

文章编号: 1674-5566(2025)01-0164-12

DOI: 10.12024/jsou.20240404508

西北太平洋重要鱼种的形态参数识别与物种分类应用

王超¹, 俞骏¹, 刘必林^{1,2,3,4,5}, 方舟^{1,2,3,4,5}

(1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业可持续利用重点实验室, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 为了解西北太平洋重要鱼种形态结构多样性, 有效提升该海域鱼类物种识别效率, 利用地标点数据和几何形态测量学方法分析了西北太平洋8目14科24属26种鱼类($n=485$ 尾)的形态差异, 评估不同鱼体部位形态参数对物种识别的分类效果。结果显示, 不同目和物种的鱼体形态存在显著差异, 多元回归分析检测到部分物种存在异速生长现象。分类方面, 鱼体和躯干部形状可以较好地地区分不同物种。研究表明, 西北太平洋海域鱼类物种具有多样的体型结构, 不同物种生活史的异质性及遗传因素可能是导致体型多样性的原因。本研究可以提升西北太平洋海域的鱼类分类效果, 为西北太平洋鱼类物种的可持续开发和有效资源管理提供科学依据。未来研究可以增加更多的物种和数量以便探究更加普适性的形态差异和分类效果。

关键词: 鱼类; 体型; 物种分类; 几何形态测量学; 地标点法; 西北太平洋

中图分类号: S 931.4 **文献标志码:** A

西北太平洋位于世界联合国粮食和农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)61渔区, 海域辽阔^[1-2]。该海域处于太平洋副热带环流区和副极地环流区的黑潮-亲潮(Kuroshio current-Oyashio current)交汇区, 具有复杂的洋流体系^[3-4]。凭借复杂的海洋环境, 西北太平洋部分海域营养物质聚集, 是海洋生物栖息的良好场所^[5]。适宜的水温、盐度等海洋环境为渔业资源以及渔场形成创造了极好的条件, 远东拟沙丁鱼(*Sardinops sagax*)、日本鲭(*Scomber japonicus*)和日本鳀(*Engraulis japonicus*)等重要渔业经济物种均聚集于此^[2]。因此, 西北太平洋海域鱼类多样性十分丰富。作为世界海洋渔业产量最高的海域之一, 近20年来西北太平洋年产量基本稳定在2 000万t左右, 约占全球海洋捕捞总产量的四分之一, 在世界海洋渔业中占据着极为重要的地位^[2, 6]。因此, 为确保西北太平洋渔区中的渔业资源(尤其是鱼类资源)合理地开发与利用, 需要对渔区内的渔业资源进行有效地监督与管理。

自18世纪以来, 鱼类形态的研究通常采用传统的线性测量方法, 这种方法具有测量快速、分析直观的优点^[7], 但这种方法缺乏表征生物体形态的能力。20世纪80年代, BOOKSTEIN^[8]和ROHLF等^[9]在形态结构数值化和数据分析上取得重要突破, 逐渐发展为“几何形态测量学”(Geometric morphometrics, GM)。GM方法在生物形态学领域有着较为广泛地应用, 其中鱼类研究中应用最广泛的为种类和种群鉴定^[10]。种类鉴定和种群划分在渔业资源管理及确定种类来源方面有着重要的作用。大量的研究发现, 鱼体、耳石和鳞片等形态具有丰富的生活史信息^[11-13], 因此成为鱼类分类的良好材料。SANTOS等^[11]利用地标点法量化了牙鲆属(*Paralichthys*)4个种类的身体部位差异, 并将结果用于渔业统计中的物种识别。此外, 大量分类群中已经记录了鱼体形状与系统发育方面之间的关联, 鱼体形态学是揭示不同物种间的系统发育关系的重要数据^[10]。CHOI等^[14]的研究揭示

收稿日期: 2024-04-19 修回日期: 2024-05-31

基金项目: 农业农村部全球渔业资源调查监测评估(公海渔业资源综合科学调查)专项(D-8025-23-1002)

作者简介: 王超(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为渔业生物形态学。E-mail: shouwachao@163.com

通信作者: 方舟, E-mail: zfang@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

http://www.shhydx.com

了狗母鱼科(Synodontidae)鱼体形态的特征差异,从形态学角度提供了物种鉴别证据。此外,鱼体可以明确划分为头、躯干和尾3个部分^[10],最近,CHOLLET-VILLALPANDO等^[15]使用几何形态测量学方法探究了17种银鲈科(Gerreidae)物种的3个身体区域的形态差异,同样证实了GM方法在银鲈科物种及其姊妹类群的系统分类研究中的有效性。因此,GM方法是揭示鱼体表型多样性和物种识别的有力工具,并能有效提升物种识别效率。

西北太平洋鱼类种类繁多,在系统发育分类背景下对该海域鱼类进行广泛的生物多样性研究是目前鱼类形态学研究中面临的挑战之一,目前利用鱼体几何形态方法对鱼类物种识别的研究较为缺乏,且未有研究不同鱼体部位形态差异的分类效果。为此,本研究使用几何形态测量学地标点法表征了西北太平洋8目14科24属26种共485尾鱼体形态,探究不同目间鱼体形态的差异。基于地标点坐标数据将鱼体形态划分为头、躯干和尾共3个部位,评估不同鱼体部位形状对目和物种分类的效果,旨在提升西北太平洋海域的鱼类分类效果,为西北太平洋鱼类物种的可持续开发和有效资源管理提供科学依据,同时也为相关研究提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 样本来源

样本依托上海海洋大学远洋渔业资源调查船“淞航”号开展的远洋渔业资源综合科学调查,

调查采用4片式单囊中层拖网,主尺度为434 m×97.1 m(44.98 m)。采集海域为西北太平洋(35°N~45°N、148°E~164°E)公海海域(图1),采集时间为2021—2023年6—8月。样本采集后运回“淞航”号实验室,依据《Fishes of the world》^[16]确定捕获的鱼类样本属和种级类别,依据Fishbase网站(www.fishbase.org)确定本研究鱼类的分类系统,样本基本信息见表1。然后使用皮尺进行基础形态学测定,包括体长、叉长,测量结果精确至1 mm。

1.2 图像获取

为了防止冷冻和保存试剂对鱼类形态的影响^[17-18],所有图像拍摄的样本均为新鲜样本。首先将鱼体和鳍横向伸展,然后使用NiKonD750(105 mm F/2.8)相机对鱼类样本进行拍摄。每张图像都标注了相应的数据,包括种类缩写、编号。此外,为了标准化鱼类样本大小^[19],所有拍摄的样本都添加了比例尺(1 cm)。样本拍摄完成后按照站点、种类和编号装袋并放入-20 °C冻库保存,拍摄图像用于后续鱼体几何形态测量数据标定。

1.3 生物学测定

所有样本采集、实验流程、研究方法均严格按照《上海海洋大学实验室动物伦理规范》和上海海洋大学伦理委员会制定的规章制度执行。样本经科考船调查结束后运回学校基础生物实验室进行其余生物学测定,包括性别、性腺成熟度和体质量等,依据《渔业资源生物学》^[20]的鱼类性别和性腺划分标准划分鱼类性别和性腺成熟度。

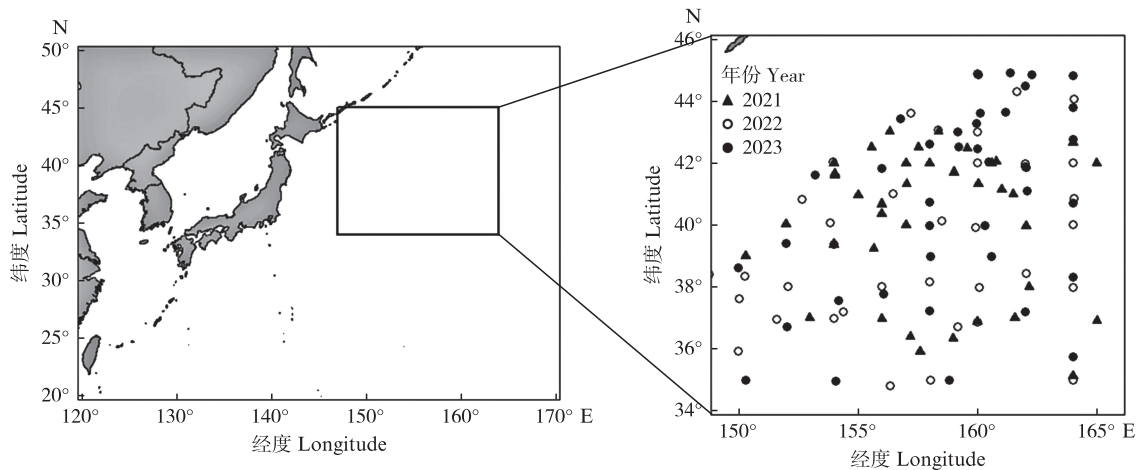


图1 西北太平洋渔业资源调查采样站点

Fig. 1 Sampling station of fishery resources survey in the Northwest Pacific

表 1 西北太平洋重要经济鱼类的样本信息
 Tab. 1 Sample information of economically important fish samples in Northwest Pacific Ocean

目 Order/科 Family/属 Genus	种 Species	样本数量 Samples/尾
仙女鱼目 Aulopiformes		
大鳞蜥鱼科 Notosudidae		
弱蜥鱼属 <i>Scopelosaurus</i>	霍氏弱蜥鱼 <i>Scopelosaurus hoedti</i>	23
魬蜥鱼科 Paralepididae		
北极魬蜥属 <i>Arctozenus</i>	北极魬蜥 <i>Arctozenus risso</i>	1
大梭蜥鱼属 <i>Magnisudis</i>	大西洋梭蜥鱼 <i>Magnisudis atlantica</i>	10
纤柱鱼属 <i>Stemonosudis</i>	纤柱鱼 <i>Stemonosudis</i> sp.	1
颌针鱼目 Beloniformes		
竹刀鱼科 Scomberesocidae		
秋刀鱼属 <i>Cololabis</i>	秋刀鱼 <i>Cololabis saira</i>	29
鲱形目 Clupeiformes		
鲱科 Alosidae		
拟沙丁鱼属 <i>Sardinops</i>	远东拟沙丁鱼 <i>Sardinops sagax</i>	62
鳀科 Engraulidae		
鳀属 <i>Engraulis</i>	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	68
月鱼目 Lampriformes		
粗鳍鱼科 Trachipteridae		
粗鳍鱼属 <i>Trachipterus</i>	石川粗鳍鱼 <i>Trachipterus ishikawae</i>	3
灯笼鱼目 Myctophiformes		
灯笼鱼科 Myctophidae		
眶灯鱼属 <i>Diaphus</i>	眶灯鱼 <i>Diaphus</i> sp.	21
灯笼鱼属 <i>Myctophum</i>	粗鳞灯笼鱼 <i>Myctophum asperum</i>	35
背灯鱼属 <i>Notoscopelus</i>	闪光背灯鱼 <i>Notoscopelus resplendens</i>	18
标灯鱼属 <i>Symbolophorus</i>	加利福尼亚标灯鱼 <i>Symbolophorus californiensis</i>	38
泰勒灯鱼属 <i>Tarletonbeania</i>	泰勒灯鱼 <i>Tarletonbeania taylori</i>	4
鲭形目 Scombriformes		
乌鲂科 Bramidae		
乌鲂属 <i>Brama</i>	日本乌鲂 <i>Brama japonica</i>	2
乌鲂属 <i>Brama</i>	梅氏乌鲂 <i>Brama myersi</i>	10
梭鲂属 <i>Taractes</i>	红梭鲂 <i>Taractes rubescens</i>	10
蛇鲭科 Gemphilidae		
若蛇鲭属 <i>Nealotus</i>	三棘若蛇鲭 <i>Nealotus tripes</i>	27
鲭科 Scombridae		
羽鳃鲈属 <i>Rastrelliger</i>	福氏羽鳃鲈 <i>Rastrelliger faughni</i>	29
鲭属 <i>Scomber</i>	澳洲鲭 <i>Scomber australasicus</i>	6
鲭属 <i>Scomber</i>	日本鲭 <i>Scomber japonicus</i>	70
带鱼科 Trichiuridae		
剃刀带鱼属 <i>Assurger</i>	长剃刀带鱼 <i>Assurger anzac</i>	2
深海带鱼属 <i>Benthodesmus</i>	叉尾深海带鱼 <i>Benthodesmus tenuis</i>	2
巨口鱼目 Stomiiformes		
巨口光灯鱼科 Phosichthyidae		
颌光鱼属 <i>Ichthyococcus</i>	颌光鱼 <i>Ichthyococcus</i> sp.	1
褶胸鱼科 Sternoptychidae		
银斧鱼属 <i>Argyropelecus</i>	棘银斧鱼 <i>Argyropelecus aculeatus</i>	3
烛光鱼属 <i>Polyipnus</i>	松原烛光鱼 <i>Polyipnus matsubarai</i>	4
海鲂目 Zeiformes		
海鲂科 Zeidae		
亚海鲂属 <i>Zenopsis</i>	雨印亚海鲂 <i>Zenopsis nebulosa</i>	6

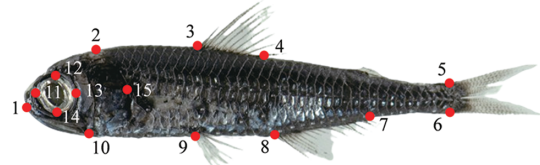
1.4 地标点的建立与提取

依据前人研究^[11,21],使用15个地标点坐标来记录鱼体形态数据,其中包括9个I型地标点和6个III型地标点(图2,表2),使用tps系列软件提取地标点坐标数据^[22]。首先使用tpsUtil建立保存图像坐标数据的TPS格式文件,然后使用tpsDig建立地标点。为了减小数字化过程产生的误差,图像重复数字化2次^[23]。统计结果显示两次数字化结果之间的差异小于5%^[24]。因此,选择平均后的形态坐标数据用于下一阶段的分析。

1.5 数据分析

所有的鱼体几何形态测量学分析均在R4.0.5“geomorph”包中进行^[25]。为了分析鱼体不同部位的形态对分类效果的影响,将鱼体形态的坐标数据划分为4组,包括身体(Body:地标点1~15)、头部(Head:地标点1~2、10~15)、躯干部(Torso:地标点2~4、7~10、15)和尾部(Tail:地标点5~7)。首先,使用“gpagen”函数进行广义普鲁克提斯分析(General procrustes analysis, GPA)对鱼体形态坐标数据进行归一化处理并获得普氏叠印图(Procrustes superimposition, PS),以消除由方位、大小等非形状变化因素产生的影响^[19,26]。GPA分析获取标准化的普氏坐标(Procrustes coordinates)和质心大小(Centroid size)用于后续多元统计分析。质心大小即计算所有地标点到物体中心距离的平方和后开方的数值^[27],该值可

以用来表示生物体结构的大小。其次,分别使用“procD”和“gm.prcomp”函数对普氏坐标进行普氏方差分析(Procrustes analysis of variance, PANOVA)和主成分分析(Principal component analysis, PCA),以降低普氏坐标的维度,量化不同目和物种的鱼体形态差异^[19,26]。同时,由于样本存在不同的个体大小,因此基于多元回归分析(Multiple regression analysis, MRA)检测鱼体形状的变化是否存在异速生长现象^[15,19]。然后使用“plotRef ToTarget”函数生成线框图(Wireframe graphic)以可视化不同目间鱼体形态差异^[18,25]。使用R4.0.5“ggplot”包绘制体长和质心大小箱型图,以可视化鱼体的大小差异。最后,为了探究不同鱼体部位对目和物种的分类效果,使用SPSS软件进行逐步判别分析(Stepwise discriminant analysis, SDA)^[28],其中目和种类作为分组变量,主成分得分(Principal components score, PCs)作为自变量(判别因子)。



数字代表地标点编号。

Numbers represent the landmarks.

图2 鱼体形态和地标点示意图(以粗鳞灯笼鱼为例)

Fig. 2 Fish body morphology and landmarks (*Myctophum asperum* as a case)

表2 鱼体形态的地标点类型和定义

Tab. 2 Type and definition of landmarks for body morphology of fish

地标点 Landmarks	类型 Type	描述 Description
1	III	上颌最前端 Most anterior of upper jaw
2	I	枕骨后末端 Distal tip of occiput
3	I	背鳍起点 Origin of dorsal fin
4	I	背鳍基部末端 Posterior end of dorsal fin base
5	I	尾鳍基部下端 Lower insertion of caudal fin base
6	I	尾鳍基部下端 Lower insertion of caudal fin base
7	I	臀鳍基部末端 Posterior end of anal fin base
8	I	臀鳍起点 Origin of anal fin
9	I	腹鳍起点(带鱼科为泄殖孔处) Origin of pelvic fin (The Trichiuridae is the cloaca)
10	I	前鳃盖骨腹侧起点 Origin of the preopercle on the ventral
11	III	眼前缘 The anterior margin of the eye
12	III	眼上缘 The upper margin of the eye
13	III	眼后缘 The posterior margin of the eye
14	III	眼下缘 The lower margin of the eye
15	III	鳃盖后缘 The posterior margin of the operculum

2 结果

2.1 鱼体大小差异

普氏方差分析结果显示不同目鱼类体长和质心大小存在显著差异 ($P < 0.01$), 月鱼目 (Lampriformes) 鱼体最大, 颌针鱼目

(Beloniformes) 次之, 其余分别为海鲂目 (Zeiformes)、鲭形目 (Scombriformes)、鲱形目 (Clupeiformes)、仙女鱼目 (Aulopiformes)、灯笼鱼目 (Myctophiformes), 巨口鱼目 (Stomiiformes) 鱼体最小, 见图 3 和表 3。

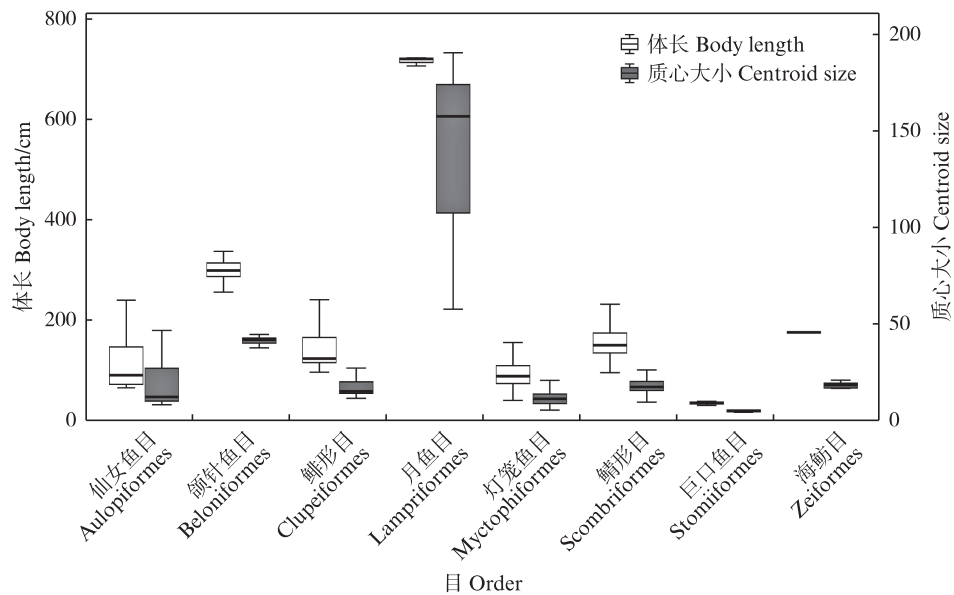


图 3 不同目的鱼类体长和鱼体质心大小差异

Fig. 3 Variation of the body length and centroid size of fishes among different orders

表 3 不同目的鱼类体长和鱼体形态的普氏方差分析

Tab. 3 Procrustes analysis of variance (PANOVA) of body length and morphology among different orders

项目 Item	df	SS	MS	F	P
体长 Body length	7	2 070 082	295 726	159.300	0.001
质心大小 Centroid size	7	62 633	8 947.5	75.538	0.001
鱼体形状 Body shape	7	7.923 4	1.131 91	85.797	0.001

2.2 鱼体形状差异

多元回归分析检测到部分物种 [秋刀鱼 (*C. saira*)、远东拟沙丁鱼 (*S. sagax*)、粗鳞灯笼鱼 (*M. asperum*)、加利福尼亚标灯鱼 (*S. californiensis*)、眶灯鱼 (*Diaphus* sp.)、日本鲭 (*S. japonicus*)、红棱鲂 (*T. rubescens*)] 种内级别的大小和形状之间存在显著性差异 ($P < 0.01$), 即存在异速生长现象。其余物种异速生长现象较弱 ($P > 0.01$)。普氏方差分析显示不同目间鱼体形状存在显著性差异 (表 3), 广义普氏分析的叠印图显示了所有鱼类样本的地标点 and 身体平均形状 (图 4), 所有物种鱼体的头和尾部形状较为统一, 部分物种躯干部位地标点离散程度较高, 形状差异较大。

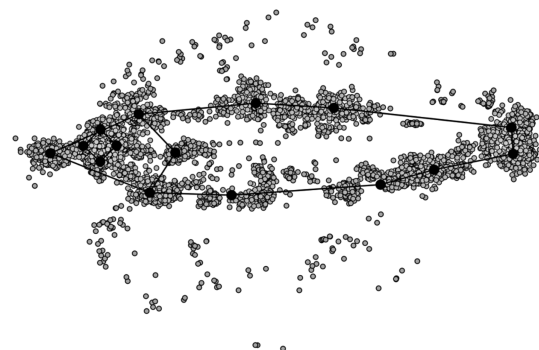


图 4 鱼体普氏叠印的数字化地标 (灰点) 和平均形状 (黑点)

Fig. 4 Digitized landmarks (grey dots) and mean shapes (black dots) of Procrustes superimposition for fish body

前两个主成分(PC1和PC2)分别解释了鱼体形状变化总方差的41.6%和27.8%(图5),主成分形态空间图显示除鲭形目外其余不同目之间存在显著的分隔。其中,鲭形目形态空间占比最大,且与巨口鱼目、月鱼目、灯笼鱼目、鲱形目和仙女鱼目存在一定重叠。海鲂目和颌针鱼目形态空间较小且距离较远,分别位于PC1负轴和正轴。而PC2负轴与正轴显示了鲭形目巨大的形状差异。

线框图可视化了不同目鱼体形状差异,不同

目鱼体头部(地标点1~2、10~15)、躯干部(地标点2~4、7~10、15)和尾部(地标点5~7)均检测到不同程度的形状差异(图6)。相对于平均形状而言,仙女鱼目、鲱形目和月鱼目物种头和眼睛更细小,躯干和尾部更窄而短,巨口鱼目和海鲂目物种有着更大的头部和更宽而大的躯干。此外,颌针鱼目、月鱼目和灯笼鱼目的吻端距离眼前缘较短,仙女鱼目、鲭形目和海鲂目的吻端距离眼前缘较长。

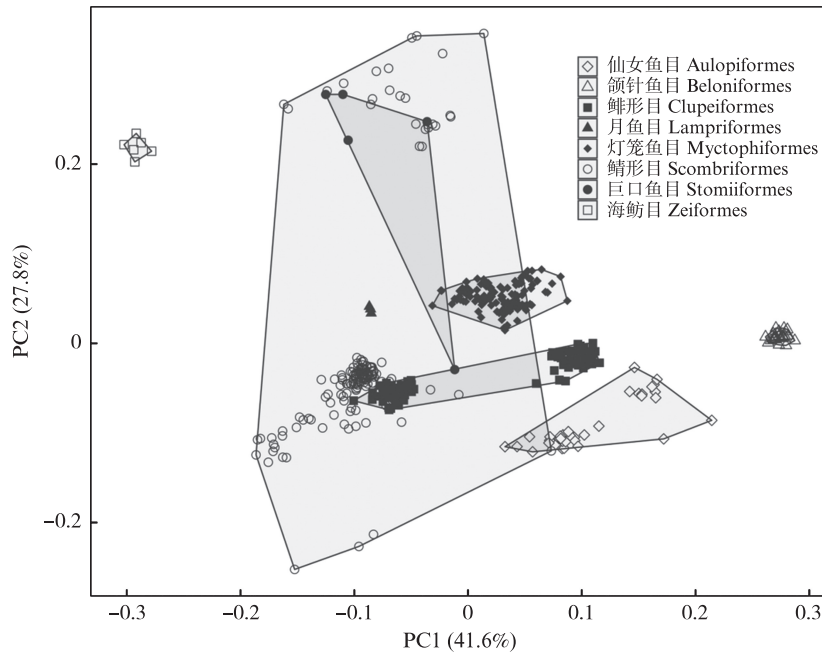
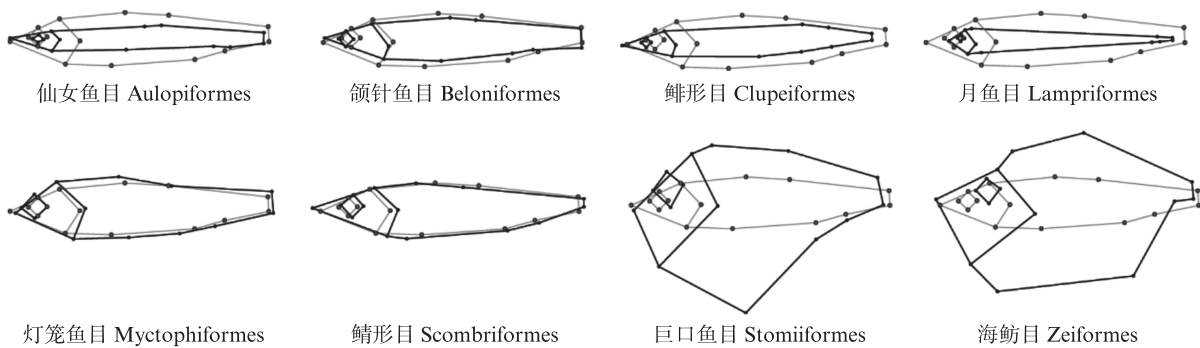


图5 不同目的鱼体形状变量的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis of fish body shape variables of the different orders



黑点和轮廓为不同目的平均形状,灰点和轮廓为所有样本的平均形状。

The black points and outlines are the mean shapes of different orders, the grey points and outlines are the mean shapes of all specimen.

图6 不同目的鱼体形状变异图

Fig. 6 Body shape variation of fishes among different orders

2.3 不同鱼体部位的形状差异及判别分析

普氏方差分析结果(表4)显示不同目和物种的身体、头、躯干和尾均存在显著差异($P < 0.01$)。通过将主成分得分作为逐步判别分析的判别因子,分析不同身体部位目和物种级别的分类效果。逐步判别分析结果显示目级别的原始和交叉验证分类正确率高于物种级别(表5和表6)。对于目级别的判别分类,总体上身体形状的原始和交叉验证分类正确率最高(97.4%, 97.4%),其

次为躯干形状(96.2%, 93.3%)和头形状(87.6%, 87.5%),尾形状的原始和交叉验证分类正确率最低(34.9%, 32.3%)。对于物种级别,总体上身体形状的原始和交叉验证分类正确率同样最高(97.0%, 82.9%),其次为躯干形状(96.2%, 80.2%)和头形状(89.8%, 69.4%),尾形状的原始和交叉验证分类正确率最低(24.7%, 22.6%)。物种级别的原始分类正确率相近,但交叉验证分类正确率低于目级别。

表4 不同目和物种的鱼体不同部位形状的普氏方差分析
Tab. 4 Procrustes analysis of variance (PANOVA) of different body part shapes of fish of different orders and species

分类 Classification	部位 Body parts	df	SS	MS	F	Z	P
目 Order	身体	7	7.887	1.127	84.912	15.453	0.001
	头	7	11.504	1.644	58.105	11.614	0.001
	躯干	7	19.587	2.798	93.863	17.175	0.001
	尾	7	3.512	0.502	36.179	12.804	0.001
物种 Species	身体	25	13.128	0.525	221.470	16.538	0.001
	头	25	21.628	0.865	117.920	13.411	0.001
	躯干	25	31.529	1.261	254.170	21.226	0.001
	尾	25	8.452	0.338	92.637	14.121	0.001

表5 基于普氏形状坐标主成分得分的不同目的逐步判别分析结果
Tab. 5 Stepwise discriminant analysis (SDA) results for different orders based on principal components score (PCs) of Procrustes shape coordinates %

目 Order	身体 Body		头 Head		躯干 Torso		尾 Tail	
	原始 Original	交叉验证 Cross-validation	原始 Original	交叉验证 Cross-validation	原始 Original	交叉验证 Cross-validation	原始 Original	交叉验证 Cross-validation
仙女鱼目 Aulopiformes	100.0	100.0	82.9	82.9	100.0	100.0	0	0
颌针鱼目 Beloniformes	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0	0
鲱形目 Clupeiformes	100.0	100.0	86.9	86.9	100.0	100.0	72.3	71.5
月鱼目 Lampriformes	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0	0
灯笼鱼目 Myctophiformes	100.0	100.0	84.1	83.2	95.6	93.8	33.6	33.6
鲭形目 Scombriformes	99.4	99.4	86.8	86.8	94.3	92.5	86.2	86.2
巨口鱼目 Stomiiformes	80.0	80.0	60.0	60.0	80.0	60.0	20.0	0
海鲂目 Zeiformes	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	66.7	66.7
总体 Total	97.4	97.4	87.6	87.5	96.2	93.3	34.9	32.3

表 6 基于普氏形状坐标主成分得分的不同种类的逐步判别分析结果
 Tab. 6 Stepwise discriminant analysis (SDA) results for different species based on principal components score (PCs) of Procrustes shape coordinates

物种 Species	身体 Body		头 Head		躯干 Torso		尾 Tail	
	原始 Original	交叉验证 Cross-validation	原始 Original	交叉验证 Cross-validation	原始 Original	交叉验证 Cross-validation	原始 Original	交叉验证 Cross-validation
霍氏弱蜥鱼 <i>Scopelosaurus hoedti</i>	100.0	100.0	91.3	82.6	100.0	100.0	21.7	21.7
北极鲟鳕 <i>Arctozenus risso</i>	100.0	0	100.0	0	100.0	0	0	0
大西洋梭蜥鱼 <i>Magnisudis atlantica</i>	100.0	100.0	70.0	70.0	100.0	100.0	10.0	10.0
纤柱鱼属 <i>Stemonosudis</i> sp.	100.0	0	100.0	0	100.0	0	0	0
秋刀鱼 <i>Cololabis saira</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0	0
远东拟沙丁鱼 <i>Sardinops sagax</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	74.2	72.6
日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	86.8	85.3
石川粗鳍鱼 <i>Trachipterus ishikawae</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0	0
眶灯鱼属 <i>Diaphus</i> sp.	100.0	100.0	90.5	85.7	95.2	95.2	0	0
粗鳞灯笼鱼 <i>Myctophum asperum</i>	100.0	100.0	90.6	81.3	93.8	90.6	0	0
闪光背灯鱼 <i>Notoscopelus resplendens</i>	100.0	100.0	94.4	94.4	94.4	94.4	27.8	27.8
加利福尼亚标灯鱼 <i>Symbolophorus californiensis</i>	97.4	97.4	92.1	92.1	94.7	86.8	36.8	34.2
泰勒灯鱼 <i>Tarletonbeania taylori</i>	100.0	100.0	100.0	75.0	100.0	100.0	0	0
日本乌鲂 <i>Brama japonica</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0	0
梅氏乌鲂 <i>Brama myersi</i>	100.0	87.5	100.0	100.0	100.0	100.0	75.0	62.5
红棱鲂 <i>Taractes rubescens</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	70.0	50.0
三棘若蛇鲭 <i>Nealotus tripes</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	96.3	92.6	40.7	40.7
福氏羽鳃鲈 <i>Rastrelliger faughni</i>	75.9	72.4	6.9	0	79.3	75.9	0	0
澳洲鲭 <i>Scomber australasicus</i>	100.0	100.0	0	0	100.0	100.0	0	0
日本鲭 <i>Scomber japonicus</i>	98.6	97.1	100.0	97.1	98.6	98.6	100.0	100.0
长刺刀带鱼 <i>Assurger anzac</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	50.0	0	0
叉尾深海带鱼 <i>Benthodesmus tenuis</i>	50.0	0	100.0	0	50.0	0	0	0
颌光鱼 <i>Ichthyococcus</i> sp.	100.0	0	100.0	0	100.0	0	0	0
棘银斧鱼 <i>Argyropelecus aculeatus</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0	0
松原烛光鱼 <i>Polyipnus matsubarai</i>	100.0	100.0	100.0	25.0	100.0	100.0	0	0
雨印亚海鲂 <i>Zenopsis nebulosa</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3
总体 Total	97.0	82.9	89.8	69.4	96.2	80.2	24.7	22.6

3 讨论

3.1 鱼类图像拍摄与地标点选择标准

鱼体形状在鱼类物种识别的应用仍存在一些挑战。鱼体冷冻和试剂保存会导致鱼类的身体不同部位的拱起 (Arching), 极大地影响了鱼体形态的标准^[17-18, 29]。因此, 鱼体形态研究尽可能并且有必要在鱼类处于新鲜时进行拍摄, 但对于一些稀缺物种已经处于保存状态, 则需要一定方法对保存产生的形变进行修正^[29]。本研究在物种刚捕获时即进行了图像拍摄, 有效地减少了拍摄误差。基于几何形态测量学对西北太平洋海域 26 种鱼类的身体形态进行了比较, 分析发现不

同鱼体形态展现出显著的差异, 因此本研究选取的地标点能有效揭示不同鱼体形态的分化规律。地标点法由 BOOKSTEIN^[8] 和 ROHLF 等^[9] 进行规范, 进而形成了相对成熟的分析体系, 目前存在 3 种类型的地标点: (1) I 型地标点为研究对象不同组织或结构间的交点; (2) II 型地标点为研究对象组织、结构的凹凸点; (3) III 型地标点研究对象组织、结构的极值点^[19]。由于本研究中鱼类物种跨度较大, 因此地标点的选取需要更为标准和稳健, 本研究选取了目前鱼体形态研究中应用较为广泛的 15 个地标点, 包括 9 个 I 型和 6 个 III 型。研究结果发现在目和物种级别上实现了更高的识别率, 表明本研究的地标方案实现了对物

种的有效分类。因此,稳健的地标点可以真实、客观地反映物种形态差异,同时也会提高分类的准确性。

3.2 鱼体大小差异的影响因素

海洋环境的差异,例如气候异质性和资源可利用性等可能与鱼类大小间存在一定的相关性^[30]。环境条件的变化通过影响基因和性状的表达,从而改变表型性状^[31-32],因此鱼类物种之间的大小差异可能与其物种形成过程或生态环境有关。本研究发现月鱼目、颌针鱼目、鲱形目和鲭形目的物种体长和质心大小较大(图3),而灯笼鱼目和巨口鱼目物种的体长和质心大小较小,这种大小差异可能是由于栖息地环境差异所导致的^[30-33]。气候变化对鱼类体型的影响可以分为两方面,一方面主要通过水温的改变、含氧量和其他气候事件等,另一方面通过捕食与被捕食、饵料生物的组成及变化产生影响^[32-33]。相关研究^[30]发现,鱼类的体型随着环境异质性和海洋生产力的增加而增大。EMMRICH等^[31]研究还发现欧洲淡水鱼群体大小结构的变化模式与温度相关,温度均匀地改变了不同生态区内的鱼类群落的体型大小结构。海洋环境温度驱使鱼类的新陈代谢速率产生变化,进而导致生长速率变化^[32]。一般认为,鱼类的体型不遵循伯格曼法则(Bergmann's rule),伯格曼法则不适用于鱼类等细长和狭窄的身体特征的变温动物^[30]。因此产生了体型梯度与温度呈正相关趋势。环境异质性、生产力、地理、洄游能力和物种起源可能对鱼的大小产生正向或负向的影响。

3.3 鱼体形状差异的影响因素

相关研究同样发现鱼类形状具有一定的表型可塑性,受栖息地、摄食、资源可利用性和水流速度等外界环境因素的影响^[10, 34-35]。本研究发现仙女鱼目、鲭形目和鲱形目物种有着更为细长的头和身体形状,这些鱼类物种栖息于大洋的中上层(Pelagic)水域,例如大西洋梭蜥鱼(*Magnisudis atlantica*)和日本鲭(*S. japonicus*),它们具有季节性洄游和垂直移动现象^[36]。西北太平洋海域位于黑潮-亲潮交汇区,中上层具有更为复杂的海流和海水温度^[3-4]。复杂的洋流环境迫使这些中上层鱼类物种产生了适应剧烈环境变化的身体条件,即具有更强的流体动力学(Hydrodynamic)的身体形态(图6),这种身体形状更加灵活并有

着更快的游泳速度,研究结果同样也证实鲭形目鱼类生长速度和游泳速度较快^[37],这可以使得它们可以猎食更高级的猎物并且提升捕获率^[38]。此外,水动力学形状还有利于周围水的流动,这使得鱼类群体可以在攻击前接近潜在的猎物^[39]。这种扁长的头部和细长的身体形状阻力更小,有效提升了鱼类的水动力学条件和游泳能力,从而促使它们可以摄食更加高级的猎物,进而有着更快的生长速度和更高的营养级。而灯笼鱼目、巨口鱼目和海鲂目的头更短、身体更宽,它们大多栖息于大洋深水(Bathypelagic)和底层(Benthopelagic)水域,大洋深水区的水流较弱,因此处于该水层的鱼类物种的身体形状流线型程度较小,对于阻力要求较低。一些研究^[15]发现高度发达的上枕骨(Supraoccipital bone)会影响体型,使头与身体连接部位较高且呈三角形,通常这种形状特征代表了位于沿海和底栖环境的物种。更突出的上枕骨允许更大的外侧肌肉的生长,这潜在影响了头部的侧向运动^[40]。此外,这种躯干形状可能与许多鱼类在常规游泳和长时间冲刺时采用的横向波动游泳有关^[41]。体型的变化与鱼类的运动和摄食等生态学的许多方面都有密切的关系,可以表明鱼类群落的功能多样性^[42]。因此,除遗传因素外不同鱼类间栖息地和摄食习惯的差异可能是体型分化的原因。

3.4 不同鱼体部位的分类效果评价

鱼体形状凭借高度多样化的特征,是物种识别和种群划分的有用材料,因此在分类学研究中具有重要意义^[10, 14]。本研究以完整身体、头、躯干和尾部形状作为鱼类分类的特征数据,结果发现完整身体和躯干形状产生了较好的分类效果,对于物种的判别成功率在80%以上,头形状的交叉验证正确率也能达69.4%,而尾形状则不能区分所有的物种。然而在银鲈科(Gerreidae)物种研究中,躯干和尾部形状并不能很好地区分研究的所有物种^[15],可能是由于银鲈科物种间躯干形状差异较小导致了分类结果不佳。虽然完整身体形状达到最好的物种识别效果,但本研究表明头和躯干对于识别西北太平洋海域26种物种也有较好的应用效果。因此,在未来对该海域的资源评估与管理研究的物种分类阶段,可以将鱼体头部或躯干部位作为物种识别的特征数据集。这极大地减少了数据采集阶段时间,为该海域鱼类

物种识别提供了新的方案。因此,基于几何形态测量方法,本研究证实了头部和躯干部形状是重要的分类特征,为未来对西北太平洋鱼类的快速分类提供思路。

4 结论

本研究基于几何形态测量学方法表征了西北太平洋海域重要经济鱼类的体型多样性,提取并可视化了不同目间鱼体形态差异,构建了不同鱼体形态部位的分类体系。研究发现,不同目间鱼体形态存在显著差异,鲭形目物种占据了主要的形态空间,身体和躯干形状产生了一致且较好的物种分类效果。研究结果表明,西北太平洋海域鱼类物种的体型多样性极高,不同物种的摄食机制、洄游和扩散能力等生活史的异质性以及物种的遗传因素可能是导致体型多样性的原因。未来研究可以增加滑动半地标点提升形状可视化效果,增加更多的物种和数量以便探究更加普适性的形态差异和分类效果。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] HARLAY J, CHOU L, DE BODT C, et al. Biogeochemistry and carbon mass balance of a coccolithophore bloom in the northern Bay of Biscay (June 2006) [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2011, 58(2): 111-127.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fishery and aquaculture statistics [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022.
- [3] TAMAKI K, HONZA E. Global tectonics and formation of marginal basins: role of the western Pacific [J]. *Episodes*, 1991, 14(3): 224-230.
- [4] 唐峰华,岳冬冬,熊敏思,等.《北太平洋公海渔业资源养护和管理公约》解读及中国远洋渔业应对策略[J]. *渔业信息与战略*, 2016, 31(3): 210-217.
TANG F H, YUE D D, XIONG M S, et al. Interpretation of Convention on the Conservation and Management of High Seas Fisheries Resources in the North Pacific Ocean and coping strategies from China oceanic fisheries [J]. *Fishery Information & Strategy*, 2016, 31(3): 210-217.
- [5] 梁绪虹,王丛丛,刘洋,等.基于环境DNA技术的黑潮-亲潮交汇区夏季鱼类物种多样性分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2024, 33(4): 911-926.
LIANG X H, WANG C C, LIU Y, et al. Fish diversity analysis of the Kuroshio-Oyashio confluence region in summer based on environmental DNA technology [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024, 33(4): 911-926.
- [6] 刘思源,张衡,杨超,等.基于最大熵模型的西北太平洋远东拟沙丁鱼和日本鲭栖息地差异[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(4): 806-817.
LIU S Y, ZHANG H, YANG C, et al. Differences in habitat distribution of *Sardinops melanostictus* and *Scomber japonicus* in the northwest Pacific based on a maximum entropy model [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(4): 806-817.
- [7] HUBBS C L, BAILEY R M. A revision of the black basses (*Micropterus* and *Huro*), with descriptions of four new forms [R]. Michigan: University of Michigan, 1940: 1-51.
- [8] BOOKSTEIN F L. Size and shape spaces for landmark data in two dimensions [J]. *Statistical Science*, 1986, 1(2): 181-222.
- [9] ROHLF F J, SLICE D. Extensions of the procrustes method for the optimal superimposition of landmarks [J]. *Systematic Biology*, 1990, 39(1): 40-59.
- [10] 王超,方舟,陈新军.基于文献计量的几何形态测量在渔业中的应用研究进展[J]. *海洋渔业*, 2022, 44(1): 112-128.
WANG C, FANG Z, CHEN X J. Advances in the application of bibliometrics-based geometric morphometrics in fisheries [J]. *Marine Fisheries*, 2022, 44(1): 112-128.
- [11] SANTOS S R, PESSÔA L M, VIANNA M. Geometric morphometrics as a tool to identify species in multispecific flatfish landings in the Tropical Southwestern Atlantic [J]. *Fisheries Research*, 2019, 213: 190-195.
- [12] 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.
HOU G, LIU D D, FENG B, et al. Using landmark-based geometric morphometrics analysis to identify sagittal otolith of four *Pennahia* fish species [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(6): 1293-1302.
- [13] IBÁÑEZ A L, GUERRA E, PACHECO-ALMANZAR E. Fish species identification using the rhombic squamation pattern [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 211.
- [14] CHOI S W, YU H J, KIM J K. Comparative ontogeny and phylogenetic relationships of eight lizardfish species (Synodontidae) from the Northwest Pacific, with a focus on *Trachinocephalus* monophyly [J]. *Journal of Fish Biology*, 2024, 104(1): 284-303.
- [15] CHOLLET-VILLALPANDO J G, GARCÍA-RODRÍGUEZ F J, DE LA CRUZ-AGÜERO J. Character variation in separate body regions of Gerreidae (Osteichthyes: Teleostei) fishes inferred from geometric morphometrics [J]. *Journal of Fish Biology*, 2024, 104(3): 723-736.

- [16] NELSON J S, GRANDE T C, WILSON M V H. Fishes of the world[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- [17] SOTOLA V A, CRAIG C A, PFAFF P J, et al. Effect of preservation on fish morphology over time: implications for morphological studies[J]. PLoS One, 2019, 14(3): e0213915.
- [18] FRUCIANO C, SCHMIDT D, RAMÍREZ SANCHEZ M M, et al. Tissue preservation can affect geometric morphometric analyses: a case study using fish body shape[J]. Zoological Journal of the Linnean Society, 2020, 188(1): 148-162.
- [19] 王超, 方舟, 陈新军. 基于几何形态测量法的剑尖枪乌贼角质颚形态变化研究[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(1): 58-69.
- WANG C, FANG Z, CHEN X J. Beak morphology variation of *Uroteuthis edulis* based on geometric morphometrics[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(1): 58-69.
- [20] 陈新军, 刘必林. 渔业资源生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- CHEN X J, LIU B L. Fishery resource biology[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [21] 杨德道, 俞骏, 王超, 等. 基于几何形态测量的西北太平洋日本鲭的个体生长规律[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(4): 859-867.
- YANG D X, YU J, WANG C, et al. Growth regularity of *Scomber japonicus* based on geometric morphometrics in Northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(4): 859-867.
- [22] ROHLF F J. The tps series of software[J]. Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy, 2015, 26(1): 9-12.
- [23] VISCOSI V, CARDINI A. Leaf morphology, taxonomy and geometric morphometrics: a simplified protocol for beginners[J]. PLoS One, 2011, 6(10): e25630.
- [24] FANG Z, CHEN X J, SU H, et al. Evaluation of stock variation and sexual dimorphism of beak shape of neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, based on geometric morphometrics[J]. Hydrobiologia, 2017, 784(1): 367-380.
- [25] 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.
- [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] 陈新军, 方舟, 陈洋洋, 等. 几何形态测量学在水生生物中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- CHEN X J, FANG Z, CHEN Y Y, et al. Application of geometric morphometry to aquatic organisms[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [28] 刘必林, 顾心雨, 王冰妍, 等. 角质颚色素沉积可视化及其在头足类判别分类中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(4): 785-793.
- LIU B L, GU X Y, WANG B Y, et al. Visualization of cephalopod beak pigmentation and its application to the classification of cephalopods[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(4): 785-793.
- [29] DWIVEDI A K, DE K. Role of morphometrics in fish diversity assessment: status, challenges and future prospects[J]. National Academy Science Letters, 2024, 47(2): 123-126.
- [30] ALÒ D, PIZARRO V, HABIT E. Fish body size influenced by multiple drivers[J]. Ecography, 2024, 2024(1): e06865.
- [31] EMMRICH M, PÉDRON S, BRUCET S, et al. Geographical patterns in the body - size structure of European lake fish assemblages along abiotic and biotic gradients[J]. Journal of Biogeography, 2014, 41(12): 2221-2233.
- [32] AHTI P A, KUPARINEN A, UUSI-HEIKKILÄ S. Size does matter—the eco-evolutionary effects of changing body size in fish[J]. Environmental Reviews, 2020, 28(3): 311-324.
- [33] BEAUGRAND G, BRANDER K M, LINDLEY J A, et al. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea[J]. Nature, 2003, 426(6967): 661-664.
- [34] HETZEL C, FORSYTHE P. Phenotypic plasticity of a generalist fish species resident to lotic environments: insights from the Great Lakes region[J]. Ecology and Evolution, 2023, 13(11): e10715.
- [35] ANAYA-GODÍNEZ E, SILVA - SEGUNDO C A, LANDAETA M F, et al. Influence of oceanographic conditions on the body shape variability of *Scomber japonicus* larvae from the western coast of the Baja California Peninsula[J]. Fisheries Oceanography, 2022, 31(3): 225-237.
- [36] RIEDE K. Global register of migratory species: from global to regional scales: final report of the R&D-Projekt 808 05 081[M]. Bonn: Federal Agency for Nature Conservation, 2004.
- [37] HUNTER J R, KIMBRELL C A. Early life history of Pacific mackerel, *Scomber japonicus* [J]. Fishery Bulletin, 1980, 78(1): 89-101.
- [38] PÖRTNER H O, SCHULTE P M, WOOD C M, et al. Niche dimensions in fishes: an integrative view[J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2010, 83(5): 808-826.
- [39] DE SCHEPPER N, VAN WASSENBERGH S, ADRIAENS D. Morphology of the jaw system in

- trichiurids: trade-offs between mouth closing and biting performance [J]. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 2008, 152(4): 717-736.
- [40] KOBELKOWSKY A. Osteology of the sea mojarra, *Diapterus auratus* Ranzani (Teleostei: Gerreidae) [J]. *Hidrobiológica*, 2004, 14(1): 1-10.
- [41] 曹誉尹. 基于计算机视觉的鱼类冲刺-滑行游泳行为研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- CAO Y Y. Research on fish burst-coast swimming behavior based on computer vision [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [42] INGRAM T. Diversification of body shape in *Sebastes* rockfishes of the north-east Pacific [J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2015, 116(4): 805-818.

Morphological parameter identification and species classification of important fish species in Northwest Pacific Ocean

WANG Chao¹, YU Jun¹, LIU Bilin^{1,2,3,4,5}, FANG Zhou^{1,2,3,4,5}

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Oceanic Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: Fish body morphology contains important ecological information and is a valuable feature for species identification and population classification. There are many kinds of fish in Northwest Pacific Ocean, making the study of fish biodiversity a significant challenge in the study of fish morphology. At present, the study of fish species identification by using fish body geometric morphometrics is relatively lacking, and the classification effect of different fish body parts morphology is necessary to be discussed. In order to understand the morphological structural diversity of important fish species in Northwest Pacific Ocean, and effectively improve the efficiency of fish species identification in this area. In this study, the morphologies variation of 485 tails of 26 species from 24 genera, 14 families and 8 orders in Northwest Pacific Ocean were constructed based on landmarks data and geometric morphometrics, and the taxonomic effects of different body morphological parameters on species recognition were evaluated. The results showed that there were significant differences in fish body morphology among different orders and species. In addition, Multiple regression analysis (MRA) detected allometry in some species. In terms of classification, and the body and torso shape could be better distinguished from different species. Studies have shown that fish species in Northwest Pacific Ocean have a variety of body shape structures, and the heterogeneity of the life history of different species and genetic factors may be the reasons for the body diversity. This study can improve the fish taxonomy in Northwest Pacific Ocean and provide a scientific basis for the sustainable development and effective resource management of fish species in Northwest Pacific Ocean. Future studies can add more species and numbers in order to explore more universal morphological differences and taxonomic effects.

Key words: fish; body shape; species identification; geometric morphometrics; landmarks; Northwest Pacific Ocean