

6 个不同水域刀鲚的形态特征与聚类分析

李 宇^{1,2}, 冯广朋^{1,2}, 张 涛², 庄 平², 宋 超², 王海华³, 张燕萍³, 陈建华¹

(1. 江苏海洋大学海洋科学与水产学院, 江苏省海洋生物技术重点实验室, 江苏 连云港 222005;

2. 水产科学研究院东海水产研究所, 上海长江口渔业资源增殖和生态修复工程技术研究中心, 上海 200090;

3. 江西省水产科学研究所, 农业农村部湖泊渔业资源环境科学观测实验站,
南昌市特种水产繁育与健康养殖重点实验室, 江西 南昌 330039)

摘要:为研究不同水域刀鲚(*Coilia nasus*)的形态特征和分布特点,运用多元统计方法对嵎泗群体(嵎泗海域)、长江流域群体(长江口、长江泰州段、鄱阳湖)和湖泊群体(洪泽湖、巢湖)刀鲚的 24 个形态性状指标进行形态差异性分析。单因素方差分析结果显示,各群体之间除尾柄高外其余指标均存在显著差异($P < 0.05$)。聚类分析表明,长江流域群体与嵎泗群体形态最为接近,可聚为一个类群,洪泽湖群体和巢湖群体分别形成两个类群,差异系数检验显示,这 3 个类群之间形态多样性差异尚未达到亚种水平,仍属于同一种群。主成分分析提取了 6 个特征值大于 1 的形态指标,累积贡献率为 75.78%,各水域刀鲚形态差异表现在头胸部、腹部与尾部性状上。判别分析中,综合判别率为 87.9%。研究结果表明,嵎泗群体和长江流域群体形态最为接近,说明嵎泗群体最有可能洄游进入长江;而湖泊群体与嵎泗群体、长江流域群体形态有显著差异,说明湖泊群体的刀鲚最有可能为淡水定居型长颌鲚。

关键词:刀鲚;形态学;框架结构;多元分析

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)06-0116-08

刀鲚(*Coilia nasus*)隶属于鲱形目(Clupeiformes)、鲱科(Engraulidae)、鲱属(*Coilia*),又名长颌鲚,是一种经济价值极高的洄游性鱼类。历史上我国长江刀鲚的自然资源极其丰富,且渔汛相对稳定,是长江流域重要的捕捞对象(袁传宓,1988)。近年来,由于酷渔滥捕、水域环境污染、水文条件改变、生态环境恶化以及水利工程建设等因素,使得刀鲚自然资源急剧衰减,呈现出渔获量持续走低以及个体小型化的趋势,以至于无法形成优势种群(刘凯等,2012)。因此,正确区分长江刀鲚并探究其分布规律显得尤为重要。

鱼类形态学是一门十分直观的学科,可以简单、快速、有效地反映不同种群之间的差异,并可作为选择种质的重要参考(张堂林等,2008)。形态多样性研究主要采用传统的形态学测量方法对可量化性状和

可计数性状进行比较,该方法主要侧重于种间和种间以上水平的识别,往往难以识别种内的不同群体或品系,而且还存在分类信息丢失的问题(Cadrinc, 2000)。多变量分析方法比传统的形态学测量方法更能有效地区分物种内不同群体或品系的形态差异(明俊超等,2009)。李思发等(1998)运用多变量分析方法比较了尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)5 个品系的形态差异;此外,翘嘴鲌(*Erythroculter ilishaeformis*)、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)的研究结果也证明了多变量分析方法能有效区分不同群体鱼类(王伟等,2007;曾聪等,2012)。国外也有使用多变量分析方法对鱼类种群形态差异的研究报道(Cavalcanti et al, 1999; Ruiz-campos et al, 2003; Blair et al, 2018)。目前,国内虽有学者开展刀鲚群体的形态学研究(程起群和李思发,2004;王冰,2010;王丹婷等,2012;张赛赛等,2020),但鲜见通过形态差异正确区分长江刀鲚及其分布水域的相关研究。

本研究以刀鲚为对象,运用传统形态学与框架形态学相结合的方法,对近海(嵎泗海域)、长江流域(长江口、长江泰州段、鄱阳湖)及湖泊(洪泽湖、巢湖)的刀鲚群体进行形态学分析和多元统计分析,探讨不同水域刀鲚群体之间的形态差异、群体分布规律以及相互之间的关系,进一步为刀鲚资源调查、资源保护与恢复以及人工繁育提供科学依据。

收稿日期:2021-10-20 修回日期:2022-09-08

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2019YFD0901205, 2020YFD0900805);农业农村部农业资源环境情况调查(17210163);江苏省“双创计划”团队项目。

作者简介:李宇,1996年生,男,硕士研究生,研究方向为渔业生态。E-mail:982667561@qq.com

通信作者:陈建华,1978年生,男,副教授,主要从事水产动物繁育及健康养殖教研工作。E-mail:chenjianhuazsu@163.com

冯广朋,1977年生,男,研究员,主要从事渔业生态研究。E-mail:coolwindfgp@163.com

1 材料与方法

1.1 实验材料

本次实验用刀鲚样本来自个6不同水域,其中嵊泗海域(SS)与长江口(CJK)采样时间为2021年4月,洪泽湖(HZH)、巢湖(CH)及长江泰州段

(TZ)为2021年5月,鄱阳湖(PYH)为2021年7月,合计182尾(表1,图1)。所有样本均在天然水域捕捞获得,并在采样时只收集性腺发育为Ⅲ期的样本,从而防止采集的样本属于同一群体,样本收集完毕后保持冷冻状态运送至实验室。所有样本通过比较头长和上颌骨长均鉴定为长颌鲚。

表1 刀鲚各群体样品基本信息
Tab.1 Basic information on *C. nasus* specimens of each population

采样点	地理坐标	采样时间	体长范围/mm	样本数/尾		总数/尾
				♂	♀	
嵊泗海域(SS)	122.09°E 30.81°N	2021-04	246.36~345.64	17	15	32
长江口 (CJK)	121.95°E 31.27°N	2021-04	157.31~355.29	15	14	29
洪泽湖(HZH)	118.72°E 33.36°N	2021-05	133.29~210.26	15	15	30
巢湖(CH)	117.67°E 31.56°N	2021-05	244.30~302.56	8	7	15
长江泰州段(TZ)	119.77°E 32.31°N	2021-05	218.99~356.27	19	17	36
鄱阳湖(PYH)	116.30°E 29.18°N	2021-07	213.94~286.45	21	19	40



图1 刀鲚采样点
Fig.1 Location of *C. nasus* sampling sites

1.2 形态分析

结合传统形态度量学和框架结构度量学方法,并参考相关文献(程起群等,2004;王冰,2010;向文殿,2011),使用电子数显卡尺测量刀鲚样本。测量时把刀鲚样本固定在白色背景板,并以刀鲚左侧为基准,测量精确至0.01 mm。

12个传统形态度量学测量特征包括全长(TL)、体长(SL)、体高(BDe)、头长(HL)、吻长(SLe)、眼径(Edi)、尾柄高(CPd)、背鳍长(DFI)、胸鳍长(PF)、臀鳍长(AF)、上颌骨长(LMa)及眼后头长(AT)。选取吻端(A)、胸鳍起点(B)、头部背侧末端(C)、腹鳍起点(D)、背鳍起点(E)、臀鳍起点(F)、背鳍基末(G)、尾鳍腹侧起点(H)、尾鳍背侧起点(I)共9个解剖学同源坐标点(图2),依据这9个联结点间和相关的连线,构建了刀鲚外部体型的14个框架结构测量性状:吻端至头

部背侧末端间的距离(AC)、吻端至胸鳍起点间的距离(AB)、头部背侧末端至胸鳍起点间的距离(CB)、头部背侧末端至腹鳍起点间的距离(CP)、头部背侧末端至臀鳍起点间的距离(CF)、胸鳍起点至腹鳍起点间的距离(BD)、背鳍起点至胸鳍起点间的距离(EB)、背鳍起点至腹鳍起点间的距离(ED)、背鳍起点至臀鳍起点间的距离(EF)、腹鳍起点至臀鳍起点间的距离(DF)、腹鳍起点至背鳍基末端间的距离(DG)、臀鳍起点至背鳍基末端间的距离(GF)、臀鳍起点至尾鳍背侧起点间的距离(FI)、背鳍基末端至尾鳍腹侧起点间的距离(GH)。

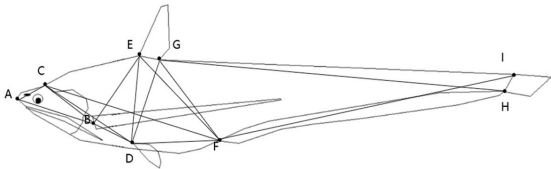


图2 刀鲚的框架特征
Fig.2 Frame features of *C. nasus*

1.3 数据处理

为排除异速生长及体型不一造成的影响,所测得的数据需要分别除以头长(头部特征)或体长(其他特征)进行纠正,整理后得到24个形态学指标,对其进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、差异系数检验(C.D)、主成分分析(principal component analysis, PCA)、判别式分析(linear discrimination analysis, LDA)和聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)。

单因素方差分析在对 24 个形态学指标进行统计分析前,需要检验其正态分布性和方差同质性,然后进行 One-way ANOVA 检验,比较分析其形态学特征是否存在显著性差异。差异系数检验需依据计算得到的群体形态多样性差异系数,判断各群体的刀鲚是否为同一种群,对照划分亚种 75% 的法则等(Mayr et al,1953),若 C.D 值大于 1.28,则两群体为亚种以上水平的多样性差异;反之,则两群体差异未达到亚种水平的种内差异。计算公式如下:

$$C.D=(X_1-X_2)/(Y_1+Y_2) \tag{①}$$

式中:C.D 表示差异系数, X_1 和 X_2 分别代表两群体某个性状指标的平均值; Y_1 和 Y_2 分别代表两群体特征计量的标准差。

通过逐步判别法,计算各群体以及总的判别准

确率(P),计算公式如下:

$$P=O/M \tag{②}$$

式中: O 为刀鲚某群体(或所有群体)判别正确的尾数, M 为该群体(或所有群体)实际尾数。

数据统计分析采用 Microsoft Excel 2020、Origin 2018 和 SPSS 23.0 完成。

2 结果

2.1 单因素方差分析

刀鲚 6 个群体样本 24 个形态学指标的差异比较见表 2。体长为协变量的 ANOVA 检验中,除 CPd 指标不存在显著性差异外($P>0.05$),其余指标均存在极显著差异($P<0.01$)。单因子方差分析表明,除 CPd 不具有统计学意义外($P>0.05$),其余形态指标均有意义($P<0.05$)。

表 2 6 个刀鲚群体的形态学指标特征值
Tab.2 Characteristic values of morphological indices of the six *C. nasus* populations

形态性状	采样点						<i>P</i>
	长江口(CJK)	长江泰州段(TZ)	嵊泗海域(SS)	鄱阳湖(PYH)	洪泽湖(HZH)	巢湖(CH)	
TL	1.092±0.017 ^{bc}	1.082±0.011 ^a	1.085±0.011 ^{ab}	1.080±0.016 ^a	1.107±0.011 ^d	1.098±0.008 ^c	0.000
BDe	0.165±0.010 ^{ab}	0.169±0.010 ^b	0.171±0.012 ^{bc}	0.159±0.011 ^a	0.177±0.017 ^c	0.199±0.008 ^d	0.000
SLe	0.146±0.020 ^{ab}	0.142±0.017 ^a	0.134±0.018 ^a	0.156±0.024 ^b	0.172±0.026 ^c	0.135±0.018 ^a	0.000
EDi	0.137±0.023 ^{ab}	0.138±0.017 ^{ab}	0.131±0.012 ^a	0.138±0.022 ^{ab}	0.176±0.019 ^c	0.150±0.019 ^b	0.000
CPd	0.026±0.004 ^a	0.025±0.003 ^a	0.026±0.003 ^a	0.025±0.003 ^a	0.026±0.003 ^a	0.026±0.002 ^a	0.449
DFI	0.058±0.007 ^a	0.056±0.005 ^a	0.056±0.006 ^a	0.060±0.007 ^{ab}	0.056±0.007 ^a	0.063±0.004 ^b	0.000
PF	0.563±0.015 ^{bc}	0.571±0.010 ^{cd}	0.576±0.014 ^d	0.548±0.017 ^a	0.560±0.011 ^b	0.570±0.015 ^{cd}	0.000
AF	0.387±0.033 ^{cd}	0.373±0.019 ^{bc}	0.367±0.032 ^b	0.404±0.035 ^{dc}	0.294±0.039 ^a	0.410±0.018 ^e	0.000
LMa	1.286±0.096 ^c	1.241±0.059 ^{bc}	1.257±0.079 ^{bc}	1.256±0.072 ^{bc}	1.088±0.102 ^a	1.197±0.115 ^b	0.000
AT	0.721±0.036 ^b	0.719±0.022 ^b	0.721±0.024 ^b	0.708±0.041 ^b	0.667±0.078 ^a	0.721±0.031 ^b	0.000
AC	0.659±0.088 ^a	0.678±0.072 ^a	0.732±0.073 ^b	0.678±0.085 ^a	0.809±0.077 ^d	0.624±0.063 ^a	0.000
AB	0.158±0.011 ^{ab}	0.165±0.010 ^b	0.162±0.013 ^b	0.163±0.013 ^b	0.181±0.011 ^c	0.154±0.009 ^a	0.000
CB	0.107±0.008 ^a	0.117±0.007 ^c	0.119±0.008 ^c	0.103±0.010 ^a	0.128±0.007 ^d	0.111±0.007 ^b	0.000
CD	0.211±0.013 ^b	0.202±0.009 ^{ab}	0.200±0.013 ^a	0.206±0.012 ^{ab}	0.204±0.011 ^{ab}	0.230±0.011 ^c	0.000
CF	0.373±0.019 ^c	0.360±0.013 ^b	0.353±0.017 ^{ab}	0.370±0.015 ^c	0.349±0.012 ^a	0.384±0.009 ^d	0.000
BD	0.108±0.012 ^b	0.091±0.009 ^a	0.091±0.011 ^a	0.105±0.010 ^b	0.093±0.011 ^a	0.127±0.014 ^d	0.000
EB	0.156±0.009 ^b	0.160±0.009 ^b	0.162±0.011 ^b	0.143±0.013 ^a	0.173±0.017 ^c	0.178±0.009 ^c	0.000
ED	0.161±0.012 ^b	0.163±0.010 ^b	0.168±0.011 ^b	0.154±0.012 ^a	0.176±0.016 ^c	0.192±0.008 ^d	0.000
EF	0.233±0.014 ^a	0.230±0.010 ^a	0.232±0.011 ^a	0.230±0.010 ^a	0.234±0.011 ^a	0.245±0.007 ^b	0.001
DF	0.191±0.020 ^a	0.179±0.014 ^a	0.183±0.014 ^a	0.190±0.016 ^a	0.181±0.018 ^a	0.192±0.017 ^b	0.007
DG	0.164±0.013 ^{ab}	0.167±0.012 ^{bc}	0.174±0.012 ^c	0.158±0.011 ^a	0.172±0.019 ^{bc}	0.198±0.009 ^d	0.000
GF	0.189±0.016 ^b	0.188±0.011 ^b	0.191±0.011 ^b	0.180±0.010 ^a	0.187±0.012 ^b	0.200±0.007 ^c	0.000
FI	0.572±0.015 ^b	0.585±0.010 ^c	0.588±0.015 ^c	0.553±0.016 ^a	0.572±0.011 ^b	0.582±0.013 ^c	0.000
GH	0.682±0.013 ^b	0.684±0.009 ^b	0.698±0.015 ^c	0.667±0.017 ^a	0.679±0.008 ^b	0.671±0.011 ^a	0.000

注:同行不同上标字母表示群体间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different superscripts in the same line indicate significant difference among populations ($P<0.05$).

2.2 聚类分析和差异系数检验

将刀鲚6个群体的24个形态学指标均值进行聚类分析,得到其欧式距离(表3)。可以看出,长江口与鄱阳湖刀鲚群体形态较为接近,两者之间的欧式距离最短,仅为0.062;长江口与洪泽湖刀鲚群体形态差异较大,两者之间的欧式距离为0.280。

以系统聚类法中的欧氏最短距离法建立形态聚类分析(图3),发现长江口群体和鄱阳湖群体、长江泰州段群体和嵎泗海域群体分别聚类,之后再共同聚成一个类群;洪泽湖群体和巢湖群体则分别形成两个类群。根据聚类分析所呈现的3个类群,计算两两群体各形态指标的C.D值(Mayr et al,1953),发现3个类群的各项形态指标差异系数均小于1.28。

表3 刀鲚6个群体的欧氏距离

Tab.3 Euclidean distance of six *C. nasus* populations

群体	长江口 (CJK)	长江泰州段 (TZ)	嵎泗海域 (SS)	鄱阳湖 (PYH)	洪泽湖 (HZH)	巢湖 (CH)
CJK	0	0.062	0.094	0.057	0.280	0.123
TZ	0.062	0	0.061	0.068	0.232	0.115
SS	0.094	0.061	0	0.100	0.220	0.156
PYH	0.057	0.068	0.100	0	0.257	0.129
HZH	0.280	0.232	0.220	0.257	0	0.266
CH	0.123	0.115	0.156	0.129	0.266	0

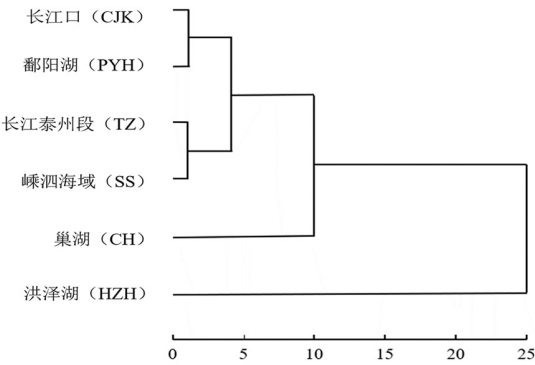


图3 刀鲚6个群体的形态聚类分析

Fig.3 Morphological cluster analysis of the six *C. nasus* populations

2.3 主成分分析

在主成分因子分析前,分别对刀鲚样本的形态指标变量进行KMO和Bartlett球形度检验,KMO值分别为0.647,Bartlett球形度检验中, $P<0.05$,说明每个变量之间存在相关性,适用于主成分因子分析,提取出6个特征值大于1的形态指标。由主成分因子特征值图4可见,从第6个主成分之后,特征值变化

曲线趋于平缓。因此,选择前6个主成分(PC1~PC6)用于分析,结果见表4。

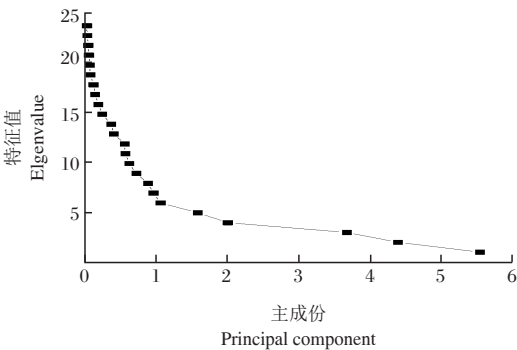


图4 主成分因子特征值

Fig.4 Eigenvalue of the principal component factors

表4 刀鲚形态性状及其主成分的因子负荷与贡献率

Tab.4 Morphological traits and load, contribution rate of principal component factors of *C. nasus*

形态性状	主成分					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
TL	0.165	0.432	0.382	0.338	0.285	-0.039
Bde	0.911 ^a	0.206	0.024	0.137	0.021	0.027
Sle	-0.148	0.361	0.519 ^a	-0.077	0.073	0.189
EDi	0.003	0.564 ^a	0.428	0.026	0.009	0.105
CPd	0.048	0.123	0.202	0.169	0.535 ^a	0.442
DFL	-0.136	-0.252	0.360	0.386	0.230	0.262
PF	0.051	0.291	-0.808 ^a	0.371	-0.071	0.137
AF	-0.047	-0.792 ^a	-0.124	0.169	-0.023	0.218
Lma	-0.093	-0.519 ^a	-0.332	-0.089	-0.112	0.560 ^a
AT	0.156	-0.364	-0.43	0.111	0.198	-0.488
AC	-0.083	0.625 ^a	0.015	-0.274	0.557 ^a	-0.044
AB	-0.277	0.526 ^a	0.558 ^a	0.027	-0.408	0.060
CB	0.243	0.615 ^a	0.133	0.120	-0.578 ^a	0.048
CD	0.451	-0.317	0.366	0.632 ^a	-0.229	-0.056
CF	0.477	-0.693 ^a	0.319	-0.018	-0.287	0.042
BD	0.375	-0.484	0.233	0.469	0.355	-0.157
EB	0.799 ^a	0.411	-0.093	0.034	0.012	-0.065
ED	0.917 ^a	0.283	-0.008	0.119	0.01	-0.001
EF	0.804 ^a	-0.168	0.148	-0.330	0.101	0.139
DF	0.506 ^a	-0.362	0.178	-0.569 ^a	0.036	-0.028
DG	0.903 ^a	0.143	-0.094	0.045	-0.003	0.045
GF	0.823 ^a	-0.041	-0.136	-0.378	-0.030	0.144
FI	0.052	0.368	-0.781 ^a	0.399	-0.055	0.134
GH	0.089	0.300	-0.781 ^a	-0.152	0.042	0.112
特征值	5.535	4.384	3.662	1.990	1.571	1.046
贡献率/%	23.06	18.26	15.26	8.29	6.55	4.36
累计贡献率/%	23.06	41.33	56.59	64.88	71.43	75.78

注:数据上标字母a表示负荷值大于0.500。
Note: Data with superscript letter a mean the load is greater than 0.500.

由表4主成分负荷值的大小可见,主成分1、主成分2、主成分3、主成分4、主成分5、主成分6的贡献率分别为23.06%、18.26%、15.26%、8.29%、6.55%、4.36%,累积贡献率为75.78%。对各主成分影响较大的性状(负载值大于0.5)中,PC1有7个性状,分别为BDe、EB、ED、EF、DF、DG、GF,反映了刀鲚的身体高度、背鳍和胸腹鳍位置等与游泳相关的特征;PC2有7个性状,分别为EDi、AF、Lma、AC、AB、CB、CF,反映了刀鲚的头部特征等与识别食物能力相关的特征;PC3有5个性状,分别为SLe、PF、AB、FI、GH,反映了刀鲚的胸腹部特征和尾部特征等与游泳能力相关的特征;PC4有2个性状,分别为CD、DF,反映了刀

鲚的胸部特征等与游泳能力相关的特征;PC5有3个性状,分别为CPd、AC、CB,反映了刀鲚的头部特征等与识别食物能力相关的特征;PC6只有1个性状,为Lma,反映了刀鲚的头部特征等与识别食物能力相关的特征。由此得知,这6个群体很大程度上的形态差异是因为游泳和头部相关特征的差别所致。

由刀鲚6个群体的前3个主成分散点图5-a可见,第一、二主成分散点图可以将洪泽湖与巢湖群体区分开来;长江口、鄱阳湖、嵊泗海域与长江泰州段重叠区域较大,很难将其截然分开。第一、三主成分散点图中的6个群体重叠区域较大,但都有一定的分散倾向(图5-b)。

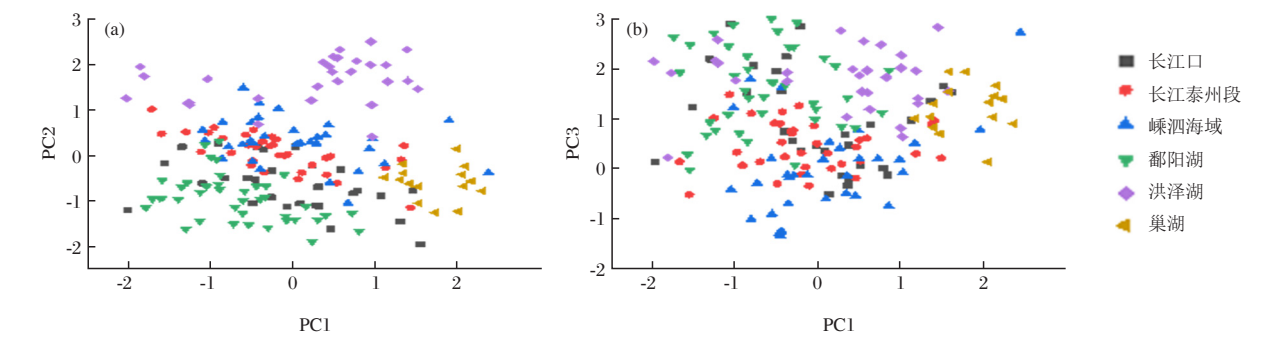


图5 刀鲚群体的主成分分析
Fig.5 Principal component dispersion map of *C. nasus* populations

2.4 判别分析

使用逐步判别法对各刀鲚群体24个形态学指标进行判别分析,挑选出对判别贡献大的14个性状

($X_1, X_2, \dots, X_{14}$), 即 TL、BDe、EDi、AF、Lma、AC、CB、CPd、EB、EDi、DG、GF、FI、GH, 建立6个群体的Fisher 线性判别函数式:

- (1)长江口: $Y_1=7610.841X_1+3624.754X_2+599.228X_3+350.679X_4-6.431X_5+172.704X_6+2817.731X_7+2946.002X_8+1512.411X_9-14307.441X_{10}+7088.404X_{11}+5432.651X_{12}+4898.887X_{13}+2666.46X_{14}-7449.391$
- (2) 长 江 泰 州 段 : $Y_2=7565.436X_1+3846.32X_2+576.648X_3+348.935X_4-19.921X_5+184.412X_6+3210.162X_7+2768.958X_8+1549.226X_9-14425.097X_{10}+6943.201X_{11}+5517.442X_{12}+5046.856X_{13}+2601.186X_{14}-7451.194$
- (3) 嵊 泗 海 域 : $Y_3=7574.962X_1+3696.029X_2+561.036X_3+352.446X_4-19.698X_5+200.573X_6+3323.846X_7+2816.518X_8+1521.411X_9-14466.884X_{10}+7173.709X_{11}+5442.775X_{12}+4984.482X_{13}+2747.809X_{14}-7548.181$
- (4) 鄱 阳 湖 : $Y_4=7473.282X_1+3560.509X_2+601.208X_3+377.064X_4-7.706X_5+176.548X_6+2743.175X_7+2926.218X_8+1371.436X_9-14074.074X_{10}+7104.514X_{11}+5202.294X_{12}+4681.6X_{13}+2724.304X_{14}-7181.931$
- (5) 洪 泽 湖 : $Y_5=7654.579X_1+3572.271X_2+650.965X_3+291.697X_4-34.203X_5+203.009X_6+3501.28X_7+2692.845X_8+1686.99X_9-13934.307X_{10}+6743.952X_{11}+5401.295X_{12}+4957.285X_{13}+2651.723X_{14}-7544.429$
- (6) 巢 湖 : $Y_6=7633.762X_1+3848.361X_2+675.301X_3+398.736X_4-29.94X_5+180.3X_6+2726.453X_7+3123.892X_8+1477.24X_9-14582.151X_{10}+7316.868X_{11}+5609.346X_{12}+5139.698X_{13}+2520.182X_{14}-7611.491$

计算得出各群体的判别准确数量分别为26、31、25、35、29、14尾,总判别准确数量为160尾;长江口、长江泰州段、嵊泗海域、鄱阳湖、洪泽湖、巢湖判别准确

率分别为89.7%、86.1%、78.1%、87.5%、96.7%、93.3%,综合判别率为87.9%。使用判别分析对刀鲚6个群体的形态参数进行分析,并建立典型判别函数得分图。

函数1和函数2的累计贡献率是79.7%,几乎包含了大部分差异特征,函数1主要包含性状BDe、EDi、CB、DG等(贡献率为60.1%),反映的是头胸部与游泳能力;函数2主要包含性状ED、GF、FI、GH等(贡献率为19.5%),反映的是游泳能力(图6)。可见刀鲚6个群体主要分成了3个类群,洪泽湖群体和巢湖群体单独在不同方向上自立一个类群,两群体与其他群体有明显的区分,几乎没有重叠,且组质心也相对离得较远;长江口群体、长江泰州江段群体、鄱阳湖群体和嵊泗群体则存在着较大范围的重叠,组质心也相对离得较近,形成了第3个类群。

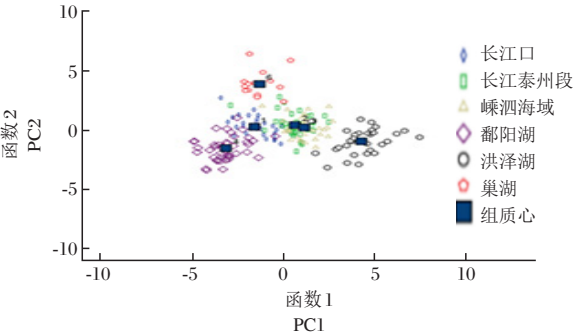


图6 刀鲚各群体形态测量特征的判别分析
Fig.6 Discriminant analysis of morphological characteristics of *C. nasus* populations

3 讨论

3.1 水域阻隔导致刀鲚群体产生形态差异

本研究采用多元分析的方法,从多层面去反映刀鲚在不同自然水域间外部形态的差异。6个不同水域刀鲚的外部形态的聚类分析结果显示,长江流域群体(长江口、长江泰州段和鄱阳湖)与嵊泗群体(嵊泗海域)之间的亲缘关系较近,长江流域群体与湖泊群体(巢湖和洪泽湖)之间的亲缘关系较远,这与其群体分布的水域存在明显的相关性,即长江口、鄱阳湖、长江泰州段、嵊泗海域存在一定程度上的流域重叠,且水系也有交织和联通;而洪泽湖属于淮河流域,无法与长江贯通,巢湖则被巢湖闸截流,也无法与长江贯通,两湖泊相对处于隔离状态,反映出长江流域群体、嵊泗群体与湖泊群体之间,特别是湖泊群体已经产生了一定程度的形态差异。

3.2 刀鲚形态差异可为自然资源提供性状参考

在本研究中,6个不同水域刀鲚前6个主成分累积贡献率为75.78%,包含了绝大部分的变异部位,说明可以用这6个相互独立的因子来概括不同水域刀鲚间的形态多样性差异。主成分分析显示,头胸部、

腹部与尾部是决定不同水域刀鲚形态分类的主要依据,这与采用同样方法对尼罗罗非鱼(李思发等,1998)和翘嘴红鲌(王伟等,2007)的研究结果一致。由于鱼类头部是摄食和感觉中心,腹部和尾部均具有运动功能,并且腹部还是承载着重要生命活动器官的部位,故其在受到生存环境选择所带来的影响也相对较大(梁旭方和何大仁,1998)。刀鲚的形态差异会随着栖息环境的变化而变化,主要发生在头胸部、腹部与尾部,并最终会在群体形态多样性差异的主成分中得到较大体现,同时也可作为长江流域自然资源调查时提供重要性状参考;此外,从主成分散点图可以明显看出,长江口、鄱阳湖、嵊泗海域、长江泰州段的刀鲚在形态参数之间存在着相对较高的重叠率,而与洪泽湖群体和巢湖群体重叠率则相对较低,与聚类分析所得6个不同水域的刀鲚亲缘关系远近结果相同。因此,从不同角度反映了6个水域内刀鲚之间的形态学差异。

3.3 判别分析可多方面区别刀鲚群体的形态差异

判别分析结果显示,刀鲚6个群体的24个形态参数中,有10个参数对形态判别意义不大,从中筛选出了14个特征值,通过F检验,不同刀鲚群体之间多样性差异显著。建立6个群体的判别函数,长江口、长江泰州段、嵊泗海域、鄱阳湖、洪泽湖、巢湖刀鲚群体的判别准确率为89.7%、86.1%、78.1%、87.5%、96.7%、93.3%,综合判别率为87.9%,说明通过刀鲚群体间的形态多样性差异对其进行判别效果显著。根据典型形态特征判别(图6),可见长江流域群体和嵊泗群体重叠范围较大,表明其形态差异较小;洪泽湖群体和巢湖群体单独在不同方向自立一个群体,且与其他群体几乎没有重叠,表明其形态差异与其他群体较大。判别式分析结果与聚类分析以及主成分分析结果相同,从多方面证明了刀鲚6个群体之间存在形态学差异。

3.4 遗传因子和环境因子共同影响刀鲚群体形态

基于多元化分析得到刀鲚6个群体之间形态差异较大,从而进行差异系数检验,发现其各项形态指标差异系数都小于1.28。根据Mayr等(1953)提出判定生物种群分化程度的标准,并结合所得到的C.D值大小来看,虽然长江流域群体、嵊泗群体与湖泊群体在没有交流的情况下,群体间已经产生了一定程度的形态差异,但这种程度的形态差异并未达到亚种水平。形态特征的改变主要受遗传因子和环境因子的共同影响,是遗传和环境、结构基因和调控基因共同作用的结果(Mayr et al,1953)。研究表明,鱼类形

态更易被环境所影响(高峰等,2020)。本次研究表明,长江流域群体和岷江群体的形态特征最为接近,表明岷江海域内的刀鲚最可能属于长江洄游型刀鲚群体。刀鲚在生殖洄游途中会停止摄食,所以形态上的差异也会随着洄游的距离不同而产生一定差异(姜涛等,2018)。因此,长江流域群体与岷江群体之间所存在的形态差异,有可能是溯河洄游过程中由于环境变化和能量消耗所导致的结果,或者是不同的洄游群体所致;这与王丹婷等(2012)研究刀鲚相同水系的不同洄游群体间有着明显的形态差异结果一致。借助耳石微化学分析,尝试将岷江海域、长江口、长江泰州段以及鄱阳湖内刀鲚耳石微化学进行比对,进而判断这些水域内刀鲚是否属于洄游型刀鲚,以及是否属于相同的洄游群体。长江流域群体和湖泊群体的刀鲚均为长颌鲚,但洪泽湖与巢湖都没有与长江互通,且形态差异显著,表明洪泽湖与巢湖刀鲚最有可能是淡水定居型长颌鲚,这与陈婷婷等(2016)发现长颌鲚也存在淡水定居个体的研究结果一致。后续研究可借助耳石微化学对湖泊群体做出进一步判断。

综上所述,通过多元分析方法对 6 个不同水域的刀鲚进行了形态差异分析,得到了岷江群体最有可能属于长江洄游型刀鲚,洪泽湖群体和巢湖群体由于地理原因最有可能属于淡水定居型长颌鲚。形态学测量方法虽然十分直观方便,但也存在一定的局限性。在后续研究中,需要通过更加精确与稳定的基因标记与耳石微化学,进一步探究刀鲚群体之间关系,对于我国刀鲚名优种类保护、资源量恢复、洄游生态学以及人工繁育等具有重要意义。

参考文献

陈婷婷,姜涛,李孟孟,等,2016. 长江南京江段长颌鲚生境履历的反演[J]. 水产学报, 40(6):882-892.

程起群,李思发,2004. 刀鲚和湖鲚种群的形态判别[J]. 海洋科学, 28(11):39-43.

高峰,谭虹雨,张曼,等,2020. 广西西江干流斑点半鲢形态差异分析[J]. 西南农业学报, 33(5):1093-1100.

姜涛,刘洪波,李孟孟,等,2018. 溯河洄游长江刀鲚(*Coilia nasus*)摄食虾类的调查[J]. 湖泊科学, 30(2):458-463.

李思发,李晨虹,李家乐,1998. 尼罗罗非鱼品系间形态差异分析[J]. 动物学报, 44(4):450-457.

刘凯,段金荣,徐东坡,等,2012. 长江口刀鲚渔汛特征及捕捞量现状[J]. 生态学杂志, 31(12):3138-3143.

梁旭方,何大仁,1998. 鱼类摄食行为的感觉基础[J]. 水生生物学报, (3):278-284.

明俊超,董在杰,梁政远,等,2009. 6 个不同鲤群体的形态差异分析[J]. 广东海洋大学学报, 29(6):1-6.

王冰,2010. 刀鲚的形态学和遗传学研究[D]. 合肥:安徽农业大学.

王丹婷,杨健,姜涛,等,2012. 不同水域刀鲚形态的分析比较[J]. 水产学报, 36(1):78-90.

王伟,陈立侨,顾志敏,等,2007. 7 个不同翘嘴红鲌群体的形态差异分析[J]. 淡水渔业, 37(3):40-44.

向文殿,2011. 不同湖泊刀鲚种群形态和遗传变异的研究[D]. 武汉:武汉工业学院.

袁传宓,1988. 长江中下游刀鲚资源和种群组成变动状况及其原因[J]. 动物学杂志, 23(3):12-15.

张赛赛,罗珺,陈博锦,等,2020. 不同群体刀鲚形态差异研究[J]. 淡水渔业, 50(3):26-33.

张堂林,李钟杰,曹文宣,2008. 鱼类生态形态学研究进展[J]. 水产学报, 32(1):152-160.

曾聪,阎里清,高泽霞,等,2012. 梁子湖、鄱阳湖和淤泥湖团头鲂的形态学比较[J]. 华中农业大学学报, 31(1):88-94.

Blair W K, Voort S V D, Edds D R, 2018. Morphological characterization of *Badis* species (Teleostei: Badidae) from Nepal[J]. Zootaxa, 1:97-111.

Cadrinc S X, 2000. Advances in morphometric identification of fishery stocks[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 10(1):91-112.

Cavalcanti M J, Monteiro L R, Lopes P R D, 1999. Landmark-based Morphometric Analysis in Selected Species of Seranid Fishes(Perciformes: Teleostei) [J]. Zoological Studies, 38(3):287-294.

Mayr E, Linsley E G, Usinger R L, 1953. Methods and Principles of Systematic Zoology[J]. Journal of Mammalogy, 34:520-521.

Ruiz-Campos G, Camarena-Rosales F, Varela-Romero A, et al, 2003. Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces: Salmonidae) [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 13(1):91-110.

(责任编辑 万月华)

Morphological Characteristics and Cluster Analysis of *Coilia nasus* Populations from Six Different Waters

LI Yu^{1,2}, FENG Guang-peng^{1,2}, ZHANG Tao², ZHUANG Ping², SONG Chao², WANG Hai-hua³,
ZHANG Yan-ping³, CHEN Jian-hua¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, College of Marine Science and Fisheries,
Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, P.R. China;

2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, P.R. China;
China Sea and Yangtze Estuary, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shanghai Engineering Research Center
of Fisheries Resources Enhancement and Ecological Restoration of the Yangtze Estuary,
Shanghai 200090, P.R. China;

3. Experimental Station of Lake Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
Nanchang Key Laboratory of Special Aquatic and Rural Affairs Breeding and Healthy Aquaculture,
Jiangxi Fisheries Research Institute, Nanchang 330039, P.R. China)

Abstract: *Coilia nasus*, belonging to *Coilia*, Engraulidae, Clupeiformes, is a migratory fish species with high economic value. In this study, *C. nasus* was selected for investigation, and the morphological differences, distribution and the relationships of six *C. nasus* populations from different waters: (1) the Shengsi population in the Shengsi Sea, Yangtze River populations in the (2) Yangtze River Estuary, the (3) Taizhou section of Yangtze River and (4) Poyang Lake, lake populations from (5) Hongze Lake and (6) Chaohu Lake. Traditional morphological analysis and multivariate statistical methods were used to characterize the populations. The aim of the study was to provide scientific evidence for resource assessment and conservation, and to support the artificial breeding of *C. nasus*. A total of 182 *C. nasus* specimens from the 6 water areas were collected in April, May, and July of 2021 and 24 morphological traits of *C. nasus* were selected to analyze morphological differences. One-way analysis of variance shows that all the morphological indices were significantly different among the six populations except the height of caudal stalk ($P < 0.05$). Cluster analysis shows that the morphology of the three Yangtze River populations and the Shengsi population clustered into one group, and the *C. nasus* population in Hongze Lake formed an group and the *C. nasus* population in Chaohu Lake formed another group. The coefficient difference test shows that the differences in morphological diversity among the three groups did not reach a level indicating separate subspecies. Principal component analysis extracted six morphological indicators with eigenvalues over 1, and their cumulative contribution rate was 75.78%. The morphological differences of *C. nasus* from different waters was manifested in the head, chest, abdomen, and tail. Discriminant analysis shows that the comprehensive discriminant rate was 87.9%. To summarize, the Shengsi *C. nasus* group was closest to the Yangtze River basin groups, indicating that the Shengsi population likely migrates into the Yangtze River. The morphology of *C. nasus* lake populations were significantly different from that of Shengsi and Yangtze River populations, indicating that the *C. nasus* lake populations are likely to have settled in freshwater.

Key words: *Coilia nasus*; morphology; frame feature; multivariate analysis