.
- [42] 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.