

文章编号: 1004 - 2490(2021)01 - 0022 - 09

基于4种形态学技术的裘氏鳄头冰鱼与 南极小带腭鱼耳石外型比较研究

钱胡蕊¹, 朱国平^{1,2,3,4}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学极地研究中心, 上海 201306;
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室极地海洋生态系统研究室, 上海海洋大学, 上海 201306;
4. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 210306)

摘要: 为研究多种形态学技术对南极冰鱼耳石的种群分类效果, 利用裘氏鳄头冰鱼 (*Champscephalus gunnari*) 和南极小带腭鱼 (*Cryodraco antarcticus*) 样本, 对描述耳石的5种基础形态学参数进行分析并转换为7种形状指标, 比较分析了两种冰鱼间的耳石形态学差异, 再利用主成分分析、逐步判别分析法和随机森林法对两种耳石的77个傅里叶系数进行判别。结果表明, 两种冰鱼的耳石参数和体长均有显著的相关性 ($P > 0.05$), 裘氏鳄头冰鱼的体长与部分耳石参数呈幂函数关系, 而南极小带腭鱼耳石的长、高、面积、周长、质量与体长均呈对数关系。裘氏鳄头冰鱼较南极小带腭鱼耳石环率更低, 即更趋近于圆, 更为规则。传统的形态学测量方法无法区分两类耳石, 主成分分析可较好地地区分两种鱼类的耳石, 而逐步判别分析和随机森林分析的判别率分别达到98.78%和91.67%。逐步判别分析在小样本分析中具有优势, 随机森林分析则适用于大样本判别。

关键词: 耳石形态; 傅里叶分析; 主成分分析; 随机森林; 南极小带腭鱼; 裘氏鳄头冰鱼
中图分类号: S 931 **文献标志码:** A

南极鳄冰鱼科为南大洋鱼类中独特且重要的组成部分。鳄冰鱼科是许多陆架水域鱼类生物量的主要组成部分^[1], 其中裘氏鳄头冰鱼 (*Champscephalus gunnari*) 和南极小带腭鱼 (*Cryodraco antarcticus*) 为该科具有商业价值的鱼种, 尤其是裘氏鳄头冰鱼。裘氏鳄头冰鱼商业性开发始于1976年, 年渔获量曾超过50万t, 而雪冰鳕属 (*Chionobathyscus*) 和小带腭鱼属 (*Cryodraco*) 则是鳞头犬牙南极鱼 (*Dissostichus mawsoni*) 延绳钓渔业的主要兼捕鱼种^[2]。裘氏鳄头冰鱼为南极季节性浮冰区及其以北岛屿近海鱼类区系的重要鱼种, 栖息水深为100 ~ 350 m, 它是南极鳄冰鱼科的典型代表, 与其他冰鱼有着相似的生活史特征, 如卵较大, 繁殖力较低, 生

长较快等^[3]。南极小带腭鱼与头带冰鱼 (*Chaenocephalus aceratus*) 关系较近, 在深水区和南极高纬海区生态功能取代了头带冰鱼^[4]。尽管分布广泛, 但与裘氏鳄头冰鱼相比, 关于南极小带腭鱼生物学方面的信息极为有限^[5]。鉴于目前有关两个鱼种的生物学研究相对较少, 尤其是南极小带腭鱼, 因此开展相关研究显得尤为必要。

鱼类的耳石形态、大小、功能和微结构特征随种类而存在差异, 耳石的结构与组成相当稳定, 可反映鱼类的生长情况及其一生所经历的环境变化^[6]。耳石形态分析是一种有效的种群识别方法, 它与遗传异质性和环境因素对耳石形态的影响有关^[7]。裘氏鳄头冰鱼与南极小带腭鱼

收稿日期: 2020 - 09 - 08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776185); 国家重点研发计划项目(2018YFC1406801)

作者简介: 钱胡蕊(2000—), 女, 江苏南通人, 本科生, 从事海洋生物学研究。E-mail: qianhurui@163.com

通信作者: 朱国平, 教授。E-mail: gpzhu@shou.edu.cn

的耳石外型特征十分相似,采用传统的形态学测量法无法区分两者之间的差异。传统的耳石外型分析通常采用逐步判别分析法(stepwise discriminant analysis, SDA),但该方法在处理大数据和多变量时有所不足。最近,作为一种多元统计手段,主成分分析(principal component analysis, PCA)也应用到鱼类耳石外型的分析中,其主要的优点在于可以对多个变量进行降维处理,对分类变量无先验性假设^[8-9]。而随机森林(random forest, RF)作为一种机器学习方法,通过对大量分类树的汇总提高了模型的预测精度,运算速度较快,在处理大数据时表现优异。随机森林不需要顾虑一般回归分析面临的多元共线性问题,无需进行变量选择。另外,随机森林便于计算变量的非线性作用,且可体现变量间的交互作用^[10],并对离群值不敏感。为此,本研究利用主成分分析、逐步回归分析以及随机森林分析对两种冰鱼的耳石外型特征进行比较研究,探讨矢耳石各形态学参数与鱼体生长关系,建立耳石各形态学参数与鱼体体长关系的函数模型,以期为裘氏鳄头冰鱼及南极小带腭鱼耳石形态学提供基础数据,并对4种方法进行比较分析,以为基于耳石形态的种群鉴别及年龄鉴定提供基础资料。

1 材料与方 法

1.1 材料来源

裘氏鳄头冰鱼和南极小带腭鱼样本分别采集于2016年2月和2018年3月,采集海域为南极半岛水域(57°43'W~61°49'W、60°18'S~63°42'S)和南奥克尼群岛(46°18'W、60°12'S)。样本采集后冷冻保存,待运回实验室后开展后续分析。

在实验室中解冻样本,测量体长(SL)、体质量(TW)等生物学数据后,取出耳石,其中体长的测量精度为0.1 cm;体质量测量精度为0.1 g。本次实验选取裘氏鳄头冰鱼共98尾,取得完整左耳石96枚,右耳石98枚;选取南极小带腭鱼共41尾样本,取得完整左耳石41枚,右耳石41枚。对两种冰鱼的右耳石进行质量测量及图像采集(表1)。

1.2 耳石处理

将鱼体内取出的耳石用超纯水冲洗表面污垢黏液,再用超声波清洗机进行清洗,干燥后放入离心管常温保存。利用分度值为0.001 mg的微量分析天平称取干燥后耳石的质量(OW),并将耳石移至OLYMPUS SZ61型解剖镜下,耳石凸面向上、凹面向下放置,进行图像拍照采集。通过Digimizer图像测量软件,分别测量4个耳石形态参数值:耳石长(otolith length, OL)、高(otolith height, OH)、周长(otolith perimeter, OP)、面积(otolith area, OA),测量结果精确至0.001 mm。各形态参数测量位置如图1所示。

1.3 研究方法

1.3.1 传统形态学测量

参考AGÜERA和BROPHY^[11]、王英俊^[12]以及魏联等^[13]的相关研究,首先对两种鱼类耳石进行5个尺寸参数的测量,再通过公式的转换得到7个耳石形状指标数据(表2)。形态因子表述耳石轮廓的规则程度,其值越大,耳石轮廓越趋于规则;椭圆率描述外缘点到长、短轴间的距离是否成比例关系;幅形比表示耳石长轴与短轴间的差异程度,幅形比越接近1,说明差异越小。利用测量的尺寸参数及得到的形态指标对两种不同冰鱼耳石的形态学数据进行 t 检验并进行对比分析。

表1 两种南极冰鱼样本信息

Tab.1 Sample information of *Champscephalus gunnari* and *Cryodraco antarcticus*

种类 Species	体长范围/cm Standard length	体质量范围/g Total weight	样品数/尾 Sample size
裘氏鳄头冰鱼 <i>Champscephalus gunnari</i>	10.5~18.3	4.0~48.1	98
南极小带腭鱼 <i>Cryodraco antarcticus</i>	11.0~23.8	8.7~45.0	41

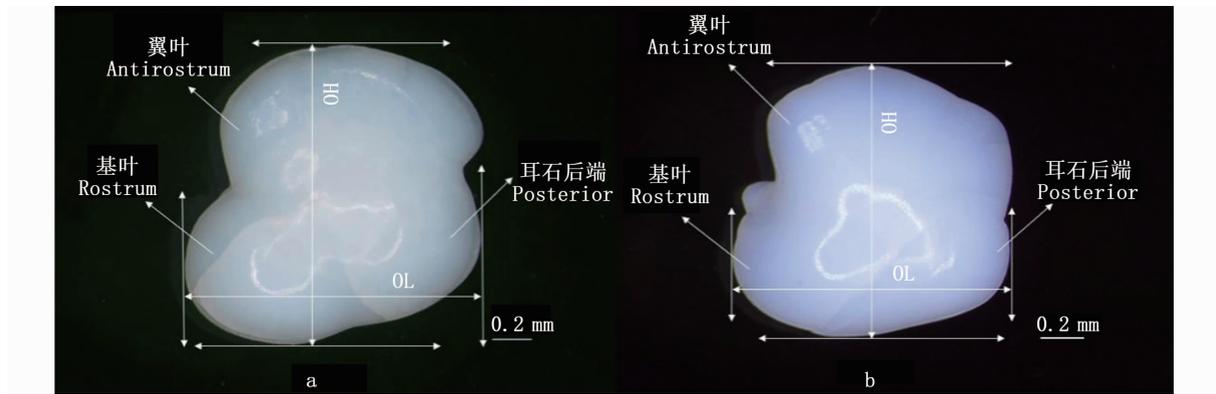


图1 南极小带腭鱼(a)和裘氏鳄头冰鱼(b)右耳石测量及形态示意图

Fig.1 Schematic map of otolith morphology and measurements of *Cryodraco antarcticus* and *Champscephalus gunnari*

注:OL为耳石长,OH为耳石高

Note: OL, otolith length; OH, otolith height

表2 两种冰鱼耳石尺寸参数和形状指标

Tab.2 Size parameters and morphological indices of otoliths for two icefishes

尺寸参数 Size parameters	耳石形状指标 Otolith morphological indices
耳石长(Otolith length, OL)	矩形趋近率(Rectangularity) = $OA / (OL \times OH)$: 耳石轮廓与其最小外接矩形的关系
耳石高(Otolith height, OH)	圆度(Roundness) = $4OA / (\pi OL^2)$: 耳石外轮廓趋于圆的情况
耳石周长(Otolith perimeter, OP)	幅形比(Asspect ratio) = OL / OH : 耳石长轴与短轴间的差异程度
耳石面积(Otolith area, OA)	形态因子(Form factor) = $(4\pi OA) / OP^2$: 耳石轮廓的规则程度
耳石质量(Otolith weight, OW)	环率(Circularity) = OP / OA^2 : 耳石与等面积圆之间的差异程度
	椭圆率(Ellipticity) = $(OL - OH) / (OL + OH)$: 外缘点到长、短轴间的距离是否成比例关系
	面密度(Surface density) = OW / OA : 耳石的薄厚程度

1.3.2 椭圆傅里叶测量

考虑到椭圆傅里叶分析方法可以描绘具有闭合二维轮廓的任何类型的形状^[14],因此,本研究采用该方法对两种冰鱼的耳石外型进行再处理,利用得到的傅里叶谐值进行判别分析。具体处理过程参见 KUHLE 和 GIARDINA^[15]。利用 Shape 1.3 软件包的 PrinComp 获得傅里叶谐值。每个耳石共由 80 个傅里叶特征系数(谐值)进行描述,对 80 个傅里叶谐值进行标准化后,考虑到前 3 个系数均为定值,故研究中采用 77 个傅里叶谐值进行统计分析,用于后续主成分分析、逐步判别分析和随机森林分析。

1.4 数据处理

针对测量得出的 5 项耳石形态学参数和 7 项形状指标,利用 Shapiro-Wilk(S-W)检验其是否符合正态分布。若符合,则利用配对样本 t 检验分析其差异性;若不符合,则利用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验和 Wilcoxon 符号秩检验。分析耳石各个形态学参数值与体长之间的函数关

系,并利用赤池信息准则(AIC)选取最适拟合函数,AIC 值最小者为最适合函数^[16-17]。

对 77 个傅里叶谐值进行 PCA 分析,再利用 SDA 对两种冰鱼进行判别分析,选出纳入判别方程的因子,建立判别方程,求得正确率^[18]。为了对比传统的 SDA 分析,减少形状描述符的维数和避免形状描述符之间的共线性,本研究同时利用基于随机森林的判别方法对 PCA 中贡献率最高的前 10 个成分进行深入学习。采取 70% 作为训练样本,30% 作为预测样本,分类树为 100。外型统计分析以及 SDA 均采用 SPSS 19.0 软件操作,PCA 和 RF 分别利用 R 4.0.0 程序中的 FactoMineR 和 RandomForest 包实现。除特殊说明外,显著性水平均取 $P = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 耳石形态测量数据分析

2.1.1 耳石尺寸参数与体长的关系

通过观察发现,两种鱼类耳石的基叶、翼叶

均分化明显,基叶和翼叶之间的主间沟清晰。南极小带腭鱼耳石外形趋近于矩形,耳石边缘较光滑平整,背部和腹部均无明显突起,耳石上无明显缺刻。裘氏鳄头冰鱼耳石外型趋近于圆形,耳石背部分布较多不平坦的缺刻,部分个体耳石前部沟壑内有分化的突起,常称为耳石中央突。

两种冰鱼耳石在个体较小时均趋近圆形,且随着体长的增加,南极小带腭鱼和裘氏鳄头冰鱼耳石的基叶、翼叶分化愈明显。K-S 检验显示,两种冰鱼 5 个耳石形态参数均存在显著性差异(表 3)。

通过 AIC 检验选取两种冰鱼体长和 5 项耳石形态学参数之间的最适函数。配对样本 Wilcoxon 符号秩检验显示,耳石长、高、周长、面积和质量拟合出的两种冰鱼函数体长与实际测量体长无显著差异($P > 0.05$),两种冰鱼的耳石各形态学参数均可用于预测这两种冰鱼的体长(表 4)。同时,通过对数函数关系可以看出,南极小

带腭鱼的耳石大小会随体长、年龄的增长而增大,但至生长后期,耳石的增长速度逐渐减缓。

2.1.2 耳石形状指标

通过视觉观察可以看出,裘氏鳄头冰鱼耳石形状更为规则,趋近于圆,耳石背部分布较多不平坦的缺刻,部分个体耳石前部沟壑内有分化的突起。南极小带腭鱼耳石长、短轴相近,趋近于方形,耳石边缘比较光滑平整,背部和腹部均无明显突起,耳石上无明显缺刻。K-S 检验显示,两种冰鱼耳石的矩形趋近率、圆度和面密度均无显著差异,说明两种冰鱼耳石的轮廓形状和耳石厚度极为相似,仅从外观上无法判别耳石种类。虽然描述两种冰鱼耳石的形态因子、椭圆率及幅形比等 3 项形状指标存在着极显著性差异($P < 0.01$),但直观上的外型观察(均值和标准差)仍不明显(表 5)。因此,通过视觉观察和传统的形态学测量法并不能有效地区分两种冰鱼耳石特征差异。

表 3 裘氏鳄头冰鱼和南极小带腭鱼耳石尺寸参数比较

Tab. 3 Comparison on otolith morphology of *Champscephalus gunnari* and *Cryodraco antarcticus*

参数 Parameters	裘氏鳄头冰鱼 <i>Champscephalus gunnari</i>			南极小带腭鱼 <i>Cryodraco antarcticus</i>			P 值 P value
	最大值 Maximal value	最小值 Minimal value	均值 ± 标准差 Mean ± S. D.	最大值 Maximal value	最小值 Minimal value	均值 ± 标准差 Mean ± S. D.	
耳石长 OL	1.150	0.502	0.837 ± 0.119	2.753	0.770	0.987 ± 0.333	<0.01
耳石高 OH	1.098	0.500	0.792 ± 0.126	2.634	0.740	0.973 ± 0.310	<0.01
耳石周长 OP	5.944	1.285	2.913 ± 0.602	5.022	2.766	3.384 ± 0.635	<0.01
耳石面积 OA	2.374	0.108	0.555 ± 0.262	1.499	0.467	0.709 ± 0.270	<0.01
耳石质量 OW	3.385	0.359	1.549 ± 0.725	6.526	0.978	2.157 ± 1.326	<0.01

表 4 裘氏鳄头冰鱼和南极小带腭鱼体长与耳石形态参数间的函数关系

Tab. 4 Functional relationship between otolith morphology and standard length of *Champscephalus gunnari* and *Cryodraco antarcticus*

关系 Relationship	表达式 functional relationship		符号秩检验 Wilcoxon signed-rank test
	裘氏鳄头冰鱼 <i>Champscephalus gunnari</i>	南极小带腭鱼 <i>Cryodraco antarcticus</i>	
体长-耳石长 SL-OL	$SL = 5.699 6e^{0.991 7OL}$ $R^2 = 0.684 9$	$SL = 5.579 \ln OL + 18.279$ $R^2 = 0.314$	$P_{裘} > 0.05$ $P_{小带腭} > 0.05$
体长-耳石高 SL-OH	$SL = 5.980 4e^{0.987 2OH}$ $R^2 = 0.756 6$	$SL = 5.305 3 \ln OH + 18.322$ $R^2 = 0.26$	$P_{裘} > 0.05$ $P_{小带腭} > 0.05$
体长-耳石周长 SL-OP	$SL = 2.130 7OP + 7.003 3$ $R^2 = 0.369 4$	$SL = 8.548 5 \ln OP + 7.718 3$ $R^2 = 0.373 5$	$P_{裘} > 0.05$ $P_{小带腭} > 0.05$
体长-耳石面积 SL-OA	$SL = 15.010A^{0.206 5}$ $R^2 = 0.341 1$	$SL = 4.587 2 \ln OA + 19.842$ $R^2 = 0.379 7$	$P_{裘} > 0.05$ $P_{小带腭} > 0.05$
体长-耳石质量 SL-OW	$SL = 9.993 3e^{0.173 2OW}$ $R^2 = 0.772 7$	$SL = 2.974 1 \ln OW + 16.136$ $R^2 = 0.306 4$	$P_{裘} > 0.05$ $P_{小带腭} > 0.05$

表5 裘氏鳄头冰鱼和南极小带腭鱼耳石形状指标参数比

Tab. 5 Comparison on otolith morphological indices of *Champscephalus gunnari* and *Cryodraco antarcticus*

参数 Parameters	裘氏鳄头冰鱼 <i>Champscephalus gunnari</i>			南极小带腭鱼 <i>Cryodraco antarcticus</i>			P 值 P value
	最大值 Maximal value	最小值 Minimal value	均值 ± 标准差 Mean ± S. D.	最大值 Maximal value	最小值 Minimal value	均值 ± 标准差 Mean ± S. D.	
矩形趋近率 Rectangularity	4.950	0.200	0.845 ± 0.500	0.848	0.114	0.767 ± 0.106	>0.05
圆度 Roundness	5.672	0.233	1.016 ± 0.590	1.151	0.139	0.970 ± 0.155	>0.05
幅形比 Aspect ratio	1.150	0.968	1.059 ± 0.037	1.179	0.868	1.013 ± 0.071	<0.01
形态因子 Form factor	0.848	0.441	0.791 ± 0.047	0.846	0.601	0.760 ± 0.048	<0.01
环率 Circularity	110.464	1.054	13.860 ± 16.256	12.716	2.236	8.092 ± 2.804	<0.01
椭圆率 Ellipticity	0.070	-0.016	0.029 ± 0.017	0.082	-0.071	0.005 ± 0.035	<0.01
面密度 Surface density	10.681	0.371	2.982 ± 1.417	5.662	1.986	2.867 ± 0.690	>0.05

2.3 主成分分析

对两种冰鱼耳石的 77 个傅里叶谐波值进行主成分分析,结果显示,裘氏鳄头冰鱼和南极小带腭鱼耳石参数值的前 10 个主成分累计贡献率已达到 69.74%,其中第一因子的贡献率为 15.1%,第二因子的贡献率为 11.4%。依据两种南极冰鱼耳石形态的 77 个傅里叶特征系数指标所获的第一及第二主成分因子散点图(图 2)可以看出,两种冰鱼耳石在第二因子方向上区分明显,第一因子和第二因子之间仅有少量重叠,区分效果相对较好。

2.4 判别分析

用逐步判别分析法对两种冰鱼耳石进行分类,由 77 个傅里叶谐波值中选出 14 个极显著性变量($P < 0.01$)的傅里叶谐波值,纳入判别方程。通过 Fisher 线性判别函数,对这 14 个极显著性变量建立判别方程,将两种南极冰鱼耳石样本中筛选出的傅里叶谐波值代入上述 Fisher 判别函数中,则该样本归入所得 Y 值较大的函数为其所对应的类别。由初始判别结果可知,裘氏鳄头冰鱼和南极小带腭鱼的判别正确率均为 100%。南极小带腭鱼交叉验证的结果与初始判别结果不相同,原因是一个样本数据与其他验证样本数据产生较大误差,但并未影响该分析结果的可靠性,判别分析总体正确率为 98.78%(表 6)。利用随机森

林方法对主成分分析中贡献率最高的前 10 个成分进行深入研究,结果显示,训练样本的总体判别正确率为 96.12%,而预测样本的总体判别正确率则达到了 91.67%。

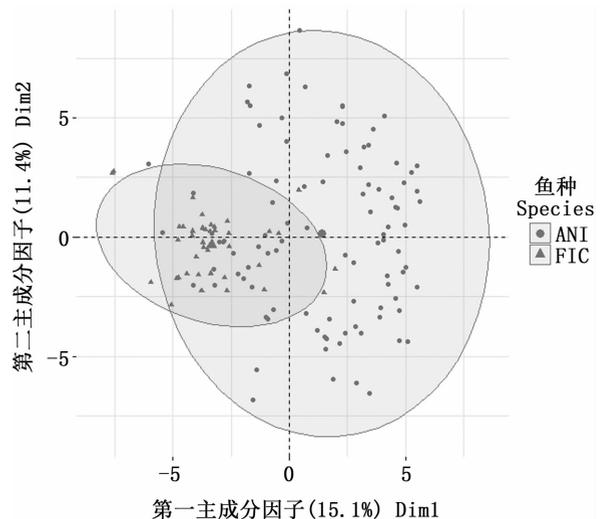


图2 两种南极冰鱼耳石外型傅里叶谐波值第一主成分和第二主成分因子分布图

Fig. 2 The 1st and 2nd principal components on Fourier harmonics for otolith morphological parameters of two icefishes

注:ANI,裘氏鳄头冰鱼;FIC,南极小带腭鱼

Note: ANI, *Champscephalus gunnari*; FIC, *Cryodraco antarcticus*

表 6 基于逐步判别分析和随机森林分析的裘氏鳄头冰鱼和南极小带腭鱼耳石判别分析
 Tab. 6 Classification of otolith morphology for *Champscephalus gunnari* and *Cryodraco antarcticus*
 based on stepwise discriminant analysis and random forest

分析方法 Analytical method	过程分析 Procedure analysis	组别 Group	判别方程 Discriminant equation		总计 Total	正确率 /% Accuracy
			裘氏鳄头冰鱼 <i>Champscephalus gunnari</i>	南极小带腭鱼 <i>Cryodraco antarcticus</i>		
逐步判别分析 SDA	初始判别 Original result	裘氏鳄头冰鱼	98	0	98	100
		南极小带腭鱼	0	41	41	100
	交叉验证 Cross-validation result	裘氏鳄头冰鱼	98	0	98	100
		南极小带腭鱼	1	40	41	97.56
随机森林分析 RF	训练样本 Training sample	裘氏鳄头冰鱼	72	2	74	97.30
		南极小带腭鱼	2	27	29	93.10
	测试样本 Test sample	裘氏鳄头冰鱼	23	1	24	95.83
		南极小带腭鱼	2	10	12	83.33

3 讨论

3.1 耳石形态学

从通过公式转换得到的 7 项耳石形态学指标来看,南极小带腭鱼和裘氏鳄头冰鱼有近一半的形态学指标无显著性差异,而剩下的指标虽存在显著性差异,但通过视觉观察无法得出可靠的分类依据。因此,传统的形态学测量法并不能清晰、有效地区分这两种冰鱼耳石特征差异。

根据两种冰鱼体长与耳石形态参数间的函数关系可知,两种冰鱼耳石的大小随体长的增加而增加,呈正相关。关于鱼类体长与耳石形态参数的最适函数方程模拟中,南极小带腭鱼体长与各个耳石形态参数的最适函数均为对数函数,虽然方差显示两者之间存在显著的相关关系,但拟合效果并不佳($R^2 < 0.5$)。其原因可能为样本量较少、体长较为集中(体长 11.0 ~ 23.8 cm),而测量的耳石形态参数范围过窄所致。通过观察两种冰鱼体长和耳石形态参数的函数关系可以发现,南极小带腭鱼的耳石大小会随体长的增长而增大,但至生长后期,耳石的增长速度逐渐减缓;而裘氏鳄头冰鱼耳石大小随体长的增长变化较为稳定。此外,由于不同世代鱼类个体的耳石形态特征可能受生物环境因素影响而存在差异,因此有必要分析耳石形态变量的年龄间差异^[19]。

耳石传统形态学测量存在诸多局限性,如取样的范围和个体大小的筛选等均会对鱼体外型参数(体长、体质量等)与耳石形态参数间的函数拟合产生较大的影响。例如,裘氏鳄头冰鱼的耳石长和体长的关系,本文拟合函数为 $SL = 5.699 6e^{0.991 70L}$ ($R^2 = 0.684 9$),这与 WILLIAMS

和 MCELDFOWNEY^[20]对南极赫德岛附近水域($SL = 96.670L - 20.02$, $R^2 = 0.96$)、HECHT^[21]对凯尔盖朗群岛、南乔治亚岛等多个水域($SL = 12.550L^{0.95}$, $R^2 = 0.81$)以及魏联等^[16]对南设得兰群岛水域($SL = 19.3640L^{0.411 9}$, $R^2 = 0.13$)裘氏鳄头冰鱼耳石长与体长的关系均有所差异。产生这种差异的因素较多,如不同海域温、盐等海洋环境以及摄食来源等生物环境均对耳石生长可能会产生影响。而当采样海域相同或接近时,样本的体长范围亦影响两者之间的关系^[22]。

3.2 耳石外型判别分析

鱼类耳石体积微小且形态多样,边缘多为不规则凸起和凹陷;因此,传统形态学无法精确测量耳石边缘的微小变化^[23-24],而这些微小的变化正是判别耳石形态是否存在多样性的关键因素。因此,本文在传统形态学测量的基础上,又采用多种判别分析进行了进一步分析。主成分分析结果显示,裘氏鳄头冰鱼和南极小带腭鱼耳石在第二因子上可进行较好的区分。虽然两种冰鱼耳石外型的两个主成分呈现聚拢,但可以发现,裘氏鳄头冰鱼耳石外型的主成分包围在南极小带腭鱼耳石外型各主成分的外部,且第一主成分和第二主成分间仅有少量重叠,整体区分效果较好。判别分析结果显示,裘氏鳄头冰鱼得到的判别正确率为 100%,南极小带腭鱼判别正确率为 97.56%,判别效果较为理想。基于随机森林进一步验证分析的结果显示,训练样本的判别正确率为 96.12%,而预测样本的判别正确率则达到了 91.67%,总体略低于逐步判别分析法,原因可能是两种冰鱼样本量不同以及数据量总体偏少导致。这也进一步说明,针对样本量较小的样

本采用随机森林分析,无法体现该方法的优势。

传统形态学测量基于鱼的外形特征及鱼类耳石形态参数等更加直观全面的信息,通过测量耳石的长度和宽度推算鱼类体长等形态参数建立数学方程,用来描述其生长过程预测生长趋势,比较种间和种群间的生长差异并提供相关渔业资源管理措施等^[25]。而傅里叶分析法用数据表达耳石轮廓,分析耳石的形态变化和个体差异时,可消除因耳石位置、人工测量产生的误差,快速准确地进行鱼种判别分类。两种方法能够达到相辅相成的效果。本文采用了两种判别分析方法,因数据样本量较小,结果显示逐步判别分析法的正确率高于随机森林,因此,少量样本数据时推荐采用逐步判别分析法,以缩小判别误差,提高判别正确率;而针对庞大数据量时,则推荐采用基于随机森林的判别分析法,以减少限制条件,提高判别效率。

随机森林主要用于分类和回归,其结构比较复杂,但却具有极强的易用性,尤其在处理海量数据以及大量的自变量时更体现其优势^[26]。随机森林判别法需要的假设条件,如变量的独立性、正态性等,比其他判别模型要少得多,它也不需要检查变量的交互作用和非线性作用是否显著^[13]。因此,在当前大数据广泛应用的背景下,随机森林判别法作为一种可靠的判别分析方法,可适用于今后耳石外型的研究中。

致谢:感谢南极磷虾渔业科学观察员以及南极磷虾渔船船长及船员在样本收集过程中提供的帮助。本研究还得到了上海海洋大学大学生创新项目以及“优秀本科生进实验室”项目的部分资助。

参考文献:

[1] EASTMAN J T, HUBOLD G. The fish fauna of the Ross Sea, Antarctica[J]. Antarctic Science, 1999, 11(3): 293 - 304.

[2] MESA M L, VACCHI M, IWAMI T, et al. Taxonomic studies of the Antarctic icefish genus *Cryodraco* Dollo, 1900 (Notothenioidei: Channichthyidae) [J]. Polar Biology, 2002, 25(5): 384 - 390.

[3] KOCK K H, EVERSON I. Biology and ecology of mackerel icefish, *Champsocephalus gunnari*: An Antarctic fish lacking hemoglobin[J]. Comparative

Biochemistry & Physiology Part A Physiology, 1997, 118(4): 1067 - 1077.

- [4] KOCK K H, JONES C D. The biology of the icefish *Cryodraco antarcticus* Dollo, 1900 (Pisces, Channichthyidae) in the southern Scotia Arc (Antarctica) [J]. Polar Biology, 2002, 25(6): 416 - 424.
- [5] LA MESA M, CALI F, RIGINELLA E, et al. Biological parameters of the high-Antarctic icefish, *Cryodraco antarcticus* (Channichthyidae) from the South Shetland Islands[J]. Polar Biology, 2020, 43(2): 143 - 155.
- [6] 宋昭彬, 曹文宣. 鱼类耳石微结构特征的研究与应用[J]. 水生生物学报, 2001, 25(6): 613 - 619.
- SONG Z B, CAO W X. The studies and applications of fish otolith microstructure [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2001, 25(6): 613 - 619.
- [7] VIGNON M, MORAT F. Environmental and genetic determinant of otolith shape revealed by a non-indigenous tropical fish [J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, 411(12): 231 - 241.
- [8] BEGG G A, OVERHOLTZ W J, MUNROE N J. The use of internal otolith morphometrics for identification of haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) stocks on Georges Bank [J]. Fisheries Bulletin, 2001, 99(1): 1 - 14.
- [9] MERIGOT B, LETOURNEUR Y, LECOMTE-FINIGER R. Characterization of local populations of the common sole *Solea solea* (Pisces, Soleidae) in the NW Mediterranean through otolith morphometrics and shape analysis[J]. Marine Biology, 2007, 151(3): 997 - 1008.
- [10] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. 应用昆虫学报(昆虫知识), 2013, 50(4): 1190 - 1197.
- LI X H. Using "random forest" for classification and regression [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2013, 50(4): 1190 - 1197.
- [11] AGÜERA A, BROPHY D. Use of sagittal otolith shape analysis to discriminate northeast Atlantic and western Mediterranean stocks of Atlantic saury, *Scomberesox saurus saurus* (Walbaum) [J]. Fisheries Research, 2011, 110(3): 465 - 471.
- [12] 王英俊. 傅里叶分析在鱼类耳石形态学中的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- WANG Y J. The application of fourier analysis in the research of otolith morphology[D]. Qingdao: Ocean

- University of China, 2010.
- [13] 魏 联, 朱国平, 刘子俊. 基于形态学及傅里叶分析对两种南极冰鱼耳石外型的研究[J]. 极地研究, 2017, 29(2): 219–220.
WEI L, ZHU G P, LIU Z J. Otolith shape of two icefish species based on morphology and Fourier analysis[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2017, 29(2): 219–220.
- [14] 欧利国, 刘必林, 方 舟. 基于椭圆傅里叶变换的鱼类矢耳石和听沟形态识别[J]. 海洋渔业, 2019, 41(4): 385–396.
OU L G, LIU B L, FANG Z. Identification of sagittal otolith morphology and sulcus morphology based on elliptic Fourier transform [J]. Marine Fisheries, 2019, 41(4): 385–396.
- [15] KUHL F P, GIARDINA C R. Elliptic Fourier features of a closed contour[J]. Computer Graphics & Image Processing, 1982, 18(3): 236–258.
- [16] AKAIKE H. Information measures and model selection [J]. International Statistical Institute, 1983, 50(1): 277–290.
- [17] BURNHAM K P, ANDERSON D R. Model selection and multimodel inference: A practical Information-theoretic approach (2nd Edition) [M]. New York: Springer, 2002.
- [18] 李思发, 李晨虹, 李家乐. 尼罗罗非鱼品系间形态差异分析[J]. 动物学报, 1998, 44(4): 450–457.
LI S F, LI C H, LI J L. Analysis of morphological variations among strains of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Acta Zoologica Sinica. 1998, 44(4): 450–457.
- [19] 于 鑫. 鱼类耳石形态和微化学分析方法及其在群体识别中的实证研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2014.
YU X. Methodology and case studies of fish otolith morphology and microchemistry analysis in stock discrimination [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [20] WILLIAMS R, MCELDFOWNEY A. A guide to the fish otoliths from waters off the Australian Antarctic territory, Heard and Macquarie Islands [M]. Kingston: Antarctic Division, Department of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories, 1990.
- [21] HECHT T. A guide to the otoliths of Southern Ocean fishes [J]. South African Journal of Antarctic Research, 1988. doi:10.1017/S0032247400022580.
- [22] 刘子俊. 裘氏鳄头冰鱼耳石外型. 微化学及其鉴龄研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
LIU Z J. Otolith shape, microchemistry and ageing in mackerel icefish (*Champsocephalus gunnari*) [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [23] BIRD J L, EPPLER D T, CHECKLEY JR D M. Comparisons of herring otoliths using Fourier series shape analysis [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011(43): 1228–1234.
- [24] 魏 联, 朱国平. 基于椭圆傅里叶分析的次南极电灯鱼矢耳石形态多样性[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 3082–3083.
WEI L, ZHU G P. Otolith morphological diversity of *Electrona carlsbergi* based on elliptical Fourier analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 3082–3083.
- [25] 华元渝, 石黎军, 李海燕, 等. 暗纹东方鲀年龄鉴定的研究[J]. 水生生物学报, 2005, 29(3): 279–284.
HUA Y Y, SHI L J, LI H Y, et al. Age discrimination of *Takifugu obscurus* Abe [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, 29(3): 279–284.
- [26] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5–32.

Comparative analysis on otolith shape of *Champsocephalus gunnari* and *Cryodraco antarcticus* based on four morphological techniques

QIAN Hurui¹, ZHU Guoping^{1, 2, 3, 4}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Center for Polar Research, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Polar Marine Ecosystem Group, Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China)

Abstract: To study the effectiveness of otolith morphological techniques on the population classification of Antarctic ice fish, based on the collected samples of *Champsocephalus gunnari* and *Cryodraco antarcticus*, 5 kinds of basic otolith morphological parameters were measured and converted into 7 morphological indicators, the differences in otolith morphology of two species were compared and analyzed, principal component analysis (PCA), stepwise discriminant analysis (SDA) and random forest (RF) were then used to discriminate the 77 elliptical Fourier harmonics of otolith morphological parameters. The results showed that the otolith parameters and body length of two species were significantly correlated ($P > 0.05$). The body length of *C. gunnari* showed a power function relationship with some morphological parameters. While otolith length, otolith height, otolith area, otolith perimeter, otolith mass of *C. antarcticus* were all in logarithmic relationship with the body length. It could be seen that the otolith ring rate of *C. gunnari* was lower than that of *C. antarcticus*, compared to the otolith of *C. antarcticus*, the otolith of *C. gunnari* was rounder and more regular. The conventional morphological analysis could not discriminate the otoliths of two species. The PCA could discriminate the otoliths of two species, and the discriminant success rates of SDA and RF were 98.78% and 91.67%, respectively. SDA has its advantage in small sample size, but RF is suitable for large sample size.

Keywords: otolith shape; Fourier analysis; principal component analysis; random forest; *Cryodraco antarcticus*; *Champsocephalus gunnari*