

基于耳石几何形态测量学的长江安徽江段刀鲚群体识别研究

许颖 姜涛 刘洪波 陈修报 杨健

POPULATION IDENTIFICATION FOR *COILIA NASUS* IN ANHUI SECTION OF THE CHANGJIANG RIVER
BASED ON OTOLITH GEOMETRIC MORPHOMETRIC ANALYSIS

XU Ying, JIANG Tao, LIU Hong-Bo, CHEN Xiu-Bao, YANG Jian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0437>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于耳石微化学的长江安徽和县江段刀鲚生境履历重建

RECONSTRUCTING HABITAT HISTORY OF *COILIA NASUS* FROM THE HEXIAN SECTION OF THE YANGTZE RIVER IN ANHUI PROVINCE BY OTOLITH MICROCHEMISTRY

水生生物学报. 2017, 41(5): 1054–1061 <https://doi.org/10.7541/2017.132>

洞庭湖中是否存在溯河洄游型刀鲚

ARE THERE STILL ANADROMOUS THE ESTUARINE TAPERTAIL ANCHOVIES *COILIA NASUS* IN DONGTING LAKE?

水生生物学报. 2020, 44(4): 838–843 <https://doi.org/10.7541/2020.100>

阳澄湖原产及“洗澡”中华绒螯蟹背甲的几何形态分析

GEOMETRIC MORPHOMETRIC ANALYSIS ON THE CARAPACE DIFFERENCE BETWEEN “BATHED” AND YANGCHENG LAKE ORIGINATED *ERIOCHEIR SINENSIS*

水生生物学报. 2020, 44(3): 587–594 <https://doi.org/10.7541/2020.072>

不同水深养殖栉孔扇贝的形态测量学研究和比较

MORPHOMETRIC STUDY AND COMPARISON OF SCALLOPS (*CHLAMYS FARRERI*) CULTURED IN DIFFERENT WATER DEPTH

水生生物学报. 2021, 45(1): 132–139 <https://doi.org/10.7541/2021.2019.215>

刀鲚肌间骨新类型的发现

THE IDENTIFICATION OF NEW TYPES OF INTERMUSCULAR BONES IN *COILIA NASUS*

水生生物学报. 2020, 44(1): 104–111 <https://doi.org/10.7541/2020.013>

刀鲚嗅觉受体基因 *MOR-51I2* 克隆、序列分析及组织表达

CLONING, SEQUENCE ANALYSIS AND TISSUES EXPRESSION OF *COILIA NASUS* OLFACTORY RECEPTOR GENE *MOR-51I2*

水生生物学报. 2017, 41(1): 33–42 <https://doi.org/10.7541/2017.5>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2022.0437

基于耳石几何形态测量学的长江安徽江段刀鲚群体识别研究

许颖¹ 姜涛² 刘洪波² 陈修报² 杨健^{1,2}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 无锡 214081; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心渔业微化学实验室, 无锡 214081)

摘要: 为了解长江安徽江段刀鲚耳石的形态特征和尝试识别不同群体, 研究选用基于地标点的几何形态测量学手段, 对不同年份采于长江安徽安庆、铜陵江段长颌鲚和短颌鲚2种生态表型的5个群体刀鲚矢耳石形态差异性进行了比较研究。基于12个地标点, 将其坐标进行相对扭曲主成分分析及判别分析, 经薄板样条分析和网格变形, 使其耳石形态变异矢量可视化。结果显示, 在相对扭曲主成分分析中, 提取的地标点中多为Ⅱ类地标点, 其贡献率为69.48%, 说明Ⅱ类地标点是耳石形态差异的主要来源。5个群体刀鲚判别分析的综合判别准确率为95.6%, 表明这些刀鲚群体耳石形态的差异总体显著。这种差异显著性尤其存在于长颌鲚与短颌鲚生态表型间及长颌鲚和短颌鲚不同群体间, 显示出刀鲚不同生态表型分化及其群体间差异性已可体现在耳石的形态特征上。上述发现可为长江十年禁渔前后安徽江段刀鲚群体组成和群体差异性的客观评价提供理论支撑。

关键词: 耳石; 地标点; 几何形态测量学分析; 群体; 长江安徽江段; 刀鲚

中图分类号: S932.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)09-1497-09



刀鲚(*Coilia nasus*), 隶属于鲱形目、鲱科、鲱属。长江刀鲚群体主要分为溯河洄游和淡水定居型长颌鲚及短颌鲚(曾被命名为*Coilia brachygnathus*)5种生态表型^[1]。长江安徽江段是刀鲚的主要分布地区之一, 同时该江段也是刀鲚从长江口开始上溯至鄱阳湖的必经江段, 所以该江段被认为是刀鲚的重要洄游通道^[2]。但由于酷渔滥捕、生态环境被破坏及洄游通道受阻等原因^[3], 刀鲚目前被认为只能从河口洄游至安徽江段, 现已无法上溯进入鄱阳湖。因此对长江安徽江段刀鲚研究的重要性不言而喻。耳石是真骨鱼类内耳中的一种钙质组织, 其随鱼体共同生长, 由于其形态结构相对稳定, 并且具有种的特征, 所以被广泛应用于物种鉴定^[4, 5]、摄食习性^[6]、群体区分^[7, 8]和栖息环境^[9, 10]等方面的研究中。而目前为止有关长江安徽江段刀鲚的研究主要集中在耳石微化学方面, 如李孟孟等^[11, 12]利用X射线电子探针微区分析技术对长江安徽和县江段的长颌鲚和短颌鲚生态表型及安庆江段的长颌鲚进行了耳石微化学研究。其结果表明安徽江段

的长颌鲚个体均具典型的溯河洄游习性, 但短颌鲚不仅有纯淡水生境履历, 还有江海生活的生境履历。最新基于耳石微化学和遗传学的研究甚至认为, 长颌鲚和短颌鲚应该为鲱属鱼类中两个独立的物种^[13]。值得注意的是, 耳石微化学研究过程前处理较复杂, 耗时较长, 这给评价安徽江段刀鲚群体组成(即单一或复合群体及其识别)和群体关系(即关联性: 不同群体间在空间或/和时间上的依赖和关联程度^[14])增加了难度。耳石形态学可以为解决这一难题提供快速有效的研究方法。

目前, 耳石形态学主要依据形态框架测量法和几何形态测量法来开展, 但前者研究实例较多。叶振江等^[15]对4个花鲈(*Lateolabrax sp.*)群体耳石的形态的研究发现, 花鲈耳石形态在不同地理群体具有明显的变异特征; 潘晓哲等^[16]对鳊属(*Sillago*)鱼类矢耳石研究发现, 形状指标测量可以有效鉴定同属的3个不同种。形态框架测量法主要依靠耳石形态分析的距离长度度量信息来了解耳石形态的变化^[17], 但当耳石形态发生变化而导致形态变化差异时, 此

收稿日期: 2022-10-26; 修订日期: 2023-02-07

基金项目: 农业农村部财政专项(CJDC-2017-22); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2021JBFM14)资助 [Supported by the Agricultural Finance Special Project (CJDC-2017-22); Central Public-Interest Scientific Institution Based Research Fund (2021JBFM14)]

作者简介: 许颖(1998—), 女, 硕士研究生; 主要从事渔业生态环境保护相关研究。E-mail: 2021813043@stu.njau.edu.cn

通信作者: 杨健, E-mail: jiany@ffrc.cn

时运用传统形态测量法来分析时并不能得到很好的诠释。与之相比,几何形态测量法的数据同源性和可重复性更强^[18],提取和分析耳石形状信息的效果更好,故该法在水生动物种类鉴别和种群划分中越来越得到重视。根据研究方式的不同,将几何形态测量学又可分为椭圆傅立叶分析法和地标点法。前者主要用于研究耳石轮廓,是对耳石形态轮廓进行分析并对其进行重建^[18,19]。后者是基于笛卡儿地标的形状统计方法,对耳石形态选取有显著特征的点以此重构形态^[18]。因为地标点法不仅可以分析耳石轮廓上的特征,还可以对轮廓内部的地标点进行分析,而且种间、种内不同群体形态特征的差异变化也能通过网格图的形式直观地显示出来^[20,21],同时还能分析这些形态变化上的动态趋势^[22],故研究效果更为理想。与传统测量法和椭圆傅立叶分析法相比,地标点法区分3种半棱属(*Encrasicholina*)鱼类和印度小公鱼(*Stolephorus indicus*)耳石形态的效果更佳^[23]。形态地标点法的优势在区分鳢蟹(*Eriocheir*)^[21,24–27]和柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)/茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)^[28]群体鉴别中同样得到证实。并且相比于椭圆傅立叶分析法,地标点法更容易对数据进行采集和分析^[29],即使测定对象标本的耳石样品量不大,仍然可以明显地反映出不同群体的耳石形态的差异特征^[30,31],如前人对金线鱼属(*Nemipterus*)和白姑鱼属(*Pennahia*)^[32,33]鱼类及九龙江口、珠江口的凤鲚(*Coilia mystus*)和七丝鲚(*Coilia grayii*)^[34]矢耳石形态的相关研究等。研究还发现,基于地标点的几何形态测量学法更适合应用于对轮廓不规则及突起较多等形态差异较大的耳石或将耳石整体形态和听沟形态相结合进行分析^[32]的场合。

参考上述研究进展,本研究首次尝试采用基于地标法的几何形态测量学手段定量来分析长江十年禁渔前后安庆和铜陵江段所采不同生态表型刀鲚耳石的形态特征和差异性;在此基础上,拟较为详细地探究此江段不同水域刀鲚耳石形态的年度差异特征,开展相应的群体识别尝试,进而把握不

同年份洄游通过该江段刀鲚资源的群体规律;以期客观评价长江十年禁渔对安徽江段刀鲚群体的影响以及客观评价相关水域刀鲚群体组成和群体关联性提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验研究所用刀鲚样本分别捕获于长江安徽安庆和铜陵江段(图1)。其中安庆江段长颌鲚类型个体30尾,即分别捕获于2019年6月和2022年7月各15尾;短颌鲚类型个体15尾,捕获于2021年12月;铜陵江段长颌鲚8尾,短颌鲚15尾,分别捕获于2014年4月和2021年12月(表1)。将鱼体进行样品编号并拍照,随后测量鱼体的体重、体长和全长,上颌骨长、头长、吻端至胸鳍基部长度等基础数据,再统一摘取矢耳石后干燥待用。

1.2 实验方法

耳石处理 所有刀鲚按惯例选择左矢耳石开展研究。耳石标本先后使用去离子水和无水酒精清洗去除耳石表面的外包膜和黏液等杂质,之后,将耳石放置于48孔板中自然晾干24h。耳石晾干后拍照。将耳石以最长轴为水平方向放置于数字式

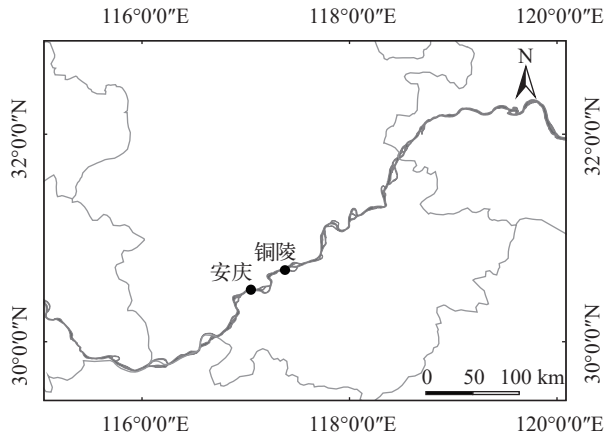


图1 长江安庆和铜陵江段刀鲚采样点
Fig. 1 Sampling sites (Anqing and Tongling sections) for *Coilia nasus* of the Changjiang River in Anhui Province

表1 本研究中长江安徽江段刀鲚的信息

Tab. 1 Information of *Coilia nasus* in Anhui section of the Changjiang River in this study

标本类型 Sample type	采样时间 Sampling time	采样地 Sampling site	样本数/尾 N	体长Body length (mm)	体重Body weight (g)	年龄范围 Age range	成熟度 Maturity
长颌鲚	2014.04	铜陵江段	8	272±17	68.6±12.2	2龄	♂Ⅲ、♀Ⅱ—Ⅲ
长颌鲚	2019.06	安庆江段	15	258±10	53.1±5.9	2龄	♂/♀Ⅱ—Ⅲ
长颌鲚	2022.07	安庆江段	15	282±18	69.5±15.2	2—3龄	♂/♀Ⅲ
短颌鲚	2021.12	安庆江段	15	229±39	43.0±23.3	1—3龄	♂/♀Ⅱ
短颌鲚	2021.12	铜陵江段	15	182±38	20.7±20.2	0—3龄	♂/♀Ⅱ

自动体视显微镜 (Leica M205A, 德国徕卡公司) 下, 在相同的倍率下统一拍摄耳石的照片, 将耳石的近轴面为分析面, 并且耳石的背部朝上, 腹部朝下, 拍摄整体状态(图 2)。

地标点的建立与提取 在选择地标点时, 需要选择特征明显且容易识别的点, 在生物学中应用的地标点法主要分为3类, 其中 I 型地标点是以不同组织间交点为特征, II 型地标点是以结构中的凹陷或凸起点为特征, III型地标点是以结构的极值点, 即结构中的最长点、最宽点等作为特征^[18]。本研究利用Tpsdig 2 version 2.12 (Rohlf 2008a), 在拍好的刀鲚耳石图片上选取耳石结构中的不同部位的交点、凹陷或凸起点以及结构的极点等, 在耳石的外部轮廓上端点和主凹槽轮廓拐点处建立12个地标点(图 3)选取地标点, 并获取地标点的x、y坐标值, 并且建立坐标点数据文件。

平均形与薄板样条分析 利用Tpsmall version 1.20 (Rohlf 2003)进行最小平方准则(Least squares criterion)回归分析, 以此来检验选取的地标点的有效性^[35]。用Tpsrelw version 1.46 (Rohlf 2008b)软件经普氏叠加得到地标点, 并对每样本中的地标点进行平移置中、旋转和缩放, 由此计算出质心距离, 求出平均形(Mean shape), 据此进行局部扭曲和相对扭曲主成分分析并保存软件生成的相对扭曲得分(Relative warps scores)。利用tpsRegr version 1.36 (Rohlf 2009)进行薄板样条分析^[35], 得到各样本耳石的网格图, 并将得到的网格图与平均型进行比较, 得到它们之间的形态扭曲和变化差异^[34]。

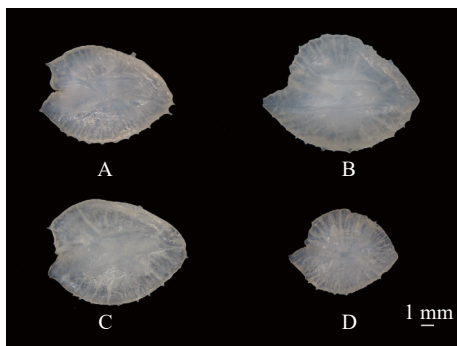


图2 长江安徽安庆、铜陵江段长颌鲚和短颌鲚类型刀鲚的耳石
Fig. 2 Otoliths of *Coilia nasus* and *Coilia brachygnathus* in Anqing and Tongling sections of the Changjiang River in Anhui Province

A. 安庆江段长颌鲚; B. 安庆江段短颌鲚; C. 铜陵江段长颌鲚; D. 铜陵江段短颌鲚

A. *Coilia nasus* in Anqing section; B. *Coilia brachygnathus* in Anqing section; C. *Coilia nasus* in Tongling section; D. *Coilia brachygnathus* in Tongling section

1.3 统计分析

利用各个样本的相对扭曲得分进行判别分析, 判别方法采用的是Bayes方法, 应用SPSS20.0进行统计分析。

2 结果

2.1 最小平方准则回归分析

最小平方准则回归分析得出本研究刀鲚耳石地标数据点的切空间距离和普氏距离的回归系数为0.995244, 表明所选取的地标点有效, 可用于下一步各个地标点的相对扭曲贡献率分析。12个地标点贡献率较大的是地标点5、6、7和8。其中地标点5贡献率为13.52%, 地标点6贡献率为15.16%, 地标点7贡献率为14.29%, 地标点8贡献率为14.76%, 累积贡献率达57.73%(表2)。

2.2 形态差异可视化

为了更好地分析不同江段刀鲚耳石的形态特征差异, 进而将其耳石的差异可视化, 利用TpsRegr软件进行平均形后, 通过绝对扭曲、回归分析和置换检验进行网格化和差异矢量化(图 4)。与网格平均形相比较, 2019年安庆长颌鲚、2022年安庆长颌

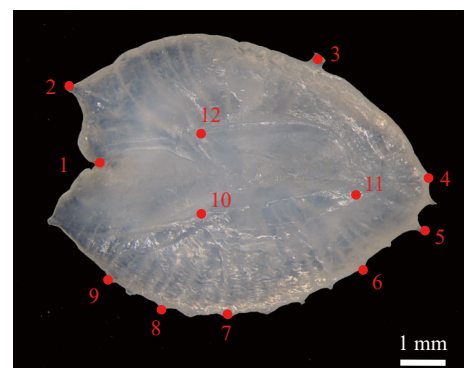


图3 刀鲚耳石地标点位置图

Fig. 3 Location of landmarks on otolith of *Coilia nasus*

1(I型). 主间沟凹点; 2(II型). 翼叶端点; 3(II型). 背缘晶状突; 4(III型). 耳石后端点; 5(II型). 耳石后端点第2三角突; 6(II型). 耳石后端点第4三角突; 7(II型). 腹缘三角突; 8(II型). 耳石前端点第3三角突; 9(II型). 耳石前端点第1三角突; 10(II型). 听沟颈端交叉点; 11(I型). 听沟后端点; 12(II型). 听沟颈端交叉点
1 (type I). concave point of main intergroove; 2 (type II). endpoint of wing lobe; 3 (type II). dorsal edge crystalline process; 4 (type III). posterior endpoint of otoliths; 5 (type II). the second trigonoid process at posterior end of otoliths; 6 (type II). the fourth trigonoid process at posterior end of otoliths; 7 (type II). ventral trigonoid process; 8 (type II). the third triangular process at the anterior end of the otolith; 9 (type II). the first triangular process at the anterior end of the otolith; 10 (type II). intersections at the neck end of the auditory groove; 11 (type I). posterior end of the auditory groove; 12 (type II). intersections at the neck end of the auditory groove

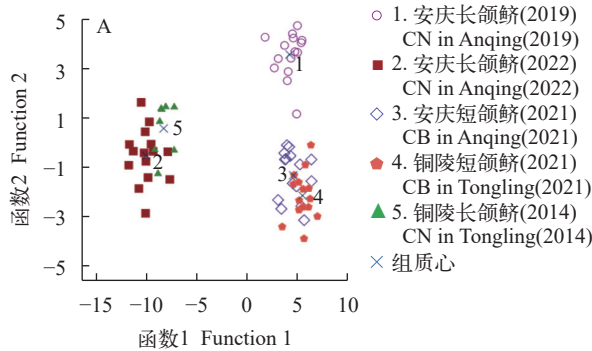
鲚及2021年安庆短颌鲚的主间沟凹陷点(地标点1)向背侧伸展,翼叶向耳石腹侧凹陷,2021年铜陵短颌鲚和2014年长颌鲚的主间沟凹陷点(地标点1)向腹侧凹陷,翼叶向背侧伸展。

通过比较发现,2019年安庆长颌鲚和2014年铜陵长颌鲚耳石形态变化更加明显,尤其是地标点1和2,说明长颌鲚较短颌鲚来说耳石形态变化更明显。

判别分析结果显示(图5)安庆短颌鲚与铜陵短颌鲚的组质心(Group centroid)较近,与安庆长颌鲚和铜陵长颌鲚的组质心较远;2022年安庆长颌鲚和2014年铜陵长颌鲚的组质心较近,且两者较2019年安庆长颌鲚组质心较远。图中各个体的分布可以发现,2019年安庆长颌鲚与2022年安庆长颌鲚、2014年铜陵长颌鲚及安庆、铜陵短颌鲚之间均区分明显。虽然和短颌鲚比起来,2014年铜陵长颌鲚与2022年安庆长颌鲚之间个体有交叠情况(图5A),

表2 刀鲚耳石不同地标点在相对扭曲主成分分析时的贡献率
Tab. 2 The contribution rates for different otolith landmarks of *Coilia nasus* in relative distortion principal component analysis

地标点Landmark	贡献率Contribution rate (%)
1	6.83
2	4.56
3	1.01
4	4.97
5	13.52
6	15.16
7	14.29
8	14.76
9	8.75
10	6.12
11	4.45
12	5.60



但在仅长颌鲚群体的判别分析时,两者之间的差异仍很明显(图5B)。此外,安庆短颌鲚和铜陵短颌鲚之间个体有交叠情况(图5A),但在仅对短颌鲚群体进行判别分析时,两者之间的差异很明显,判别准确率为100%。

判别分析结果显示(表3),2019年捕获于长江安徽安庆长颌鲚、2014年捕获于长江安徽铜陵长颌鲚及2021年捕获于安徽安庆短颌鲚的判别准确率均为100%。虽然在5个刀鲚群体综合判别时2022年安庆长颌鲚有两尾被误判为铜陵江段的长颌鲚,同时2021年铜陵短颌鲚也有一尾被误判为安庆短颌鲚。它们的判别率分别为86.7%和93.3%,且

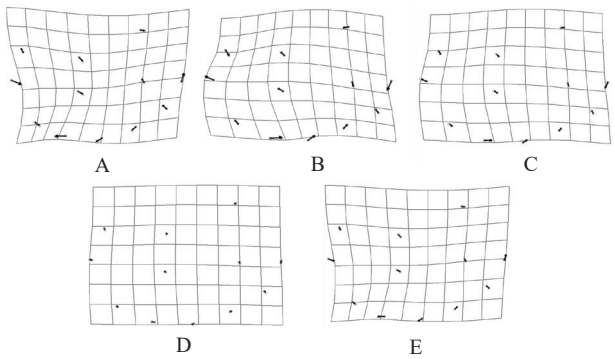


图4 长江安徽江段刀鲚耳石网格变形图与变异可视化(变异扩大3倍)
Fig. 4 Otolith grid deformation and variation visualization of *Coilia nasus* in Anqing and Tongling sections of the Changjiang River in Anhui Province (variation enlarged 3 times)

A. 铜陵长颌鲚(2014); B. 安庆长颌鲚(2019); C. 安庆长颌鲚(2022); D. 安庆短颌鲚(2021); E. 铜陵短颌鲚(2021)
A. *Coilia nasus* in Tongling section (2014); B. *Coilia nasus* in Anqing section (2019); C. *Coilia nasus* in Anqing section (2022); D. *Coilia brachygnathus* in Anqing section (2021); E. *Coilia brachygnathus* in Tongling section (2021)

A. *Coilia nasus* in Tongling section (2014); B. *Coilia nasus* in Anqing section (2019); C. *Coilia nasus* in Anqing section (2022); D. *Coilia brachygnathus* in Anqing section (2021); E. *Coilia brachygnathus* in Tongling section (2021)

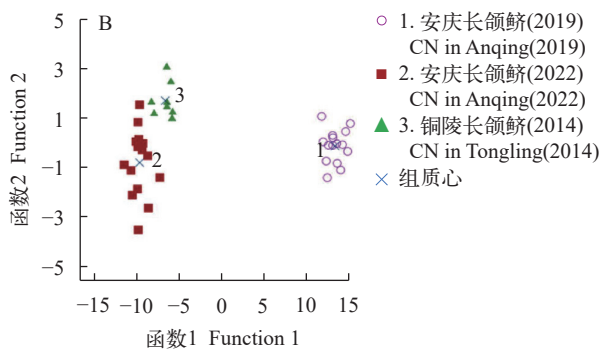


图5 长江安徽安庆、铜陵江段刀鲚耳石判别分析散点图

Fig. 5 Scatter plot of otolith discriminant analysis for *Coilia nasus* from Anqing and Tongling sections of the Changjiang River in Anhui Province

A. 安庆、铜陵长颌鲚和短颌鲚; B. 安庆、铜陵长颌鲚

A. *Coilia nasus* and *Coilia brachygnathus* in Anqing and Tongling sections; B. *Coilia nasus* in Anqing and Tongling sections

综合判别准确率为95.6%。但是仅长颌鲚群体和仅短颌鲚群体的判别分析时, 群体之间的差异很明显, 判别准确率均为100%。

3 讨论

3.1 长江安徽江段刀鲚耳石地标点的选择

几何形态测量法^[36]的发展弥补了传统形态测量法对形态信息的提取能力有限的不足。地标点法是将研究对象的形状看作变量进行比较进而发现传统形态测量中较难发现的形态差异特征, 所以其具有明显的判别优势^[36]。此外, 地标点还可以通过图形化的方式直观地表达出形态差异, 并且导致形状差异的主要性状及性状变化的趋势都可以通过地标点清晰地展现出来^[37]。本研究所选取的12个地标点中贡献率较大的是5、6、7和8地标点, 累积贡献率达57.73%, 其余的8个地标点的贡献率共计42.27%。这些贡献率较高的点均属于II型地标点。其中通过判别分析得出, 其相对扭曲成分的判别准确率为95.6%, 表明相关性较弱, 说明了本研究所筛选的地标点具有所研究刀鲚个体较高的形态学信息。姜涛等^[34]在凤鲚(*Coilia mystus*)和七丝鲚(*C. grayii*)两种鱼的不同群体分类研究中, 判别准确率为100%。Fang等^[38]运用地标点法对东、西部西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)上、下颚之间在判别结果上的差异进行探究, 其上颚的平均判别准确率为84.15%, 下颚平均判别准确率为95.75%。其与本研究所选地标点均具有准确性。侯刚等^[32]对截尾白姑鱼(*Pennahia anea*)、大头白姑鱼(*P. macrocephalus*)、斑鳍白姑鱼(*P. pawak*)和白姑鱼(*P. argentata*)的矢耳石运用地标点法进行分析时得到, 截尾白姑鱼、大头白姑鱼和斑鳍白姑鱼有着明显的区分效果, 其中的贡献率主要是I型和II型地标点。但冯波等^[39]利用地标点法对短吻鲷广东阳江和湛江不同地方种进行形态特征分析时, 地标点法的识别效果不如传统形态测量法, 导致这个结果的原因可能是在相对扭曲主成分分析时地

标点主要是III型地标点, 该结果表明, III型地标点的差异性区分效果并没有I和II型地标点的差异性区分效果好。由此可见, 耳石取点的准确性对地标点法的最终应用效果有着很大的影响, 所以在进行耳石形态特征分析时, 选取更有代表性的地标点意义更加重要。

3.2 不同年份长江安徽江段刀鲚耳石形态学差异及其群体识别意义

鱼类群体识别工作在资源调查和保护工作中发挥着十分重要的作用。不同地理群体的个体往往会在洄游习性的作用下发生交流, 特别是一些具有海洋生活史的鱼类, 其幼鱼阶段因资源补充的作用而会与很大水域范围内分布的群体互相关联^[40-42]。地标点法通过确定地标点的具体位置, 进而有利于分析和提取耳石形态信息数据来进一步解释不同年份刀鲚耳石形态的差异性, 进而探究安徽江段不同年份刀鲚群体组成的差异。本研究采用基于地标点的几何形态测量学法对长江安徽江段刀鲚的耳石形态差异性进行比较分析。本研究中有三组刀鲚的判别准确率均为100%, 分别是2014年捕获于铜陵段的长颌鲚、2019年捕获于安庆段的长颌鲚及2021年捕获于安庆段的短颌鲚。而2022年捕获于安庆段的长颌鲚和2021年捕获于铜陵段的短颌鲚尽管在综合判别率时出现误判, 但在仅长颌鲚群体和仅短颌鲚群体的判别分析时判别准确率均为100%。数据结果显示基于地标点法对不同江段的刀鲚的判别准确率总体较高。这体现出该地标点法对同种刀鲚种内不同群体或生态表型的判别具有良好的效果。

本研究前述结果表明, 长江安徽江段长颌鲚和短颌鲚生态表型间都没有出现被互相误判的情况(表3和图3), 体现出通过耳石形态可有效区分长颌鲚和短颌鲚。这与姜涛等^[43]基于测量框架法发现长江口及邻近海区和瓯江口刀鲚(长颌鲚类型)和太湖湖鲚(短颌鲚类型, 曾被命名为*Coilia nasus taihuensis*)耳石形态间差异明显的情况相印证。两研究中长

表3 刀鲚耳石形态判别分析结果

Tab. 3 Morphological discriminant analysis for *Coilia ectenes* from Anqing and Tongling sections of the Changjiang River in Anhui Province

组别Group	数量N	准确率Accuracy rate (%)	预测分类Forecast and classify				
			铜陵长颌鲚(2014)	安庆长颌鲚(2019)	安庆长颌鲚(2022)	安庆短颌鲚(2021)	铜陵短颌鲚(2021)
铜陵长颌鲚(2014)	8	100	8				
安庆长颌鲚(2019)	15	100		15			
安庆长颌鲚(2022)	15	86.7	2		13		
安庆短颌鲚(2021)	15	100				15	
铜陵短颌鲚(2021)	15	93.3				1	14

颌鲚和短颌鲚类型刀鲚耳石形态的差异(特别是前者翼叶远较后者明显等;图2)甚至目视都能区别^[43]。这种情况已不局限于同种不同生态表型间的差异,甚至可能实际反映出了两种鲚属鱼类间的差异。本研究团队近期基于耳石微化学与分子生物学手段相结合,对长颌鲚与短颌鲚的物种分化特征所进行的最新研究显示,长颌鲚和短颌鲚之间基于线粒体遗传分化的指数已确切表明,两者已相互分离,应作为两个独立的鲚属鱼类物种来对待^[13]。

不同江段的长颌鲚群体间和短颌鲚群体间耳石形态间在综合判别率时都存在一定程度上的误判,但在仅长颌鲚群体和仅短颌鲚群体的判别分析时判别准确率均为100%(表3和图5)。图5显示,2019年的安庆江段长颌鲚独立为一组,而2014年铜陵江段和2022年安庆的江段长颌鲚却很接近。这种现象在姜涛等^[43]对长江口崇明段、黄海和瓯江口3个水域所采刀鲚的耳石形态研究时也有发现。因刀鲚溯河洄游具有“回归性”,起源于不同产卵场的群体会返回该产卵场繁殖^[44,45],故上述现象的原因推测是溯河洄游通过长江安徽段的长颌鲚资源群体中,前者可能是起源于一个与后两者完全不同位置的产卵场;而后两者虽然也可能是起源于不同产卵场的群体且分别采于长江十年禁渔的前后时期;但耳石形态的相似性显示其起源地位位置较近,推测群体之间关联性较强,且仍可能存在个体的交流。这些机理性的问题尚待今后结合耳石微化学、分子生物学等研究手段来有针对性地确认和破解。上述结果也反映出,禁渔后长江安徽江段刀鲚资源群体的组成非常复杂,体现出该江段作为多个刀鲚群体的重要洄游通道及生境的重要功能;今后需要加强对该江段刀鲚关键栖息地作用的保护。

4 结论

本研究基于耳石上的12个地标点,将其坐标进行相对扭曲成分分析以及判别分析,利用网格变形和薄板样条分析,使其形态变异矢量可视化。在相对扭曲成分的判别分析中,其综合判别准确率为95.6%,说明刀鲚群体之间相关性不强,表明了在本研究所筛选的地标点都含有刀鲚丰富的形态学信息。本研究中2014年捕获于铜陵段的长颌鲚、2019年捕获于安庆段的长颌鲚及2021年捕获于安庆段的短颌鲚的判别准确率均为100%。而2022年捕获于安庆段的长颌鲚和2021年捕获于铜陵段的短颌鲚尽管在综合判别率时出现误判,但在仅长颌鲚群体和仅短颌鲚群体的判别分析时判别准确率均为100%。这表明刀鲚的耳石形态在不同水域差

异显著,从而可以有效的区分不同水域间的刀鲚群体。本研究基于地标法的几何形态测量学方法对不同水域刀鲚群体间耳石形态特征及群体识别进行了较为详细地探索,其方法能够准确、有效的判别刀鲚所隶属的水域群体。这对更有效地把握长江十年禁渔对安徽江段特定刀鲚种群的保护作用将十分有益。随着几何形态测量法的不断地发展,其在生物领域的应用也越来越广泛^[46,47]。基于地标点的几何形态测量学可以有效地揭示不同水域间鱼类的形态特征差异,并在不同水域群体识别中运用较广,具有很好的应用前景。地标点法在对耳石形态学的研究中提供了更加完善的研究手段,在对鱼类系统分类学中的研究中提供了更为有效的研究方法。

参考文献:

- [1] Jiang T, Liu H B, Xuan Z Y, *et al.* Classification of ecomorphotypes of *Coilia nasus* from the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(2): 518-527. [姜涛, 刘洪波, 轩中亚, 等. 长江中下游流域刀鲚(*Coilia nasus*)生态表型的划分[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(2): 518-527.]
- [2] Li Y X, Xie S G, Li Z J, *et al.* Gonad development of an anadromous fish *Coilia ectenes* (Engraulidae) in lower reach of Yangtze River, China [J]. *Fisheries Science*, 2007, **73**(6): 1224-1230.
- [3] Xuan Z Y, Jiang T, Liu H B, *et al.* Are there still anadromous the estuarine tapertail anchovies *Coilia nasus* in Dongting Lake[J]? *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(4): 838-843 [轩中亚, 姜涛, 刘洪波, 等. 洞庭湖中是否存在溯河洄游型刀鲚[J]. *水生生物学报*, 2020, **44**(4): 838-843.]
- [4] Fang H H, Dong X Y, Li X, *et al.* The application of two otolith analysis in three *Pleuronectidae* species [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2017(3): 98-105. [方华华, 董晓煜, 李翔, 等. 2种耳石分析法在3种鲽科鱼类中的应用[J]. *海洋湖沼通报*, 2017(3): 98-105.]
- [5] Zhang C, Fan Y N, Ye Z J, *et al.* Identification of five *Pampus* species from the coast of China based on sagittal otolith morphology analysis [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, **36**(2): 51-56.
- [6] Marcus J, Don Bowen W, Eddington J D. Effects of meal size on otolith recovery from fecal samples of gray and harbor seal pups [J]. *Marine Mammal Science*, 1998, **14**(4): 789-802.
- [7] Rebaya M, Ben Faleh A, Allaya H, *et al.* Otolith shape discrimination of *Liza ramada* (Actinopterygii: Mugiliformes: Mugilidae) from marine and estuarine populations in Tunisia [J]. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 2017, **47**(1): 13-21.

- [8] Duncan R, Brophy D, Arrizabalaga H. Otolith shape analysis as a tool for stock separation of albacore tuna feeding in the Northeast Atlantic [J]. *Fisheries Research*, 2018(200): 68-74.
- [9] Volpedo A V, Tombari A D, Echeverría D D. Eco-morphological patterns of the sagitta of Antarctic fish [J]. *Polar Biology*, 2008, **31**(5): 635-640.
- [10] Bobiles R U, Soliman V S, Yamaoka K. Changes in otolith structure of seagrass siganid *Siganus canaliculatus* during settlement [J]. *AACL Bioflux*, 2015, **8**(1): 15-25.
- [11] Li M M, Jiang T, Chen T T, *et al.* Otolith microchemistry of the estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* from the Anqing section of the Yangtze River and its significance for migration ecology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(8): 2788-2795. [李孟孟, 姜涛, 陈婷婷, 等. 长江安庆江段刀鲚耳石微化学及洄游生态学意义 [J]. *生态学报*, 2017, **37**(8): 2788-2795.]
- [12] Li M M, Jiang T, Khumbanyiwa D D, *et al.* Reconstructing habitat history of *Coilia nasus* from the Hexian section of the Yangtze River in Anhui Province by otolith microchemistry [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(5): 1054-1061. [李孟孟, 姜涛, Khumbanyiwa D D, 等. 基于耳石微化学的长江安徽和县江段刀鲚生境履历重建 [J]. *水生生物学报*, 2017, **41**(5): 1054-1061.]
- [13] Xuan Z Y, Jiang T, Liu H B, *et al.* Mitochondrial DNA and microsatellite analyses reveal strong genetic differentiation between two types of estuarine tapertail anchovies (*Coilia*) in Yangtze River Basin, China [J]. *Hydrobiologia*, 2021, **848**(6): 1409-1431.
- [14] Kool J T, Moilanen A, Trembl E A. Population connectivity: recent advances and new perspectives [J]. *Landscape Ecology*, 2013, **28**(2): 165-185.
- [15] Ye Z J, Meng X M, Gao T X, *et al.* The geographical differentiation in otolith morphology of sea bass: *Lateolabrax japonicus* and *L. maculatus* [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, **38**(4): 356-360. [叶振江, 孟晓梦, 高天翔, 等. 两种花鲈(*Lateolabrax* sp.)耳石形态的地理变异 [J]. *海洋与湖泊*, 2007, **38**(4): 356-360.]
- [16] Pan X Z, Gao T X. Sagittal otolith shape used in the discrimination of fishes of the genus *Sillago* in China [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2010, **35**(4): 799-805. [潘晓哲, 高天翔. 基于耳石形态的鳊属鱼类鉴别 [J]. *动物分类学报*, 2010, **35**(4): 799-805.]
- [17] Guo H Y, Tang W Q, Wei K, *et al.* Morphologic characters of the sagittal otoliths of the fishes of the genus *Coilia* from China [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2007, **42**(1): 39-47. [郭弘艺, 唐文乔, 魏凯, 等. 中国鲚属鱼类的矢耳石形态特征 [J]. *动物学杂志*, 2007, **42**(1): 39-47.]
- [18] Chen X J, Fang Z, Su H, *et al.* Review and application of geometric morphometrics in aquatic animals [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, **37**(12): 1873-1885. [陈新军, 方舟, 苏杭, 等. 几何形态测量学在水生动物中的应用及其进展 [J]. *水产学报*, 2013, **37**(12): 1873-1885.]
- [19] Hou G, Feng B, Yan Y R, *et al.* The study on using otolith morphology to identify three *Nemipterus* fish species: *Nemipterus virgatus*, *N. bathybius* and *N. japonicus* in Beibu Gulf [J]. *Periodical of Ocean University of China* (Natural Science Edition), 2012, **42**(3): 27-35. [侯刚, 冯波, 颜云榕, 等. 北部湾金线鱼、深水金线鱼与日本金线鱼矢耳石形态识别的初步研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, **42**(3): 27-35.]
- [20] Monteiro L R, Di Benedetto A P M, Guillermo L H, *et al.* Allometric changes and shape differentiation of sagitta otoliths in sciaenid fishes [J]. *Fisheries Research*, 2005, **74**(1/2/3): 288-299.
- [21] Zheng C C, Jiang T, Luo R J, *et al.* Landmark-based morphometric identification of different geographical origins for the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, **41**(12): 1896-1907. [郑朝臣, 姜涛, 骆仁军, 等. 不同产地中华绒螯蟹形态差异的地标点法分析 [J]. *水产学报*, 2017, **41**(12): 1896-1907.]
- [22] Chen M S, Jin Z X, Ke S S. Measurement and analysis of leaf shape variation of *Carpinus tientaiensis* in different light environment [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, **54**(1): 54-63. [陈模舜, 金则新, 柯世省. 不同光环境下天台鹅耳枥叶形变化的测定与分析 [J]. *林业科学*, 2018, **54**(1): 54-63.]
- [23] Ponton D. Is geometric morphometrics efficient for comparing otolith shape of different fish species [J]? *Journal of Morphology*, 2006, **267**(6): 750-757.
- [24] Kang W, Wu L, Liu J S, *et al.* Morphological differences and genetic admixture in mitten crabs in the Tumenjiang River [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, **23**(3): 555-564. [康伟, 吴廉, 刘金生, 等. 图们江水系绒螯蟹的形态差异与遗传混杂 [J]. *中国水产科学*, 2016, **23**(3): 555-564.]
- [25] Jiang X D, Cheng Y X, Pan J L, *et al.* Landmark-based morphometric identification of wild *Eriocheir sinensis* with geographically different origins [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, **26**(6): 1116-1125. [姜晓东, 成永旭, 潘建林, 等. 基于地标点几何形态测量法区分不同水系野生中华绒螯蟹 [J]. *中国水产科学*, 2019, **26**(6): 1116-1125.]
- [26] Yang J, Qiu C W, Su Y P, *et al.* Analysis on morphological and elemental difference of Chinese mitten crab from different water areas [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, **41**(3): 187-191. [杨健, 邱楚雯, 苏彦平, 等. 不同水域条件下中华绒螯蟹的形态和元素分布 [J]. *江苏农业科学*, 2013, **41**(3): 187-191.]
- [27] Yang W B, Su Y P, Liu H B, *et al.* A comparative study of morphological characteristics and elemental fingerprints of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* from three lakes [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, **19**(1): 84-93. [杨文斌, 苏彦平, 刘洪波, 等. 长江

- 水系3个湖泊中华绒蟹形态及元素“指纹”特征 [J]. 中国水产科学, 2012, **19**(1): 84-93.]
- [28] Su H. Identification application of geometric morphometrics in *Ommastrephide* economic zone [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016: 63-69. [苏杭. 几何形态测量学法在大洋性头足类种间及种群鉴别中的应用 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016: 63-69.]
- [29] Ou L G, Liu B L. Identification of sagittal otolith shapes of four species in family Carangidae based on landmark morphometrics analysis [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, **35**(1): 114-120. [欧利国, 刘必林. 基于地标点法的4种鲹科鱼类矢耳石形态分类 [J]. 大连海洋大学学报, 2020, **35**(1): 114-120.]
- [30] Lombarte A, Palmer M, Matallanas J, *et al.* Ecomorphological trends and phylogenetic inertia of otolith sagittae in Nototheniidae [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2010, **89**(3-4): 607-618.
- [31] Mondal R, Devi N P, Jauhari R K. Landmark-based geometric morphometric analysis of wing shape among certain species of *Aedes* mosquitoes in District Dehradun (Uttarakhand), India [J]. *Journal of Vector Borne Diseases*, 2015, **52**(2): 122-128.
- [32] 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. [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.]
- [33] Hou G, Wang X F, Zhu L X, *et al.* Geometric morphometrics of sagittal otolith of four *Nemipterus* fish species [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, **45**(3): 496-503. [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.]
- [34] Jiang T, Zheng C C, Huang H H, *et al.* Landmark-based morphometric comparison of otolith for *Coilia mystus* and *C. grayii* from Pearl River estuary and Jiulong River estuary [J]. *South China Fisheries Science*, 2018, **14**(6): 10-16. [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.]
- [35] Xue J R, Jiang T, Chen X B, *et al.* Geometric morphometric analysis on the carapace difference between “bathed” and Yangcheng Lake originated *Eriocheir sinensis* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(3): 587-594. [薛俊仁, 姜涛, 陈修报, 等. 阳澄湖原产及“洗澡”中华绒螯蟹背甲的几何形态分析 [J]. 水生生物学报, 2020, **44**(3): 587-594.]
- [36] Yan B R, Hua B Z. Geometric morphometrics and its application in the systematics and phylogenetics of insects [J]. *Entomotaxonomia*, 2010, **32**(4): 313-320. [闫宝荣, 花保祯. 几何形态测量学及其在昆虫分类学和系统发育中的应用 [J]. 昆虫分类学报, 2010, **32**(4): 313-320.]
- [37] He K, Bai M, Wan T, *et al.* Shape variation in mandibles of *Parascaptor leucura* (Mammalia, Talpidae) based on geometric morphometrics: implication for geographic diversification [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2013, **33**(1): 7-17. [何锴, 白明, 万韬, 等. 白尾鼯(鼯科: 哺乳纲)下颌骨几何形态测量分析及地理分化研究 [J]. 兽类学报, 2013, **33**(1): 7-17.]
- [38] 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.
- [39] Feng B, Cheng L M. Identifying *Leiognathus brevirostris* stocks by geometric morphometrics [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, **20**(5): 677-681. [冯波, 程罗妹. 几何形态学方法区分短吻鲷地方种群的研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2011, **20**(5): 677-681.]
- [40] Cowen R K, Lwiza K M M, Sponaugle S, *et al.* Connectivity of marine populations: open or closed [J]? *Science*, 2000, 287(5454): 857-859.
- [41] Almany G R, Connolly S R, Heath D D, *et al.* Connectivity, biodiversity conservation and the design of marine reserve networks for coral reefs [J]. *Coral Reefs*, 2009, **28**(2): 339-351.
- [42] Hughes J M, Schmidt D J, Macdonald J I, *et al.* Low interbasin connectivity in a facultatively diadromous fish: evidence from genetics and otolith chemistry [J]. *Molecular Ecology*, 2014, **23**(5): 1000-1013.
- [43] Jiang T, Yang J, Liu H B, *et al.* A comparative study of the morphology of sagittal otolith in *Coilia nasus*, *Coilia mystus* and *Coilia nasus taihuensis* [J]. *Marine Sciences*, 2011, **35**(3): 23-31. [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.]
- [44] Jiang T, Liu H B, Lu M J, *et al.* A possible connectivity among estuarine tapertail anchovy (*Coilia nasus*) populations in the Yangtze River, Yellow Sea, and Poyang Lake [J]. *Estuaries and Coasts*, 2016, **39**(6): 1762-1768.
- [45] Jiang T, Liu H B, Hu Y H, *et al.* Revealing population connectivity of the estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* in the Changjiang River estuary and its adjacent waters using otolith microchemistry [J]. *Fishes*, 2022, **7**(4): 147.
- [46] Bookstein F L. Size and shape spaces for landmark data in two dimensions [J]. *Statistical Science*, 1986, **1**(2): 181-222.
- [47] Wen H, Wang X L. Advances in the application of outline methods in biological taxonomy [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, **50**(5): 1438-1446. [闻慧, 王心丽. 轮廓形态测量法在生物分类应用中的研究进展 [J]. 应用昆虫学报, 2013, **50**(5): 1438-1446.]

POPULATION IDENTIFICATION FOR *COILIA NASUS* IN ANHUI SECTION OF THE CHANGJIANG RIVER BASED ON OTOLITH GEOMETRIC MORPHOMETRIC ANALYSIS

XU Ying¹, JIANG Tao², LIU Hong-Bo², CHEN Xiu-Bao² and YANG Jian^{1,2}

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China; 2. Laboratory of Fishery Microchemistry, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: Estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* is believed as a “flagship species” “indicator species” and “umbrella species” for protection of the Changjiang River ecological system. In order to reveal the otolith morphological characteristics and population delineation/identification of *C. nasus* in Anhui section of the Changjiang River, the landmark-based geometric morphometric analysis was utilized to comparatively study the sagittal otoliths of two ecomorphotypes (i.e., the long supermaxilla *C. nasus* and short supermaxilla *C. brachygnathus*) and five populations of the anchovy in Anqing and Tongling sections of the Changjiang River in Anhui Province. The left sagittal otolith of each specimen was used in the present study. A Leica M205A stereo microscope was used to photograph the otolith samples. Subsequently, tpsDig2 software was used to establish and measure the landmark points on the otolith photos. Based on 12 landmarks, the coordinates were analyzed by relative distortion component analysis and discriminant analysis. The morphological variation vectors were then visualized through thin plate spline analysis and mesh deformation. The results show that most of the extracted landmarks are type II landmarks, and their contribution rate is 69.48% in the analysis of relative distorted main components, indicating that type II landmarks were the main source of otolith morphological differences. The general discriminant accuracy of the five populations was 95.6%, indicating that significant differences in otolith morphology were generally existed among the populations of *C. nasus*. Especially, 100% classification accuracies were achieved for the variation between long supermaxilla *C. nasus* and short supermaxilla *C. brachygnathus*, as well as among 3 populations of long supermaxilla *C. nasus*. Therefore, it will be reasonable to believe that the differences of otolith morphometrics particularly observed in the long vs. short supermaxilla ecomorphotypes and 3 populations of long supermaxilla *C. nasus* could reflect the evidences of ecomorphotype differentiation and high/low level population connectivity. The aforementioned findings can provide theoretic basis and supports for objective evaluations of resource composition and population difference of *C. nasus* in Anhui section of the Changjiang River before and after the 10-year fishing ban policy. Furthermore, this study provides an important reference case for population delineation or identification of different ecomorphotype *C. nasus* in other waters and other commercial fish resources the Changjiang River Basin.

Key words: Otolith; Landmark; Geometric morphometric analysis; Population; Changjiang River Anhui section; *Coilia nasus*