

三种鲚属鱼类耳石形态差异研究

鲁美辰^{1,2}, 张振东^{1,2}, 张赛赛³, 顾知之^{1,2}, 陈岩^{1,2}, 王伟^{1,2*}

¹大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连

²辽宁省北方鱼类应用生物学与增养殖重点实验室, 辽宁 大连

³大连市海洋发展事务服务中心, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年4月2日; 录用日期: 2025年5月30日; 发布日期: 2025年6月10日

摘要

鲚属鱼类是一种重要的经济鱼类, 因不同地理环境的影响, 造成不同种的鲚之间的经济价值有所差异。鱼类耳石存在于听泡中, 而耳石在鱼类分类和年龄鉴定等方面具有重要作用。本研究通过耳石形态测量法对湖鲚、短颌鲚和3个不同群体刀鲚(辽河刀鲚、大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚)的耳石形态进行了差异性分析, 并对鱼体长与耳石形态的关系进行了分析。研究结果表明, 3个群体刀鲚与湖鲚和短颌鲚之间的耳石形态存在显著性差异; 而在3个刀鲚群体之间同样存在显著性差异; 而湖鲚与短颌鲚之间也存在差异性。此外, 通过耳石形态判别分析发现, 辽河刀鲚、大洋河刀鲚、鸭绿江刀鲚、湖鲚和短颌鲚的判别准确率分别为89.5%、86.7%、84.8%、90.0%和93.3%。由此得出试验鱼的体长均与耳石形态呈正相关关系。

关键词

耳石, 刀鲚, 湖鲚, 短颌鲚, 差异性分析

Study on the Morphological Difference of Otolith in Three Species of Anchovy

Meichen Lu^{1,2}, Zhendong Zhang^{1,2}, Saisai Zhang³, Zhizhi Gu^{1,2}, Yan Chen^{1,2}, Wei Wang^{1,2*}

¹College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

²Key Laboratory of Applied Biology and Aquaculture of Northern Fish in Liaoning Province, Dalian Liaoning

³Dalian Marine Development Service Center, Dalian Liaoning

Received: Apr. 2nd, 2025; accepted: May 30th, 2025; published: Jun. 10th, 2025

Abstract

Coilia is an important economic fish. Due to the influence of different geographical environments,

*通讯作者。

文章引用: 鲁美辰, 张振东, 张赛赛, 顾知之, 陈岩, 王伟. 三种鲚属鱼类耳石形态差异研究[J]. 海洋科学前沿, 2025, 12(2): 111-125. DOI: 10.12677/ams.2025.122012

the economic value of different species of *Coilia*. The otoliths of fish are located in the auditory vesicle and play an important role in fish classification and age determination. In this study, the morphological differences of otoliths among *Coilia nasus taihuensis*, *Coilia brachygnathus*, and three different groups of *Coilia* (*Liaohe Coilia ectenes*, *Dayanghe Coilia ectenes*, and *Yalu River Coilia ectenes*) were analyzed using the otolith morphology measurement method, and the relationship between fish body length and otolith morphology was also analyzed. The results showed that there were significant differences in otolith morphology among the three groups of *Coilia* and lake herring, short-snouted herring, and among the three knife herring groups themselves; and there were also differences between lake herring and short-snouted herring. In addition, through otolith morphology discriminant analysis, the discrimination accuracy rates of *Liaohe Coilia ectenes*, *Dayanghe Coilia ectenes*, and *Yalu River Coilia ectenes*, *Coilia nasus taihuensis*, and *Coilia brachygnathus* were 89.5%, 86.7%, 84.8%, 90.0%, and 93.3%, respectively. Thus, it was concluded that the body length of the tested fish was positively correlated with the otolith morphology.

Keywords

Otolith, *Coilia*, Lake *Coilia*, *Coilia brachygnathus*, Difference Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

鲚属鱼类在我国是一种中小型的经济鱼类, 主要分布在沿海地区或长江中下游地区, 有两种生活型, 分别是洄游型和定居型。在中国该属鱼类主要有三种, 分别是刀鲚(*Coilia ectenes*)、凤鲚(*Coilia mystus*)、七丝鲚(*C. grayii*) [1]。而刀鲚又包含两种不同的生态型如: 短颌鲚、湖鲚。其中短颌鲚生活在淡水中, 湖鲚、凤鲚和七丝鲚生活在沿海地区, 在繁殖季节, 鲚会洄游到江河中上游进行产卵。中国鲚属鱼类中, 对凤鲚与刀鲚和短颌鲚之间做区分, 而刀鲚和短颌鲚最难区分, 通过以往对鱼类耳石分类的研究, 结果发现利用鱼类耳石形态可以对一些鱼类进行种类鉴定和种群划分[2]。故对鱼类种属进行鉴定, 鱼类的耳石形态已成为划分鉴定的主要依据之一。

鱼类耳石是内耳膜迷路内的一种钙化组织, 有平衡方向和接收声音的作用[3]。鱼耳石共有 3 对, 分别为矢耳石、微耳石和星耳石, 其中矢耳石较大, 多被用于鱼类耳石形态的研究[4]。鱼类耳石是由碳酸钙、微量元素和部分有机物质组成的, 组成成分相对稳定。国内展开较早的鱼类耳石形态研究。上世纪 60 年代, 朱元鼎、罗云林、伍汉霖等人对中国石首鱼类耳石的形态和式型进行了研究[5]; 1999 年张国华等人[6]用判别分析法对六种鲤科鱼类耳石的形态特征进行了分析。近些年郭弘艺等人对中国鲚属鱼类的矢耳石形态特征进行了分析[7]; 邓维德、赵亚辉、康斌、张春光、叶恩琦利用耳石对鱼类年龄与生长进行了研究[8]。胡永斌针对长江口的刀鲚与凤鲚的生长与耳石形态进行初步对比研究[9]。据文献报道, 国外上世纪 80 年代 Neilson 利用传统的耳石形态观测法对虹鳟的种群进行了区分[10]。90 年代 Martin Castonguay 利用光学图形识别系统软件测量出耳石形态指标, 对数据进行判别函数分析, 并对北海大西洋和西北部大西洋的鲭种群进行比较, 研究结果发现, 判别函数比较适合对大西洋鲭的种群结构进行比较分析[11]。Kimberly Smith 同样利用 OPRS 对耳石主叶长、侧叶长、侧叶宽、以及耳石径进行了测量, 并用傅里叶分析法进行数据处理, 其研究结果发现, 来自于夏威夷、斐济、法属玻利尼西亚、瓦努阿图以及部分马里亚纳群岛的红钻鱼的耳石在某些形态特征上存在着显著差异, 其中来自于夏威夷、法属玻

利尼西亚和部分的马利亚纳群岛的红钻鱼在耳石外形上，存在的亲缘关系；来自于瓦努阿图和斐济的红钻鱼耳石外形比较相似，与来自于另外三个水域的红钻鱼耳石形态不相同[12]。近年，Steven E.对西北大西洋 285 种海洋鱼类的耳石形态学特征进行了系统的描述[13]，而利用耳石对不同地理群体刀鲚以及短颌鲚、湖鲚的差异研究，还未见相关报道。

本文研究采用鱼类耳石形态测量法，分别对来自于辽河、大洋河和鸭绿江的刀鲚、太湖湖鲚以及鄱阳湖短颌鲚的耳石形态进行了研究，包括耳石形态结构区别，体长与耳石形态之间的关系，刀鲚和湖鲚的种与亚种关系，以及这 5 个群体之间的差异性。研究过程中通过软件测量的鱼类耳石形态参数，主要有耳石重、耳石面积、耳石长、耳石宽、耳石周长、耳石矩形趋近率、耳石充实度和耳石密度[14]。数据的分析主要采用了判别分析法、聚类分析法和差异系数检验法。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

本研究用鱼为 3 个群体刀鲚(辽河刀鲚，大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚)与湖鲚和短颌鲚，采样基本信息如表 1。

Table 1. Basic information of *Coilia ectenes*, *Coilia nasus taihuensis* and *Coilia brachygnat*
表 1. 刀鲚、湖鲚和短颌鲚的采样基本信息

种类 Species	采样地点 Sampling sites	采样时间 Time	样本数(尾) Tails	体长范围 mm Body length range	体长平均值/mm Mean body length	体重平均值/mg Body length range
辽河刀鲚 <i>Liaohe Coilia ectenes</i>	辽河	2014.07	19	193.06~372.03	252.82	71.59
大洋河刀鲚 <i>Dayanghe Coilia ectenes</i>	大洋河	2015.06	30	169.00~280.00	229.08	49.77
鸭绿江刀鲚 <i>Dayanghe Coilia ectenes</i>	鸭绿江	2015.08	32	190.80~254.37	217.90	34.76
湖鲚 <i>Coilia nasus taihuensis</i>	太湖	2015.08	30	145.51~256.11	221.34	41.70
短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>	鄱阳湖	2015.09	30	193.97~274.21	234.47	51.00

样品采集后冰冻运回至大连海洋大学辽宁省北方鱼类应用生物学与增养殖重点实验室，后期取出耳石，备用。

2.2. 实验方法

2.2.1. 耳石的采集与制备

取出实验鱼两侧耳囊中一对矢耳石，编号后对其清洗并去除表面的粘液和包膜，清洗干净后放置于 60℃ 的烤箱中烘烤 24 小时后取出放置于干燥器中自然冷却。

2.2.2. 耳石形态的测量

由于鲚属鱼类左右矢耳石在形态特征上无明显的差异性[15]，故本研究中统一使用受试鱼左矢耳石

进行分析。用电子天平对处理过的耳石进行称重。通过带有 Leica DFC450 C 相机的 Leica M205 FA 立体荧光显微镜和与之对应的图像采集系统对耳石进行图像采集，并对采集到的图像进行分析测量，记录测量数据并整理汇总。具体操作方法如下：首先筛选出左矢耳石，将其放置在 Leica M205 FA 立体荧光显微镜的载物台上，外侧面向上，内侧面向下，通过 Leica DFC450 C 相机对应的系统进行拍照，得耳石的放大倍数图。采用生物图像处理软件 Image-proplus6.0 对耳石形态参数进行测量，以下是测量参数(表 2)。

Table 2. Morphological parameters of otoliths in fish
表 2. 鱼类耳石形态的测量参数

测量的参数 Measured parameter	描述 Description
耳石长(Otolith length, H)	耳石从前部到后部的长度
耳石宽(Otolith width, W)	耳石从背部到腹部的长度
面积(Area, A)	耳石的平面面积
周长(Perimeter, P)	耳石不规则边缘的实际长度
耳石重(Otolith Weight, OW)	耳石的实际重量
矩形趋近率(Rectangularity, R)	耳石面积与其最小的外切矩形面积的比值
充实度(Circularity, C)	耳石周长的平方与面积的比值
密度(Density, D)	耳石重量与面积的比值

2.2.3. 数据处理方法

实验数据采用 Excel 表格和数据分析软件 SPSS 19.0 进行处理。运用差异系数检验，主成分分析，判别分析，聚类分析等。其中差异系数检验依据公式[16]： $C_D = (M_B - M_A) / (SD_A + SD_B)$ ，公式中的 M_B 和 M_A 是指两个群体中同一形态参数的平均值， SD_A 和 SD_B 指对应的标准差，若差异系数小于 1.28，则两个群体为种间关系，大于 1.28 则为种和亚种的关系。

3. 结果与分析

3.1. 耳石形态结构描述

鱼类耳石的形态结构纷繁复杂，在图 1 中我们细化地展示其外形结构，而又在几何结构上分内外侧两面，而又了解到可根据鱼体结构又可分为背腹部和前后部，所以一般将耳石面向鱼体外侧的一面称为外侧面，将面向鱼体内部的一面称之为内侧面，将朝向鱼体头部、尾部、腹部和背部方向的一端分别称之为耳石的前部、后部、腹部和背部，主凹槽、翼叶、基叶等结构特征亦为多数鱼类耳石所共有。对这些部位的分类有利于更好地了解耳石在鱼体内的形态。

由图 2 所示，辽河刀鲚 A 的左耳石基叶和翼叶与大洋河刀鲚 B 相比较短，A 左耳石的中央突比 B 大；A 左耳石基叶和翼叶与鸭绿江刀鲚 C 大小相似，A 左耳石的中央突比 C 大；B 和 C 翼叶相似，B 比 C 的基叶略大。太湖湖鲚 D 与其余四者相比，耳石的翼叶明显较小，而 E 的基叶明显较大。

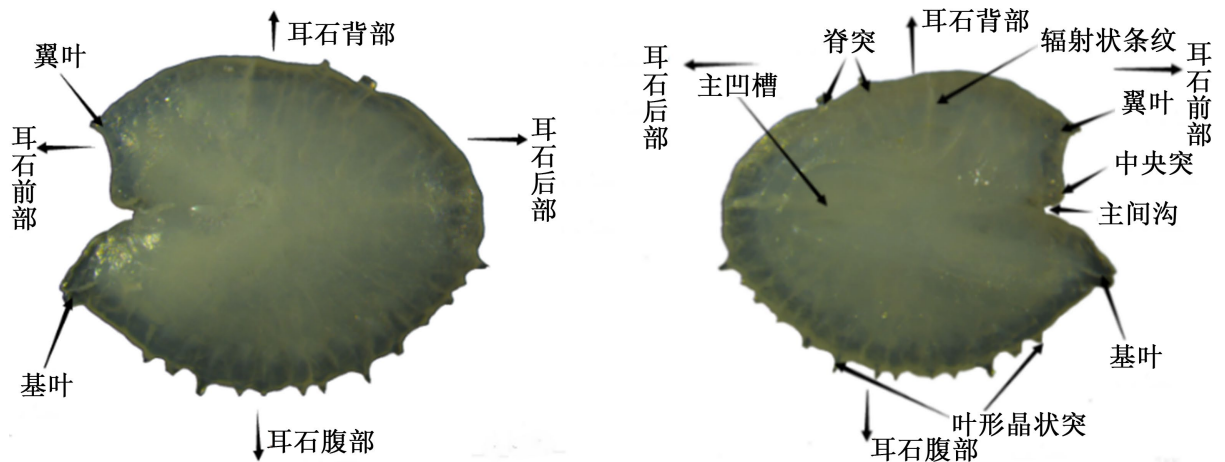


Figure 1. The lateral (left) and mesial (right) surface of left otolith of *Coilia ectenes*

图 1. 刀鲚左耳石外侧面(左)和内侧面(右)的形态示意图

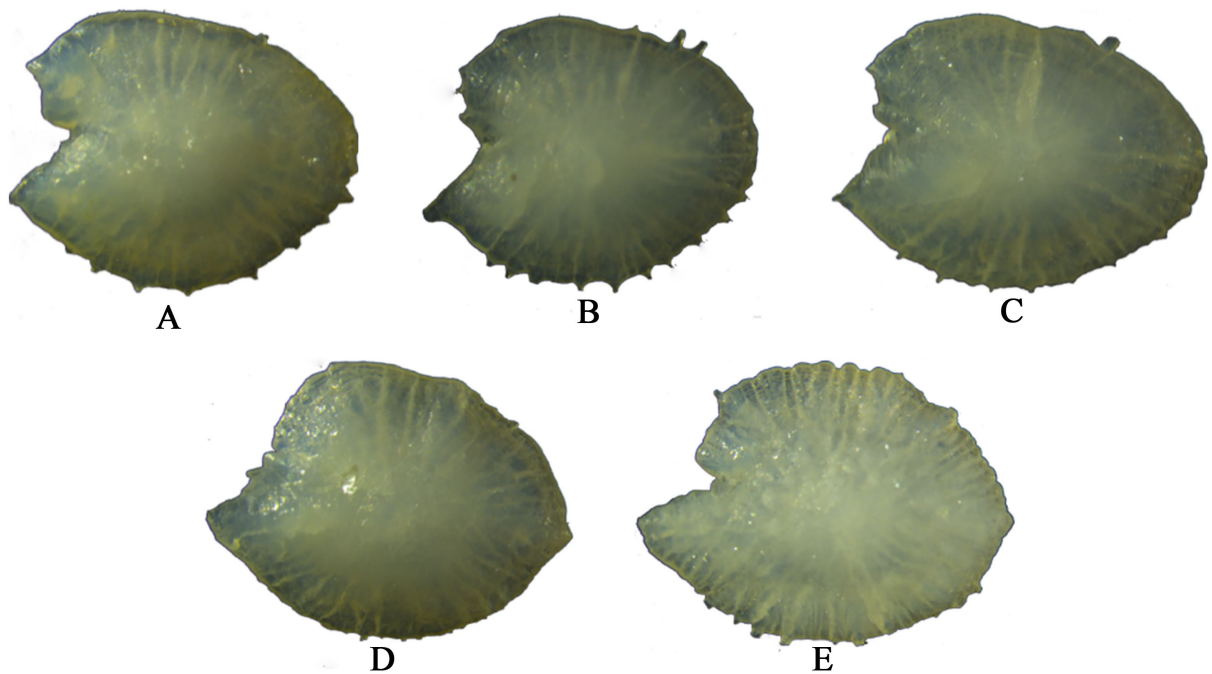


Figure 2. The graphic of left otolith of *Coilia ectenes*, *Coilia nasus taihuensis* and *Coilia brachygnathus*

图 2. 刀鲚、湖鲚和短颌鲚左耳石形态示意图

3.2. 体长与耳石形态参数的关系

三种鲚属鱼类的体长与耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和耳石密度之间的关系，见图 3。

我们将辽河刀鲚的耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长以及耳石密度与体长的数据分别进行拟合分析，得出辽河刀鲚的耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和密度均与体长呈正相关关系，其中耳石的面积($R^2 = 6404$)与体长的正相关关系最为显著，耳石长($R^2 = 0.6392$)、耳石重($R^2 = 6271$)、耳石密度($R^2 = 5952$)和耳石宽($R^2 = 5887$)与体长的关系较为显著，耳石周长($R^2 = 0.4252$)与体长的正相关关系最不显著。

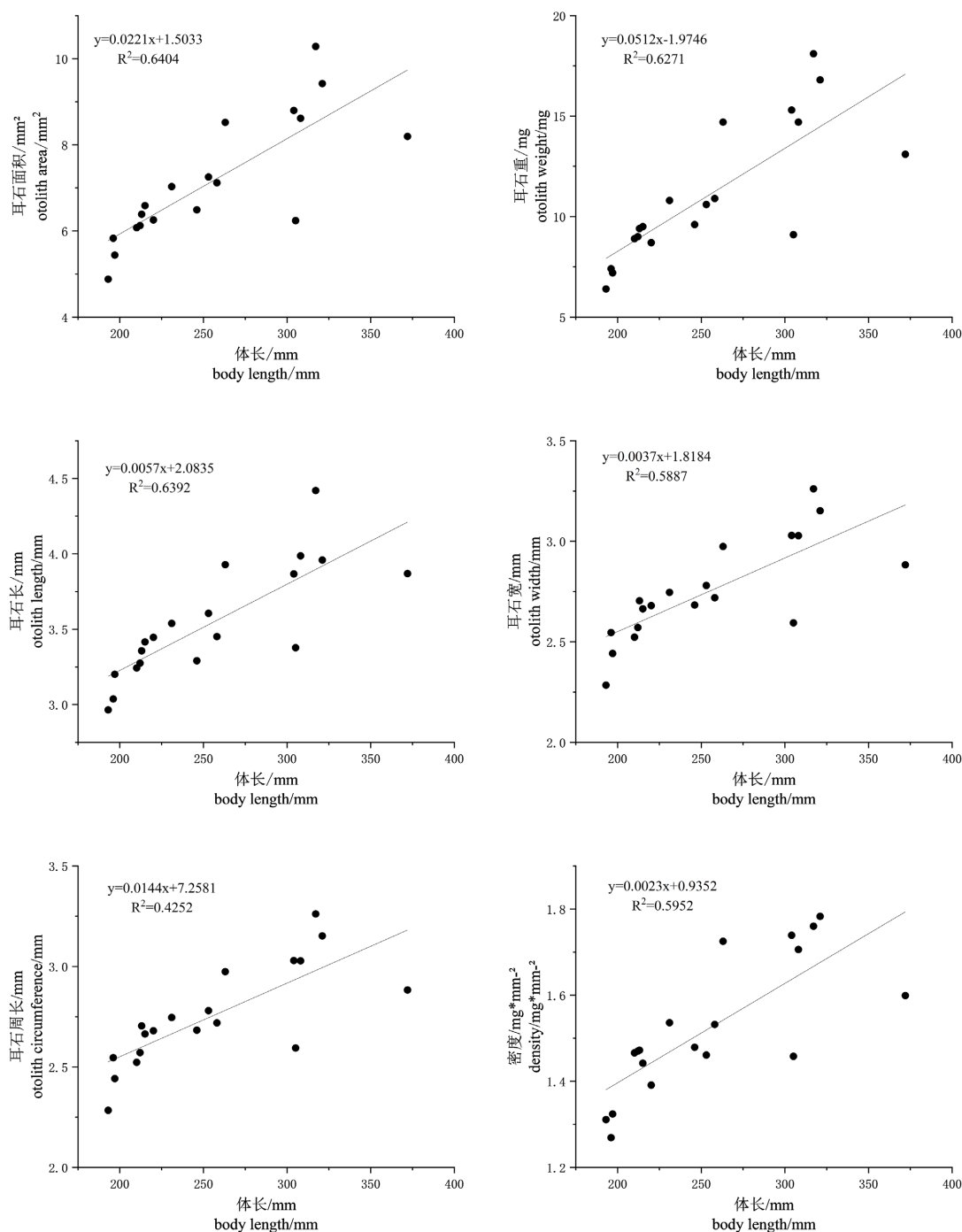


Figure 3. Relationship between body length and otolith area, otolith weight, otolith length, otolith width, otolith circumference and density of Liaohe *Coilia ectenes*

图 3. 辽河刀鲚体长与耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和耳石密度的关系

对比分析大洋河刀鲚的形态数据(图 4), 大洋河刀鲚的耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和密度均与体长呈正相关关系, 其中耳石面积($R^2 = 0.9236$)、耳石重($R^2 = 0.9233$)与体长的正相关关系最为显著, 耳石宽($R^2 = 0.8998$)、耳石长($R^2 = 0.8170$)和耳石密度($R^2 = 0.7924$)与体长的正相关关系较为显著, 耳石周长($R^2 = 0.7242$)与体长的正相关关系最不显著。

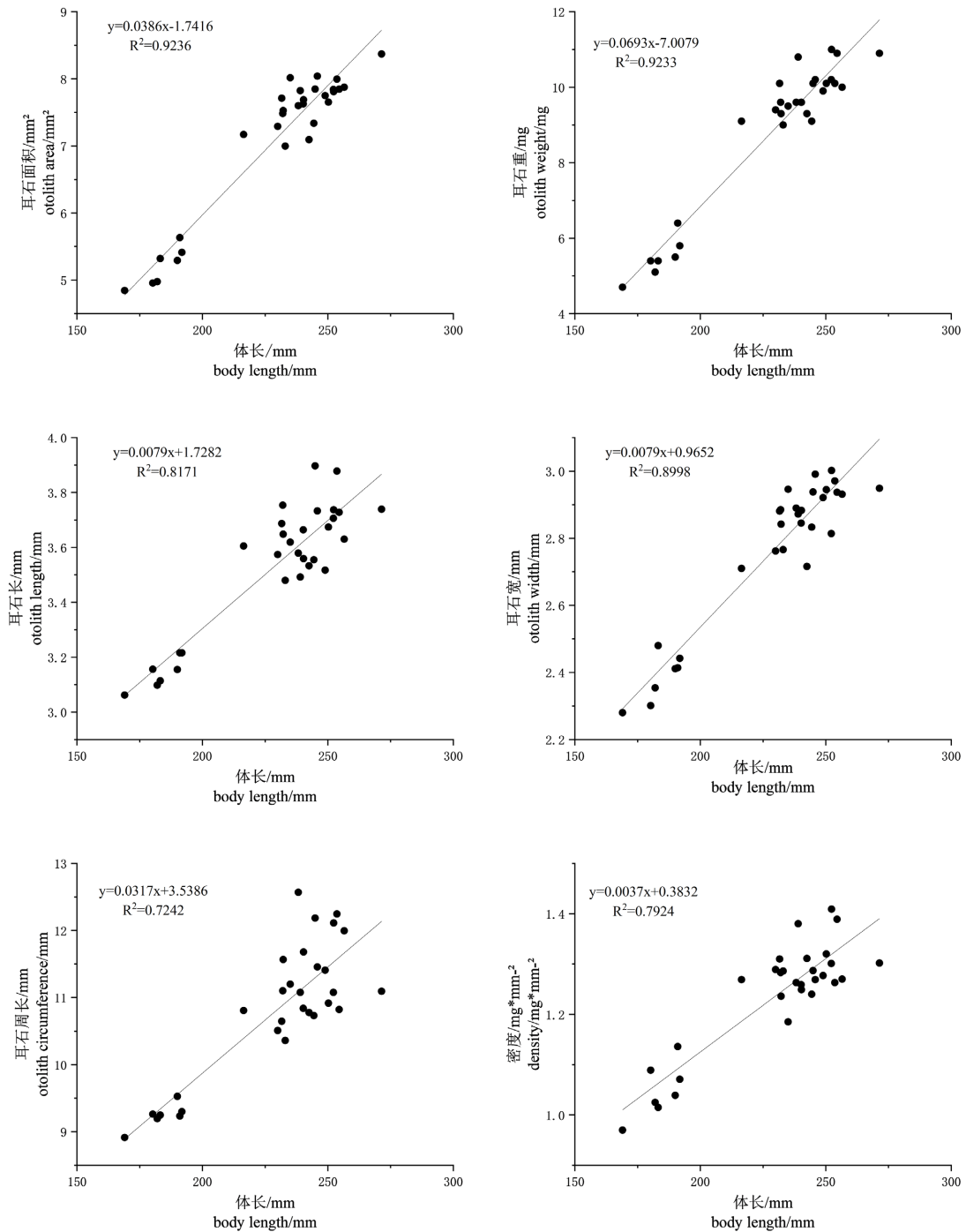


Figure 4. Relationship between body length and otolith area, otolith weight, otolith length, otolith width, otolith circumference and density of Dayanghe *Coilia ectenes*

图 4. 大洋河刀鲚体长与耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和耳石密度的关系

由图 5 可知, 鸭绿江刀鲚的耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和密度均与体长呈正相关关系, 其中耳石重($R^2 = 0.5564$)与体长的正相关关系最为显著, 耳石宽($R^2 = 0.5307$)、耳石面积($R^2 = 0.5284$)、耳石长($R^2 = 0.3933$)和耳石周长($R^2 = 0.4785$)与体长的正相关关系较显著, 耳石密度($R^2 = 0.0225$)与体长的正相关关系最不显著。

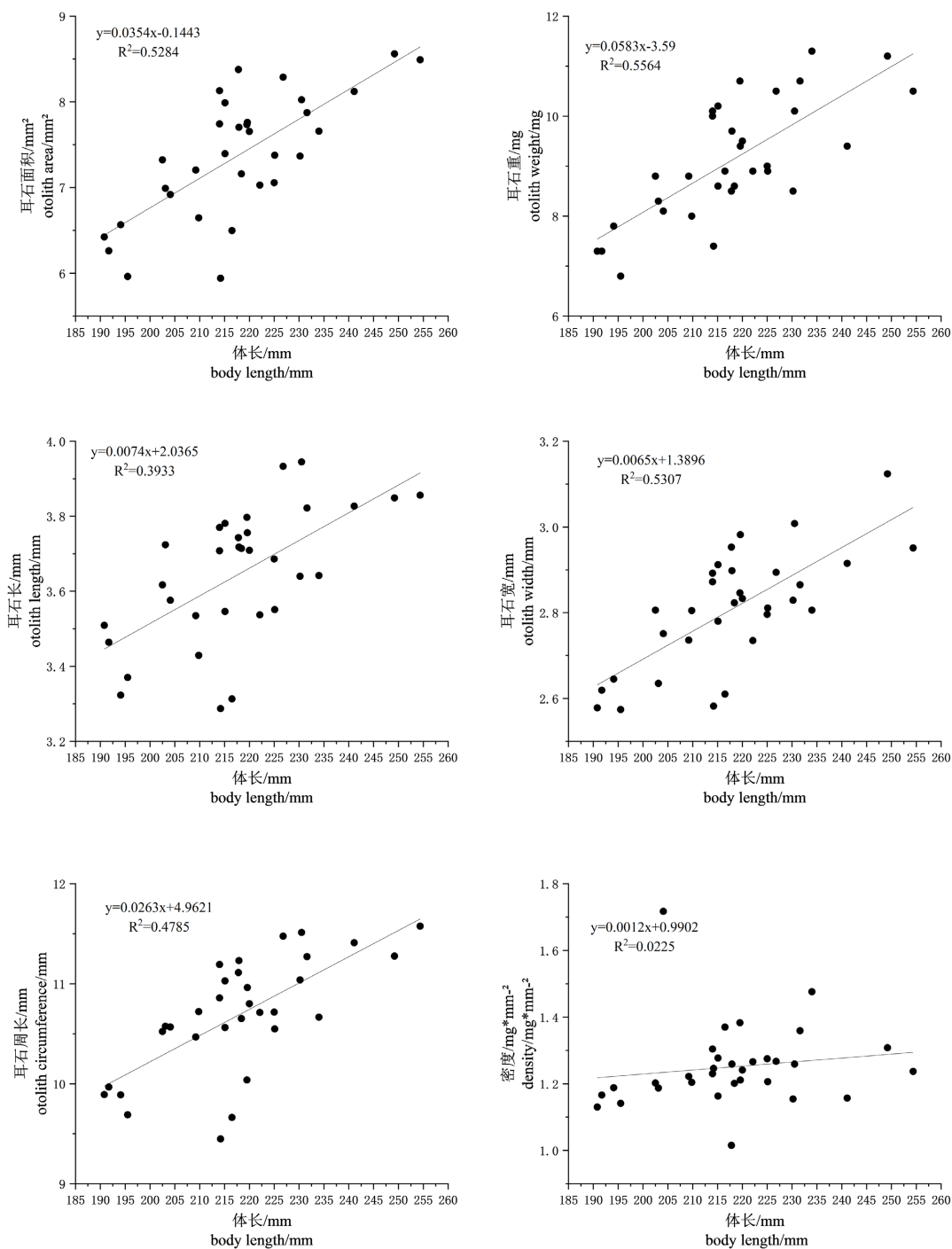


Figure 5. Relationship between body length and otolith area, otolith weight, otolith length, otolith width, otolith circumference and density of Yalu River *Coilia ectenes*

图 5. 鸭绿江刀鲚体长与耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和密度的关系

如图 6 所示,太湖湖鲚的耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和密度与其体长呈正相关关系,其中耳石面积($R^2 = 0.8651$)、耳石重($R^2 = 0.8317$)与体长的正相关关系最显著,耳石宽($R^2 = 0.7904$)、耳石长($R^2 = 0.7497$)、耳石周长($R^2 = 0.6415$)与体长的正相关关系较显著,耳石密度($R^2 = 0.4256$)与体长的正相关关系最不显著。

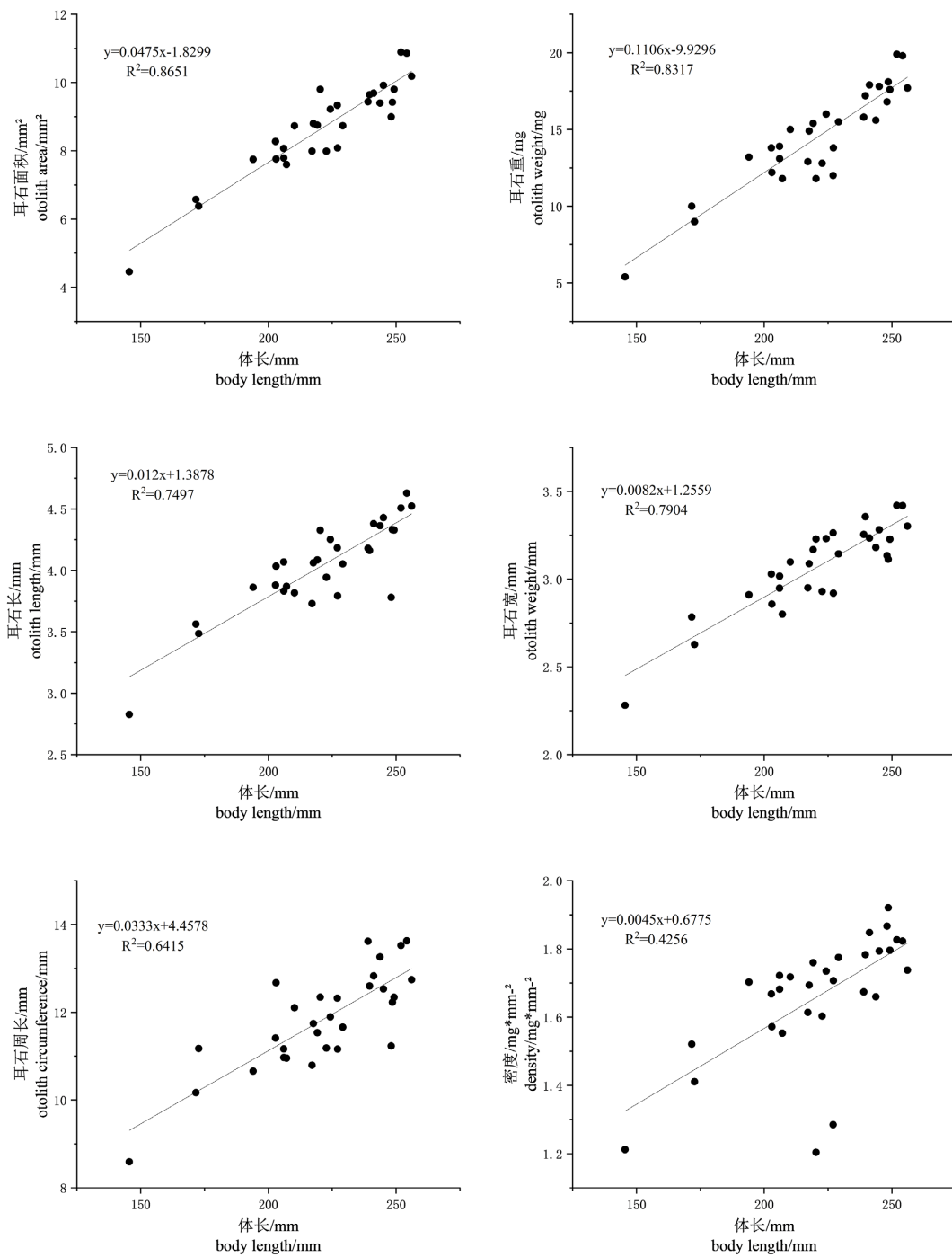


Figure 6. Relationship between body length and otolith area, otolith weight, otolith length, otolith width, otolith circumference and density of *Coilia nasus taihuensis*

图 6. 太湖湖鲢体长与耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和密度的关系

经过判别分析得出鄱阳湖短颌鲚的耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和密度与体长也呈正相关关系(图 7), 其中耳石重($R^2 = 0.7257$)、耳石面积($R^2 = 0.7211$)与体长的正相关关系最显著, 耳石宽($R^2 = 0.6626$)、耳石周长($R^2 = 0.5337$)、耳石长($R^2 = 0.4107$)与体长的正相关关系较显著, 耳石密度($R^2 = 0.0062$)与体长的正相关关系最不显著。

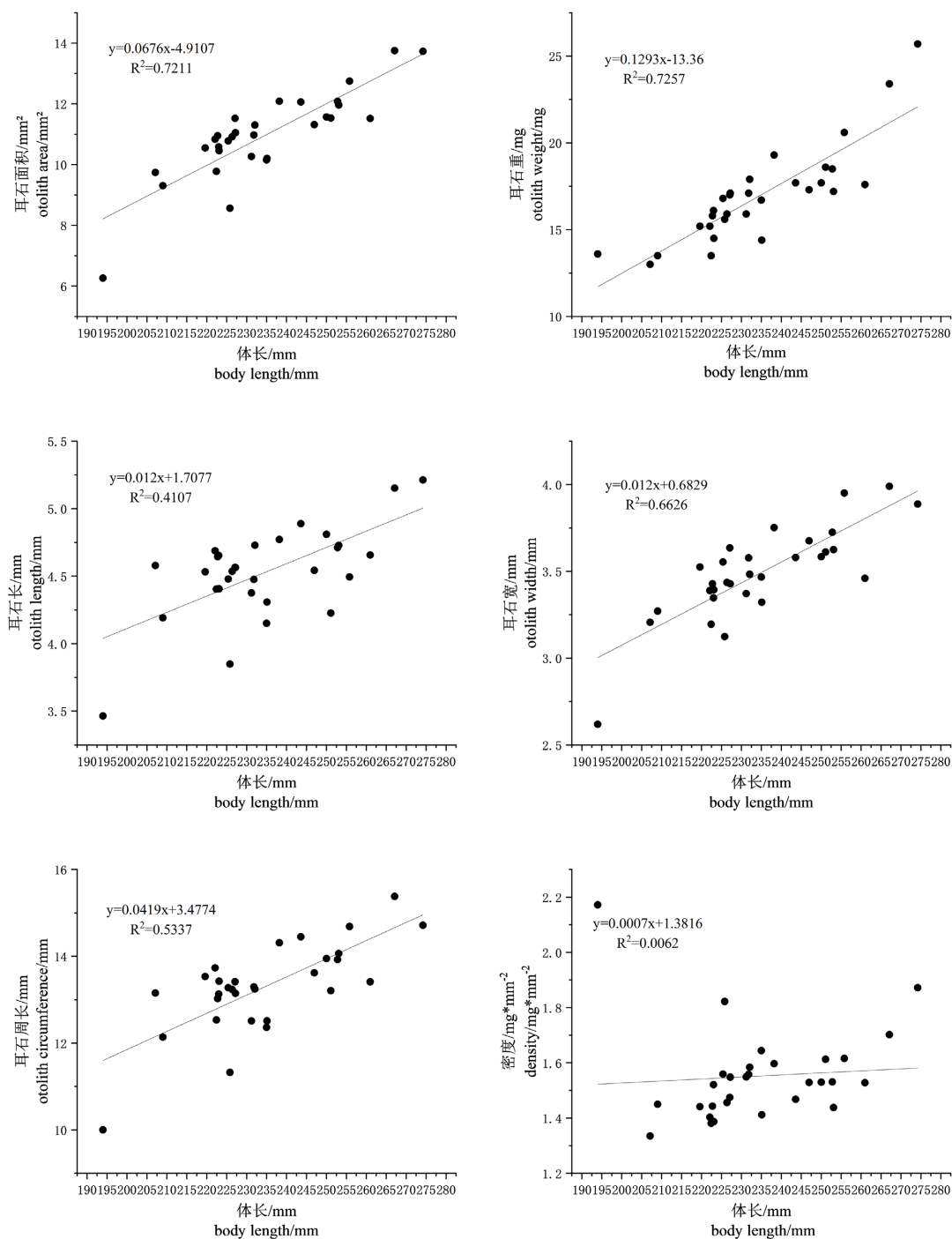


Figure 7. Relationship between body length and otolith area, otolith weight, otolith length, otolith width, otolith circumference and density of Poyang Lake *Coilia brachygnathus*

图 7. 鄱阳湖短颌鲚体长耳石面积、耳石重、耳石长、耳石宽、耳石周长和密度的关系

通过以上五个方面与体长分别对比分析的结果得出：五种鱼的耳石形态参数均与体长呈明显的正相关关系，其中以耳石重为首，耳石面积和耳石周长与体长的正相关关系最为显著，耳石密度与体长的相关性关系不显著。故采用体长对部分耳石参数进行标准化处理，消除鱼体个体差异对实验结果造成的影响。

3.3. 耳石形态指标主成分分析

对部分耳石参数进行主成分分析, 结果见表 3 和图 8。

Table 3. First three principal components and cumulative rate of correlated matrix for eight characters

表 3. 前三个主成分的贡献率和 8 个形态指标的负荷量

性状 Character	主成分 1 负荷量 Magnitude of load on principal component 1	主成分 2 负荷量 Magnitude of load on principal component 2	主成分 3 负荷量 Magnitude of load on principal component 3
耳石面积/体长 Otolith area/body length	0.919	0.167	-0.106
耳石重/体长 Otolith weight/body length	0.830	0.530	0.128
耳石长/体长 Otolith length/body length	0.937	-0.218	-0.180
耳石宽/体长 Otolith width/body length	0.919	-0.184	-0.261
耳石周长/体长 Otolith circumference/body length	0.915	-0.333	0.028
矩形趋近率 Rectangular approach rate	-0.678	0.306	-0.230
充实度 Fullness	0.079	-0.410	0.877
密度 Density	0.400	0.810	0.372
特征值 Eigenvalue	4.718	1.420	1.090
贡献率(%) Contribution rate	58.976	17.746	13.623
累积贡献率(%) Cumulative contribution rate	58.976	76.722	90.346

由表 3 可知, 这三个主成分的累积贡献率达到了 90.35%, 其中主成分一的贡献率最高, 为 58.98%, 另外两个主成分的贡献率分别为 17.75%和 13.62%。在主成分一中, 耳石面积/体长、耳石重/体长、耳石长/体长、耳石宽/体长和耳石周长/体长的负荷量均较高, 分别为 0.919、0.830、0.937、0.919 和 0.915。该研究表明, 这一主成分主要反映的是耳石面积、重量、圆度和边缘轮廓的大小; 在主成分二中, 耳石重/体长和密度的负荷量明显较大, 分别为 0.810 和 0.530, 说明这一主成分主要反映的是耳石单位重; 在主成分三中充实度的负荷量最大为 0.877, 其余的均较小, 说明该主成分主要反映的是耳石周长的平方与面积间的比例。由此可知, 这五种鱼耳石形态的差异主要受面积、重量、周长和体轴长宽的影响。

3.4. 刀鲚和湖鲚存在种与亚种的关系

通过对耳石部分参数进行差异系数检验来研究刀鲚与湖鲚之间的关系, 结果见下表 4。

Table 4. Coefficients of *Coilia nasus* and *Coilia nasus taihuensis*
表 4. 刀鲚与湖鲚的差异系数检验

刀鲚与湖鲚 <i>Coilia nasus</i> and <i>Coilia nasus taihuensis</i>	耳石面积 Otolith area	耳石重 Otolith weight	耳石长 Otolith length	耳石宽 Otolith width	耳石周长 Otolith circumfer- ence
差异系数 Coefficients	0.55	0.53	0.43	0.58	0.41

3.5. 耳石形态判别分析

通过 SPSS19.0 对五种群体中每个个体进行耳石形态判别分析并建立 Fisher 判别函数，结果见表 5。

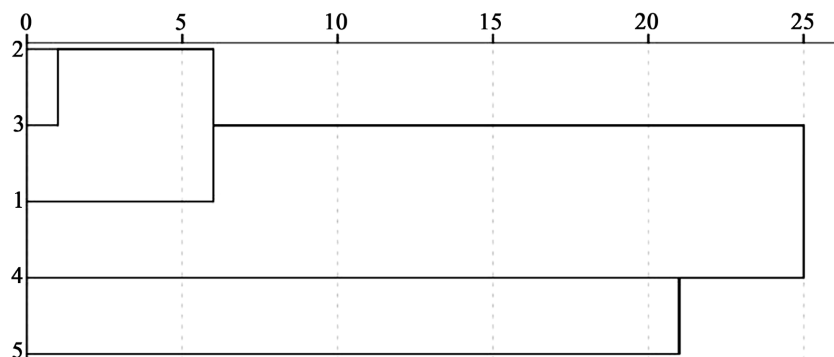
Table 5. The morphology discrimination analysis results of otolith
表 5. 耳石形态判别分析结果

		判别种类 Discriminant species					
	实际种类 Actual type	总计 Total	辽河刀鲚 Liaohe <i>Coilia</i> <i>ectenes</i>	大洋河刀鲚 Dayanghe <i>Coilia ectenes</i>	鸭绿江刀鲚 Yalu River <i>Coilia ectenes</i>	太湖湖鲚 <i>Coilia nasus tai-</i> <i>huensis</i>	鄱阳湖短颌鲚 <i>Coilia brachyg-</i> <i>nathus</i>
初始判别结果(尾) % Initial discriminant result (tail) %	辽河刀鲚	19	17	1	1	0	0
	大洋河刀鲚	30	0	26	4	0	0
	鸭绿江刀鲚	32	0	5	27	0	0
	太湖湖鲚	30	0	0	2	27	1
	鄱阳湖短颌鲚	30	0	0	0	2	28
	辽河刀鲚	100	89.5	5.3	5.3	0	0
	大洋河刀鲚	100	0	86.7	13.3	0	0
	鸭绿江刀鲚	100	0	15.6	84.4	0	0
	太湖湖鲚	100	0	0	6.7	90.0	3.3
	鄱阳湖短颌鲚	100	0	0	0	6.7	93.3
交叉验证结果(尾) % Cross validation result (tail) %	辽河刀鲚	19	16	2	1	0	0
	大洋河刀鲚	30	0	26	4	0	0
	鸭绿江刀鲚	32	0	7	25	0	0
	太湖湖鲚	30	0	0	2	27	1
	鄱阳湖短颌鲚	30	0	0	0	2	28
	辽河刀鲚	100	84.2	10.5	5.3	0	0
	大洋河刀鲚	100	0	86.7	13.3	0	0
	鸭绿江刀鲚	100	0	21.9	78.1	0	0
	太湖湖鲚	100	0	0	6.7	90.0	3.3
	鄱阳湖短颌鲚	100	0	0	0	6.7	93.3

由表 5 可知辽河刀鲚的 19 个个体中有 2 个分别被判别为大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚，其判别准确率为 89.5%；大洋河刀鲚的 30 个个体中有 4 个被判别为鸭绿江刀鲚，其判别准确率为 86.7%；鸭绿江刀鲚的 32 个个体中有 5 个被判别为大洋河刀鲚，其判别准确率为 84.4%；太湖湖鲚的 30 个个体中有 2 个被判别为大洋河刀鲚，1 个被判别为鄱阳湖短颌鲚，其判别准确率为 90.0%，鄱阳湖短颌鲚的 30 个个体中有 2 个被判别为太湖湖鲚，其判别准确率为 93.3%。

3.6. 利用短距离法聚类分析湖鲚、短颌鲚和三种刀鲚的关系

上文通过散点图对五种群体进行简单分析，接下来将采用聚类分析对五种群体耳石形态进一步分析(图8)。



注：1、2、3、4、和5分别对应辽河刀鲚、大洋河刀鲚、鸭绿江刀鲚、太湖湖鲚和鄱阳湖短颌鲚。

Figure 8. Cluster analysis results of otolith morphology of *Coilia nasus*, *Coilia nasus taihuensis* and *Coilia brachygnathus*
图8. 刀鲚、湖鲚和短颌鲚耳石形态的聚类分析结果

由图可知太湖刀鲚和鄱阳湖短颌鲚与辽河刀鲚、大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚的差异性最显著；辽河刀鲚与大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚差异不明显，大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚通过此方法无法进行区分；太湖刀鲚与鄱阳湖短颌鲚的差异性要小于辽河刀鲚、大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚。

4. 讨论

4.1. 刀鲚、湖鲚和短颌鲚耳石形态结构的差异性分析

本研究结果显示，三种刀鲚的耳石形态结构存在明显的差异，刀鲚、湖鲚和短颌鲚的耳石形态结构亦存在明显的差异。短颌鲚与湖鲚分别为刀鲚的2个不同生态型群体，湖鲚与短颌鲚都属于淡水定居生态型，具有类似的形态和生态特征，并且在太湖中处于陆封状态，在产卵时间、产卵场所都具有较大重叠[17]。而由于耳石形态结构大小受鱼类年龄、体型、以及地理生活环境等的影响，所以耳石形态结构的差异不能用来鉴定五种群体种内和种间的关系。

4.2. 刀鲚和湖鲚的关系

基于之前众多学者从形态学和遗传角度的角度分析，认为刀鲚与湖鲚之间的差异未达到亚种水平[18][19]。对刀鲚和湖鲚耳石进行主成分分析，判别分析和差异系数检验的结果可知，刀鲚和湖鲚同一耳石形态参数的差异系数均小于1.28，耳石形态参数对刀鲚和湖鲚的判别准确率分别为86.9%和90%，说明二者只在耳石形态上存在显著性差异，不存在种和亚种的区别，是种间关系。比较与刀鲚形态，其相似点在于腹部性状较近，其差异在于刀鲚洄游群体间两叶种间呈三角状，中央沟较明显，有的样品具有中央突，后端较尖。研究结果表明刀鲚和湖鲚差异明显，其耳石形态不存在介于两者之间的误判点[20]。造成二者耳石形态显著性差异的原因主要是，它们的生活环境和生活习性不同，湖鲚终生生活在湖泊的淡水中，刀鲚一般生活在近海的河流中，繁殖季节洄游至河流中上游进行产卵。

4.3. 刀鲚、湖鲚和短颌鲚耳石形态判别分析

本次研究以建立的判别函数对三种刀鲚、湖鲚和短颌鲚进行判别归类可知，耳石形态测量法对辽河

刀鲚总体判别准确率为 89.5%，交叉验证为 84.2%；对大洋河刀鲚的总体判别准确率为 86.7%，交叉验证为 86.7%；对鸭绿江刀鲚的总体判别准确率为 84.4%，交叉验证相对较小为 78.1%；对太湖湖鲚的总体判别准确率和交叉验证均为 90.0%；对鄱阳湖短颌鲚的总体判别准确率和交叉验证最高均为 93.3%。说明利用耳石形态测量法对这 5 个鱼类群体进行区分归类的可行性较高，故可以用此方法对三种鲚属鱼类进行初步鉴定和归类。

4.4. 三种刀鲚、湖鲚和短颌鲚耳石的差异及原因

通过以上种种分析可知，三种刀鲚中的大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚暂时无法详细区分，但二者与辽河刀鲚的差异性相对较显著；太湖湖鲚和鄱阳湖短颌鲚与三种刀鲚存在明显的差异性，其中太湖湖鲚和鄱阳湖短颌鲚差异性相对不显著。造成这几种鱼类群体差异性的原因有很多种，其中生活习性为最主要的原因。湖鲚与短颌鲚之间较高的遗传分化显示它们之间的基因交流程度很低。这似乎显示了湖鲚与短颌鲚之间存在生殖隔离，正是这种生殖隔离机制阻止了湖鲚与短颌鲚之间自由交配，维持了形态与谱系之间的对应关系。而对于这种生殖隔离的程度与机制，目前的数据还不能精确得出结论，尚需进一步的研究核基因及其生态特征以获得更多的信息[21]。刀鲚喜欢生活在近海的河流中，大洋河和鸭绿江均有水系流入黄海，辽河主要流入渤海，说明大洋河刀鲚和鸭绿江刀鲚的生活区域较近，距离辽河刀鲚的生活区域较远，故前二者与后者之间存在较明显的差异性。除去生理上的习性变化所带来的影响，耳石也很大可能会受到盐度的变化影响。太湖湖鲚与鄱阳湖短颌鲚生活习性较相似，大多生活于淡水，属定居型鱼类，故二者差异性不显著。

4.5. 耳石形态测量法的意义和局限性

耳石形态测量法是一种比较直观，简单，易懂的耳石观测方法，利用它对鱼类耳石形态进行差异性分析，可以实现对鱼类的鉴定和归类。但这种方法亦存在局限性，其在鱼类种间耳石形态差异性比较显著，具有可行性，在同种的鱼类间耳石形态差异性不显著，不能有效地进行分析鉴定。

基金项目

兴辽英才计划项目(XLYC1807014)。

参考文献

- [1] Whitehead, P.J.P. and FIR. (1985) FAO Species Catalogue: Vol 7 Clupeoid Fishes of the World (Suborder Clupeoidei), An Annotated and Illustrated Catalogue of the Herrings, Sardines, Pilchards, Sprats, Shads, Anchovies and Wolf-Herring: Part 2 Engraulidae.
- [2] Pannella, G. (1971) Fish Otoliths: Daily Growth Layers and Periodical Patterns. *Science*, **173**, 1124-1127. <https://doi.org/10.1126/science.173.4002.1124>
- [3] 姜涛, 杨健, 刘洪波, 等. 刀鲚、凤鲚和湖鲚矢耳石的形态学比较研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(3): 23-31.
- [4] 中国科学院中国动物志委员会. 中国动物志: 硬骨鱼纲, 鲱形目, 海鲱目, 鲱形目, 鼠鲱目[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] 朱元鼎, 罗云林, 伍汉霖. 中国鱼类专著集: 中国石首鱼类分类系统的研究和新属新种的叙述[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1963.
- [6] 张国华, 但胜国, 苗志国, 等. 六种鲤科鱼类耳石形态以及在种类和群体识别中的应用[J]. 水生生物学报, 1999, 23(6): 683-688.
- [7] 郭弘艺, 唐文乔, 魏凯, 等. 中国鲚属鱼类的矢耳石形态特征[C]//中国动物学会. 中国海洋湖沼动物学会鱼类学分会第七届会员代表大会暨朱元鼎教授诞辰 110 周年庆学术研讨会学术论文摘要集. 上海: 上海水产大学鱼类研究室, 2006: 32.
- [8] 邓维德, 赵亚辉, 康斌, 等. 耳石在鱼类年龄与生长研究中的应用[J]. 动物学杂志, 2010, 45(2): 171-180.

- [9] 胡永斌. 长江口凤鲚和刀鲚年龄结构与生长特征的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [10] Begg, G., Overholtz, W. and Munroe, N.J.F.B. (2001) The Use of Internal Otolith Morphometrics for Identification of Haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) Stocks on Georges Bank. *Fishery Bulletin*, **99**, 1-14.
- [11] Castonguay, M., Simard, P. and Gagnon, P. (1991) Usefulness of Fourier Analysis of Otolith Shape for Atlantic Mackerel (*Scomber scombrus*) Stock Discrimination. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **48**, 296-302. <https://doi.org/10.1139/f91-041>
- [12] Smith, M.K. (1992) Regional Differences in Otolith Morphology of the Deep Slope Red Snapper *Etelis carbunculus*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **49**, 795-804. <https://doi.org/10.1139/f92-090>
- [13] Campana, S. (2004) Photographic Atlas of Fish Otoliths of the Northwest Atlantic Ocean. National Research.
- [14] Campana, S.E. and Casselman, J.M. (1993) Stock Discrimination Using Otolith Shape Analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **50**, 1062-1083. <https://doi.org/10.1139/f93-123>
- [15] 罗斯纳, 著. 生物统计学基础[M]. 孙尚拱, 译. 北京: 科学出版社, 2004: 16-19.
- [16] 郑文莲. 我国鲈科等鱼类耳石形态的比较研究[C]//中国鱼类学会. 鱼类学论文集(第二辑). 北京: 科学出版社, 1981: 39-54.
- [17] 袁传宓, 秦安龄, 刘仁华, 等. 关于长江中下游及东南沿海各省的鲚属鱼类种下分类的探讨[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1980(3): 67-82.
- [18] 刘文斌. 中国鲚属 4 种鱼的生化和形态比较及其系统发育的研究[J]. 海洋与湖沼, 1995(5): 558-565.
- [19] Cheng, Q. and Lu, D. (2005) PCR-RFLP Analysis of Cytochrome B Gene Does Not Support *Coilia ectenes taihuensis* Being a Subspecies of *Coilia ectenes*. *Journal of Genetics*, **84**, 307-310. <https://doi.org/10.1007/bf02715801>
- [20] 姜涛, 刘洪波, 天野洋典, 等. 长江及周边海域刀鲚群体耳石核心元素微化学特征[C]//中国水产学会渔业资源与环境分会. 中国水产学会渔业资源与环境分会 2013 年学术交流会会议论文(摘要)集. 2013: 86-87.
- [21] 轩中亚, 姜涛, 刘洪波, 等. 基于线粒体 Cyt-b 序列的太湖湖鲚与短颌鲚种群遗传分析[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(4): 33-40.