

## 长江口水域棘头梅童鱼耳石形态特征

杨晨<sup>1</sup>, 张成功<sup>1</sup>, 王婷<sup>2,3</sup>, 李建华<sup>1,3</sup>, 赵静<sup>1,3</sup>, 陈锦辉<sup>2,3</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200125; 3. 长江口水生生物监测与保护联合实验室, 上海 201306)

**摘要:** 为了探究长江口棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)耳石的形态特征及其与个体生长指标(体长、体质量)之间的关系, 于2022年6月至2023年5月期间采集棘头梅童鱼样本共409尾, 系统测量其左右耳石的长度、宽度、周长、面积、最大半径、最小半径、最小外接矩形面积、长宽比与半径比等9项形态参数, 并采用主成分分析(PCA)提取形态变异的关键指标。随后, 通过指数、线性、对数、幂函数及多项式函数对耳石形态指标与体长、体质量之间的关系进行拟合分析。结果显示, 左右耳石在主要形态参数方面高度一致, 但在耳石长 $L_1$ 、长宽比 $L_3$ 、最小半径 $r$ 、半径比 $L_4$ 和周长 $P_1$ 上存在显著差异( $P < 0.05$ )。PCA结果表明, 耳石长度、最小外接矩形面积和半径比为主要影响耳石形态的指标, 其中最小外接矩形面积在左右耳石间差异不显著( $P > 0.05$ ), 因此合并数据进行拟合。拟合分析中, 耳石长度与最小外接矩形面积和体长之间呈显著二次多项式关系( $R^2 > 0.85, P < 0.05$ ), 与体质量之间呈幂函数关系( $R^2 > 0.91$ )。耳石半径比与生长指标的相关性不显著。研究发现耳石长度与最小外接矩形面积可作为棘头梅童鱼个体生长的重要预测指标。本研究为深入理解耳石形态与鱼体生长之间的关系提供了理论支持, 可为渔业资源评估与物种管理提供科学依据。

**关键词:** 棘头梅童鱼; 耳石; 形态特征; 生长关系

**中图分类号:** S 917.4

**文献标志码:** A

棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)隶属鲈形目(Perciformes)石首鱼科(Sciaenidae)梅童鱼属(*Collichthys*), 是我国东海、黄海沿岸广泛分布的一种暖温性近海底栖小型鱼类<sup>[1-3]</sup>。该物种对温度和盐度的适应能力较强, 肉质鲜美、生长较快, 因而在我国沿海渔业中具有较高的经济价值, 尤其在东海及长江口区域为优势种类, 构成了小型经济鱼类群的重要组成部分<sup>[4-5]</sup>。20世纪90年代以来, 随着传统大型经济鱼类资源的衰退, 棘头梅童鱼因捕食压力减轻和生态位释放而种群迅速扩张, 渔获量一度呈上升趋势<sup>[2]</sup>。然而, 近十余年因环境变化与过度捕捞, 其资源量明显下降。据统计, 梅童鱼年捕捞量已由2014年的29.9万t下降至2022年的18.96万t, 平均年降幅达1.37万t<sup>[6-7]</sup>, 资源衰退问题不容忽视。自2021年起, 长江流域实施为期十年的全面禁捕政策, 棘头梅童鱼

作为典型的河口性小型鱼类, 生命周期短, 繁殖力强, 一度在2023年成为长江口的优势物种<sup>[8]</sup>, 因此在长江口生态系统中占据重要生态位, 是评估禁渔政策效果的重要生物指示种。

耳石是鱼类内耳结构中以碳酸钙为主的硬组织, 主要参与听觉与平衡调节。耳石的生长过程与鱼体生长密切相关, 具有逐年沉积的特征, 在年龄判定、个体生长研究、种群结构分析等方面具有广泛应用价值<sup>[9-13]</sup>。近年来, 耳石的形态学特征(如长度、宽度、面积、周长等)作为衡量鱼类个体生长、种群变异乃至栖息地适应性的指标, 受到越来越多关注<sup>[14]</sup>。尤其是在禁捕背景下, 耳石形态作为生长状态和资源恢复的潜在生物标志, 具备重要的研究意义。

因此, 本研究以长江口棘头梅童鱼为对象, 通过对其左右耳石主要形态参数的系统测量, 结

收稿日期: 2025-04-30

修回日期: 2025-05-20

基金项目: 上海市农委科技兴农技术创新项目(沪农科创字2022第2-1号)

作者简介: 杨晨(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水生生物学。E-mail: 3291069108@qq.com

通信作者: 陈锦辉, E-mail: 1114260882@qq.com

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>

合主成分分析(Principal component analysis, PCA)和回归拟合等方法,探讨耳石形态特征与体长、体质量之间的定量关系。研究旨在明确耳石指标中对个体生长具有代表性与预测性的关键变量,进而为禁捕政策下长江口渔业资源恢复评估提供数据支撑,同时丰富我国河口鱼类耳石生物学研究。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源于2022年7月至2023年6月期间

在长江口进行的水生生物资源调查,调查共计4个航次,累计40 d(图1)。调查船为“沪崇渔1511号”(已获得相关部门批准,调查数据仅用于科研用途),采用双囊底拖网,网口宽6 m、网高2 m、网纲长6 m,囊网网目为20 mm,作业航速为2 kn。每个站点的作业时间约为30 min。在样本采集时,各站点随机选取15尾棘头梅童鱼样本,若站点捕获棘头梅童鱼样本不足15尾,则采集所有捕获个体,共采集棘头梅童鱼样本409尾。样本采集后冷冻保存,并运回实验室进行生物学测量和耳石提取。

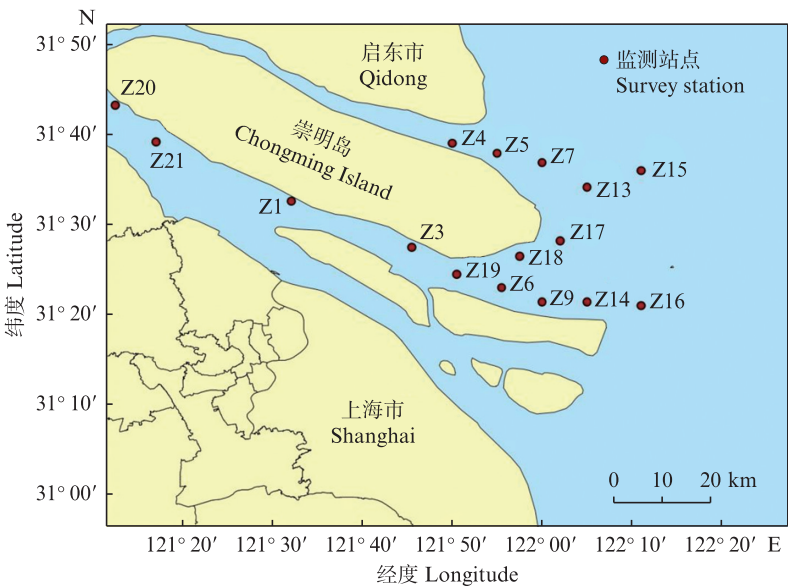


图1 长江口渔业资源调查站点分布图  
Fig. 1 Distribution of fishery resources survey stations in the Yangtze River Estuary

1.2 研究方法

1.2.1 生物学测定及耳石提取

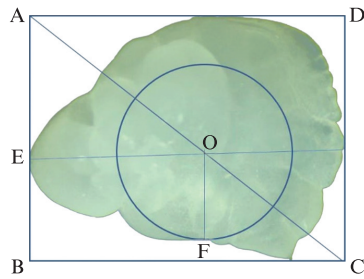
棘头梅童鱼体长使用精度为0.01 cm的钢尺测量,体质量使用精度为0.01 g的电子天平称量。生物学测量完成后,解剖取出矢耳石,置于乙醇中浸泡24 h,清洗干净,并使用电子天平称量耳石,精确至0.01 g。

1.2.2 耳石形态测量

对棘头梅童鱼耳石进行图像拍摄,首先将耳石凸面向上置于光学显微镜(Olympus CX23)下,然后使用自带的FCSnap显微图像测量软件对耳石的形态参数进行测量。在测量前,沿水平和垂直两个方向进行校准。共测量9个形态指标(表1和图2),测量精度为0.01 mm。

表1 棘头梅童鱼耳石形态指标  
Tab. 1 Morphological parameters of otolith of *Collichthys lucidus*

序号 Number	指标 Index	测量标准 Measurement standards
1	耳石长 $L_1$	耳石前端到后端的直线距离
2	耳石宽 $L_2$	耳石背部到腹部的宽度
3	最大半径 $R$	耳石中心到边缘的最长距离
4	最小半径 $r$	耳石中心到边缘的最短距离
5	耳石周长 $P_1$	耳石不规则边缘的实际长度
6	耳石面积 $A_1$	耳石的实际二维面积
7	最小外接矩形面积 $S_1$	耳石的最小外接矩形面积
8	长宽比 $L_3$	耳石长与宽的比值
9	耳石半径比 $L_4$	耳石最大半径与最小半径的比值



AD. 耳石长( $L_1$ ); AB. 耳石宽( $L_2$ ); OF. 耳石最小半径( $r$ ); OE. 耳石最大半径( $R$ ); 耳石周长( $P_1$ ); 耳石面积( $A_1$ ); 最小外接矩形面积( $S_1$ ); 长宽比( $L_3$ ); 耳石半径比( $L_4$ ).

AD. Otolith length ( $L_1$ ); AB. Otolith width ( $L_2$ ); OF. Minimum radius of otolith ( $r$ ); OE. Maximum radius of otolith ( $R$ ); Otolith perimeter ( $P_1$ ); Otolith area ( $A_1$ ); Area of the minimum bounding rectangle ( $S_1$ ); Length-to-width ratio ( $L_3$ ); Otolith radius ratio ( $L_4$ ).

图2 棘头梅童鱼耳石形态指标示意图

Fig. 2 Diagram of otolith morphologic indexes of *Collichthys lucidus*

### 1.2.3 数据处理方法

鉴于左右耳石可能存在形态差异,本研究首先使用 Excel 软件对棘头梅童鱼左右耳石的 9 项形态指标进行配对样本  $t$  检验,确定其在不同形态特征上的差异显著性;采用主成分分析对耳石的 9 项形态参数进行降维处理,提取出能够反映

耳石形态的主要参数;通过指数函数、幂函数<sup>[15-16]</sup>、对数函数<sup>[17]</sup>、线性函数和多项式函数拟合个体左右耳石主要形态参数与体长、体质量的关系,并根据赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)<sup>[18]</sup>选择最佳拟合函数。

## 2 结果

### 2.1 棘头梅童鱼耳石形态参数

在体长为 49~187 mm 的长江口棘头梅童鱼样本中,左、右耳石的各项形态参数总体差异不显著。左耳石的耳石长度、宽度、最大半径、最小半径、周长、面积、最小外接矩形面积、长宽比及半径比的均值分别为(5.18±0.96) mm、(3.91±0.70) mm、(2.91±0.51) mm、(1.50±0.29) mm、(14.58±2.70) mm、(14.89±5.44) mm<sup>2</sup>、(20.91±7.64) mm<sup>2</sup>、1.33±0.04、1.96±0.18。右耳石的上述参数均值分别为(5.19±0.96) mm、(3.90±0.70) mm、(2.92±0.52) mm、(1.48±0.28) mm、(14.63±2.70) mm、(14.91±5.47) mm<sup>2</sup>、(20.94±7.65) mm<sup>2</sup>、1.33±0.04、1.99±0.19。各项指标的详细数值见表 2。

表2 棘头梅童鱼形态特征数值表

Tab. 2 Numerical table of *Collichthys lucidus* morphological characteristics

指标 Index	最大值 Maximum		最小值 Minimum		平均值 Average	
	左耳石 Left otolith	右耳石 Right otolith	左耳石 Left otolith	右耳石 Right otolith	左耳石 Left otolith	右耳石 Right otolith
耳石长 $L_1$ /mm	8.51	8.37	2.83	2.90	5.18	5.19
耳石宽 $L_2$ /mm	6.32	6.22	2.21	2.20	3.91	3.90
最大半径 $R$ /mm	4.48	4.34	1.53	1.62	2.91	2.92
最小半径 $r$ /mm	2.50	2.39	0.88	0.83	1.50	1.48
耳石周长 $P_1$ /mm	23.52	23.18	7.99	7.94	14.58	14.63
耳石面积 $A_1$ /mm <sup>2</sup>	36.99	36.37	4.49	4.46	14.89	14.91
最小外接矩形面积 $S_1$ /mm <sup>2</sup>	53.72	52.13	6.27	6.38	20.91	20.94
长宽比 $L_3$	1.45	1.44	1.22	1.22	1.33	1.33
耳石半径比 $L_4$	2.66	2.59	1.49	1.57	1.96	1.99

### 2.2 左右耳石差异分析

通过配对样本  $t$  检验结果显示,左、右耳石在耳石宽  $L_2$ 、最大半径  $R$ 、耳石面积  $A_1$  和最小外接矩形面积上的差异不显著( $P>0.05$ ),而在耳石长  $L_1$ 、长宽比  $L_3$ 、最小半径  $r$ 、半径比  $L_4$  和周长  $P_1$  上存在显著差异( $P<0.05$ ),见表 3。

### 2.3 耳石主要表征指标

对左耳石 9 项形态参数数据进行主成分分

析(表 4)。结果显示,第一主成分和第二主成分分别解释了形态参数的 76.795% 和 12.616% 的贡献率,累计贡献率为 89.411%。第一主成分与耳石长、耳石宽、最小外接矩形面积、耳石周长和耳石面积呈较大正相关,耳石长和最小外接矩形面积的载荷系数最大(>0.99),因此,第一主成分可代表耳石的整体形态特征;第二主成分与半径比有较大正相关,代表耳石的几何形状。

根据主成分载荷,耳石长、最小外接矩形面积和半径比等3个形态参数可有效描述左耳石的整体形态特征。

表3 左、右耳石形态指标 $t$ 检验结果  
Tab. 3 Results of  $t$ -test of left and right otolith morphological indexes

耳石指标 Parameter of otolith	统计量 $t$ Statistic $t$	自由度 $df$ Freedom $df$	$P$
耳石长 $L_1/\text{mm}$	-2.793	408	0.005*
耳石宽 $L_2/\text{mm}$	0.851	408	0.395
长宽比 $L_3$	-2.769	408	0.006*
最大半径 $R/\text{mm}$	-0.263	408	0.793
最小半径 $r/\text{mm}$	6.477	408	<0.05*
耳石半径比 $L_4$	-3.090	408	0.002*
耳石周长 $P_1/\text{mm}$	-4.875	408	<0.05*
耳石面积 $A_1/\text{mm}^2$	-1.890	408	0.059
最小外接矩形面积 $S_1/\text{mm}^2$	-1.209	408	0.227

注:\*.差异显著( $P<0.05$ ),部分数值过小用<0.05\*表示。

Notes: \*. Significant difference ( $P<0.05$ ), values less than the detection threshold are represented as <0.05\*.

对右耳石9项形态参数数据进行主成分分析(表4)。结果显示,第一主成分和第二主成分分别解释了形态参数的76.521%和13.455%的贡献

率,累计贡献率为89.976%。第一主成分与耳石长、耳石宽、耳石周长、耳石面积和最小外接矩形面积呈较大正相关,耳石长和最小外接矩形面积的载荷系数最大(>0.99),因此,第一主成分可代表耳石的整体形态特征;第二主成分与半径比有较大正相关,代表耳石的几何形状。根据主成分载荷,耳石长、最小外接矩形面积和半径比等3个形态参数可有效描述右耳石的整体形态特征。

## 2.4 棘头梅童鱼耳石主要形态指标与其体长关系

研究发现,棘头梅童鱼左右耳石的耳石长( $L_1$ )和最小外接矩形面积( $S_1$ )与体长之间的关系为极显著的二次多项式函数,而耳石半径比( $L_4$ )与体长的关系不显著。通过指数函数、直线函数、对数函数、幂函数和二次多项式对实测数据进行拟合分析,结果显示 $L_1$ 、 $S_1$ 与体长的关系极显著( $R>r_{0.01}$ ),但 $L_1$ 、 $S_1$ 与体长关系的二次多项式的决定系数是5种不同曲线拟合中最高的,即二次多项式函数拟合效果优于其他函数。 $L_4$ 与体长的关系不显著( $R<r_{0.01}$ ),二次多项式的决定系数为5种不同函数拟合中最高的,二次多项式函数拟合效果相对较好(表5)。

表4 棘头梅童鱼耳石各形态指标主成分分析  
Tab. 4 Principal component of morphological index of *Collichthys lucidus*

形态指标 Morphological parameter	左耳石主成分 Principal component of the left otolith		右耳石主成分 Principal component of the right otolith	
	1	2	1	2
耳石长 $L_1/\text{mm}$	0.998	0.032	0.998	0.021
耳石宽 $L_2/\text{mm}$	0.989	-0.041	0.989	-0.071
长宽比 $L_3$	0.312	0.443	0.299	0.576
最大半径 $R/\text{mm}$	0.957	0.243	0.962	0.216
最小半径 $r/\text{mm}$	0.973	-0.199	0.971	-0.194
耳石半径比 $L_4$	-0.154	0.914	-0.056	0.886
耳石周长 $P_1/\text{mm}$	0.991	0.023	0.990	-0.007
耳石面积 $A_1/\text{mm}^2$	0.992	-0.020	0.992	-0.036
最小外接矩形面积 $S_1/\text{mm}^2$	0.994	-0.031	0.994	-0.050
各成分贡献率 Contribution rate of each component/%	76.795	12.616	76.521	13.455
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	76.795	89.411	76.521	89.976



表5 棘头梅童鱼耳石主要参数与体长拟合方程

Tab. 5 Fitting equations for the relationship between otolith main parameters and body length of *Collichthys lucidus*

生长关系 Growth relationship	函数类型 Function	拟合方程 Equation	$R^2$	$R$
右耳石长( $L_1$ )-体长( $L$ ) Right otolith length and body length	指数函数	$L_1=2\ 509.6e^{0.007\ 3L}$	0.797 3	0.892 9
	直线	$L_1=38.316L+1\ 471.8$	0.841 1	0.917 1
	对数函数	$L_1=3\ 814.2\ln L-12\ 156$	0.854 4	0.924 3
	二次多项式	$L_1=-0.170\ 1L^2+74.108L-309.6$	0.858 9	0.926 7*
	幂函数	$L_1=175.44\ L^{0.741}$	0.849 0	0.921 4
右耳石半径比( $L_4$ )-体长( $L$ ) Right otolith radius ratio and body length	指数函数	$L_4=2.028\ 2e^{-3\times 10^{-4}L}$	0.005 3	0.072 8
	直线	$L_4=-0.000\ 6L+2.040\ 9$	0.005 4	0.073 5
	对数函数	$L_4=-0.031\ln L+2.124\ 7$	0.001 6	0.040 0
	二次多项式	$L_4=-4\times 10^{-5}L^2+0.008\ 8L+1.574\ 8$	0.041 2	0.203 0*
	幂函数	$L_4=2.092\ 5L^{-0.012}$	0.001 6	0.040 0
左耳石长( $L_1$ )-体长( $L$ ) Left otolith length and body length	指数函数	$L_1=2\ 499.9e^{0.007\ 3L}$	0.799 7	0.894 3
	直线	$L_1=38.307L+1\ 462.5$	0.843 3	0.918 3
	对数函数	$L_1=3\ 813.5\ln L-12\ 163$	0.856 7	0.925 6
	二次多项式	$L_1=-0.168\ 1L^2+73.692L-298.65$	0.860 7	0.927 7*
	幂函数	$L_1=173.32L^{0.743\ 2}$	0.851 1	0.922 6
左耳石半径比( $L_4$ )-体长( $L$ ) Left otolith radius ratio and body length	指数函数	$L_4=2.067\ 3e^{-6\times 10^{-4}L}$	0.022 8	0.151 0
	直线	$L_4=-0.001\ 2L+2.076\ 4$	0.023 2	0.023 2
	对数函数	$L_4=-0.097\ln L+2.403\ 6$	0.015 9	0.126 1
	二次多项式	$L_4=-3\times 10^{-5}L^2+0.006L+1.718\ 6$	0.043 7	0.209 0*
	幂函数	$L_4=2.418\ 3L^{-0.047}$	0.015 6	0.124 9
耳石最小外接矩形面积( $S_1$ )-体长( $L$ ) Area of minimum circumscribed rectangle and body length	指数函数	$S_1=5\times 10^6e^{0.014\ 3L}$	0.773 9	0.839 7
	直线	$S_1=304\ 609L-9\times 10^6$	0.848 6	0.921 2
	对数函数	$S_1=3\times 10^7\ln L-10^8$	0.832 0	0.912 1
	二次多项式	$S_1=-336.89L^2+375\ 509L-10^7$	0.849 7	0.921 8*
	幂函数	$S_1=26\ 710L^{1.450\ 5}$	0.840 8	0.917 0

注:\* 表示拟合度最高。

Notes: \* means maxium degree of fitting.

耳石主要形态参数与体长的关系中,二次多项式函数拟合 $S_1$ 、 $L_1$ 和 $L_4$ 与体长的回归关系最佳(图3),且 $S_1$ 、 $L_1$ 和 $L_4$ 与体长之间的关系显著( $P<0.05$ )。

## 2.5 棘头梅童鱼耳石主要形态指标与其体质量关系

研究结果显示,棘头梅童鱼左右耳石的 $L_1$ 、 $S_1$ 与体质量之间关系为极显著的幂函数关系, $L_4$ 与体质量的关系不显著。分别用指数、直线、对数、多项式和幂函数对数据进行拟合分析表明, $L_1$ 、 $S_1$ 与体质量之间的关系极显著( $R>r_{0.01}$ ),但 $L_1$ 、 $S_1$ 与体质量的幂函数的决定系数是5种不同函数拟合中最高的,即幂函数优于其他函数关系; $L_4$ 与体质量的关系式的相关系数都未达到极显著水平( $R<r_{0.01}$ ),二次多项式的决定系数为5种不同函数拟合中最高的,表明二次多项式函数拟合效果相对较好(表6)。 $L_4$ 与体质量的拟合关系与体长结

果相似,拟合效果均不理想。

耳石 $L_1$ 、 $S_1$ 与体质量拟合程度最佳的函数为幂函数(图4),且 $L_1$ 、 $L_4$ 和 $S_1$ 与体质量之间关系显著( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 左右耳石形态特征的对称性与差异性

本研究对长江口棘头梅童鱼左右耳石的形态特征进行了系统分析。结果表明,耳石的长度、宽度、最大半径、最小半径、周长、面积以及长宽比等形态参数的平均值与标准差整体较为接近,表明其形态表现出良好的对称性。主成分分析(PCA)进一步指出,耳石长度( $L_1$ )、最小外接矩形面积( $S_1$ )和半径比( $L_4$ )等参数可有效代表耳石的整体形态特征,尤其是在耳石长度和最小外接矩形面积方面,左右耳石之间差异较小。

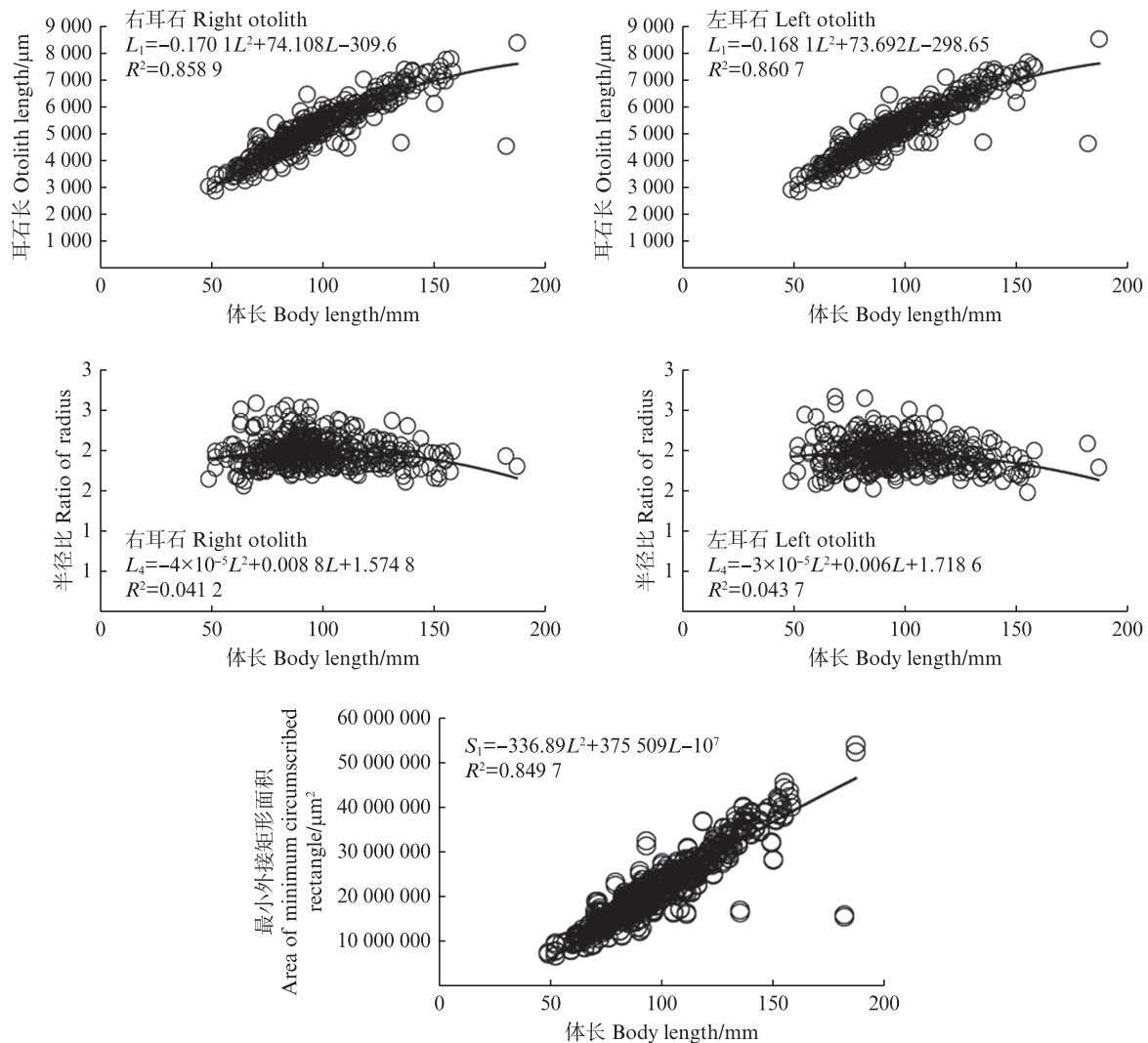


图3 棘头梅童鱼耳石主要形态指标与其体长关系

Fig. 3 Relationship between primary morphological parameters of otolith and body length of *Collichthys lucidus*

然而,配对样本  $t$  检验结果显示,左右耳石在最小半径、半径比、周长和面积等部分参数上存在显著差异 ( $P < 0.05$ ),这可能与棘头梅童鱼个体生长过程中的微环境差异、外部环境条件或遗传因素相关。已有研究指出,鱼类耳石的形态变异往往与其生长环境密切相关,VIGNON 等<sup>[19]</sup>的研究发现,环境因子的空间异质性可能引起耳石形态参数(如半径比)的显著差异;HÜSSY 等<sup>[20]</sup>则指出水温的波动会导致耳石生长速率的不对称,进而影响其几何结构。基于上述结果,未来研究可进一步关注长江口不同海区的温度、盐度等环境因子的变化对耳石形态发育的潜在影响。

### 3.2 耳石主要形态参数与体长的关系

研究表明,耳石长度( $L_1$ )与体长之间存在极显著的二次多项式关系 ( $R^2 > 0.85$ ),最外接矩形面积( $S_1$ )与体长的关系也表现出较好的拟合效果 ( $R^2 = 0.849 7$ ),这说明二次多项式函数能够较好地描述棘头梅童鱼耳石形态与体长之间的非线性增长模式,可能反映了鱼类生长过程中耳石沉积速率的变化。然而,不同研究对耳石形态与体长关系的结论存在差异,如麻秋云等<sup>[21]</sup>对胶州湾 12 种饵料鱼类耳石与体长关系的研究证明,耳石形态与体长之间呈现显著的线性关系,而王旭等<sup>[22]</sup>则发现耳石的长度与体长呈现较强的线性相关性。这些差异可能源于物种特异性、生长阶段或环境因素的影响。

表6 棘头梅童鱼耳石主要参数与体质量拟合方程

Tab. 6 Fitting equations for the relationship between otolith main parameters and body mass of *Collichthys lucidus*

生长关系 Growth relationship	函数类型 Function	拟合方程 Equation	$R^2$	$R$
右耳石长( $L_1$ )-体质量( $W$ ) Right otolith length and body mass	指数函数	$L_1=4\ 152.8e^{0.012\ 3W}$	0.708 5	0.841 7
	直线	$L_1=66.956W+4\ 072.9$	0.803 3	0.896 3
	对数函数	$L_1=1\ 306.2\ln W+1\ 836.2$	0.905 6	0.951 6
	二次多项式	$L_1=-0.853\ 1W^2+117.02W+3\ 615.8$	0.877 1	0.936 5
	幂函数	$L_1=2\ 660.7W^{0.253\ 5}$	0.910 4	0.954 1*
右耳石半径比( $L_4$ )-体质量( $W$ ) Right otolith radius ratio and body mass	指数函数	$L_4=2.002\ 4e^{-7\times 10^{-4}W}$	0.011 9	0.109 1
	直线	$L_4=-0.001\ 5W+2.011\ 1$	0.012 1	0.110 0
	对数函数	$L_4=-0.004\ln W+1.995\ 7$	0.000 2	0.014 1
	二次多项式	$L_4=-6\times 10^{-5}W^2+0.002\ 1W+1.978\ 5$	0.023 1	0.152 0*
	幂函数	$L_4=1.983\ 3W^{-0.001}$	0.000 2	0.014 1
左耳石长( $L_1$ )-体质量( $W$ ) Left otolith length and body mass	指数函数	$L_1=4\ 142.6e^{0.012\ 4W}$	0.712 8	0.844 3
	直线	$L_1=66.994W+4\ 062$	0.806 7	0.898 2
	对数函数	$L_1=1\ 306.1\ln W+1\ 826.3$	0.908 2	0.953 0
	二次多项式	$L_1=-0.838\ 7W^2+116.22W+3\ 612.6$	0.878 3	0.937 2
	幂函数	$L_1=2\ 651W^{0.254\ 1}$	0.913 0	0.955 5*
左耳石半径比( $L_4$ )-体质量( $W$ ) Left otolith radius ratio and body mass	指数函数	$L_4=1.994\ 6e^{-0.001W}$	0.032 3	0.179 7
	直线	$L_4=-0.002\ 5W+2.003$	0.032 7	0.180 8
	对数函数	$L_4=-0.027\ln W+2.030\ 3$	0.011 1	0.105 4
	二次多项式	$L_4=-5\times 10^{-5}W^2+0.000\ 3W+1.977\ 3$	0.039 4	0.198 5*
	幂函数	$L_4=2.017\ 8W^{-0.013}$	0.010 9	0.104 4
耳石最小外接矩形面积( $S_1$ )-体质量( $W$ ) Area of minimum circumscribed rectangle and body mass	指数函数	$S_1=10^7e^{0.024\ 2W}$	0.655 9	0.809 9
	直线	$S_1=551\ 829W+10^7$	0.871 0	0.933 3
	对数函数	$S_1=10^7\ln W-5\times 10^6$	0.884 9	0.940 7
	二次多项式	$S_1=-4\ 780.8W^2+832\ 421W+9\times 10^6$	0.908 0	0.952 9
	幂函数	$S_1=5\times 10^6W^{0.496\ 6}$	0.920 4	0.959 4*

注:\*表示拟合度最高。

Notes: \* means maxium degree of fitting.

与此相对,耳石半径比( $L_4$ )与体长的拟合效果较差,二次多项式函数的拟合度仅为0.04,这一结果反映了耳石半径比与体长之间的关系较为复杂,可能受到耳石几何形态特征和鱼类个体差异的影响。彭露等<sup>[23]</sup>的研究也指出,耳石半径比与体长之间的相关性较弱,这表明耳石半径比更多地反映了耳石的几何特征,而非生长的直接反应。

### 3.3 耳石主要形态参数与体质量的关系

与耳石形态和体长的关系相似,耳石长度( $L_1$ )和最小外接矩形面积( $S_1$ )与体质量之间的关系表现出显著的幂函数关系( $R^2>0.91$ )。这一结果表明,耳石形态与体质量之间的关系较为密切,且幂函数拟合效果最佳,支持了耳石作为反映鱼类生长状态的有效指标。这与方聪等<sup>[24]</sup>的

研究结果一致,耳石的形态参数可以很好地反映鱼体的生长过程,尤其是在体质量增长较快的阶段。然而,二次多项式对耳石半径比( $L_4$ )与体质量的拟合度虽较体长有所提高,但仍未达到显著水平( $R^2<0.04$ )。这一结果进一步支持了 $L_4$ 主要反映耳石的几何形状而非生物学生长的假设。这主要由于耳石的半径比会受多种因素的影响,包括环境变化、种群间的差异以及鱼类的营养状态,这使得 $L_4$ 与体质量的关系表现较为复杂。很难通过简单的函数拟合进行分析。因此耳石长度( $L_1$ )和最小外接矩形面积( $S_1$ )是反映棘头梅童鱼生长状态的有效形态指标,而耳石半径比( $L_4$ )与体长、体质量的关系较弱,提示该参数更适用于描述耳石的几何形状而非生长过程。

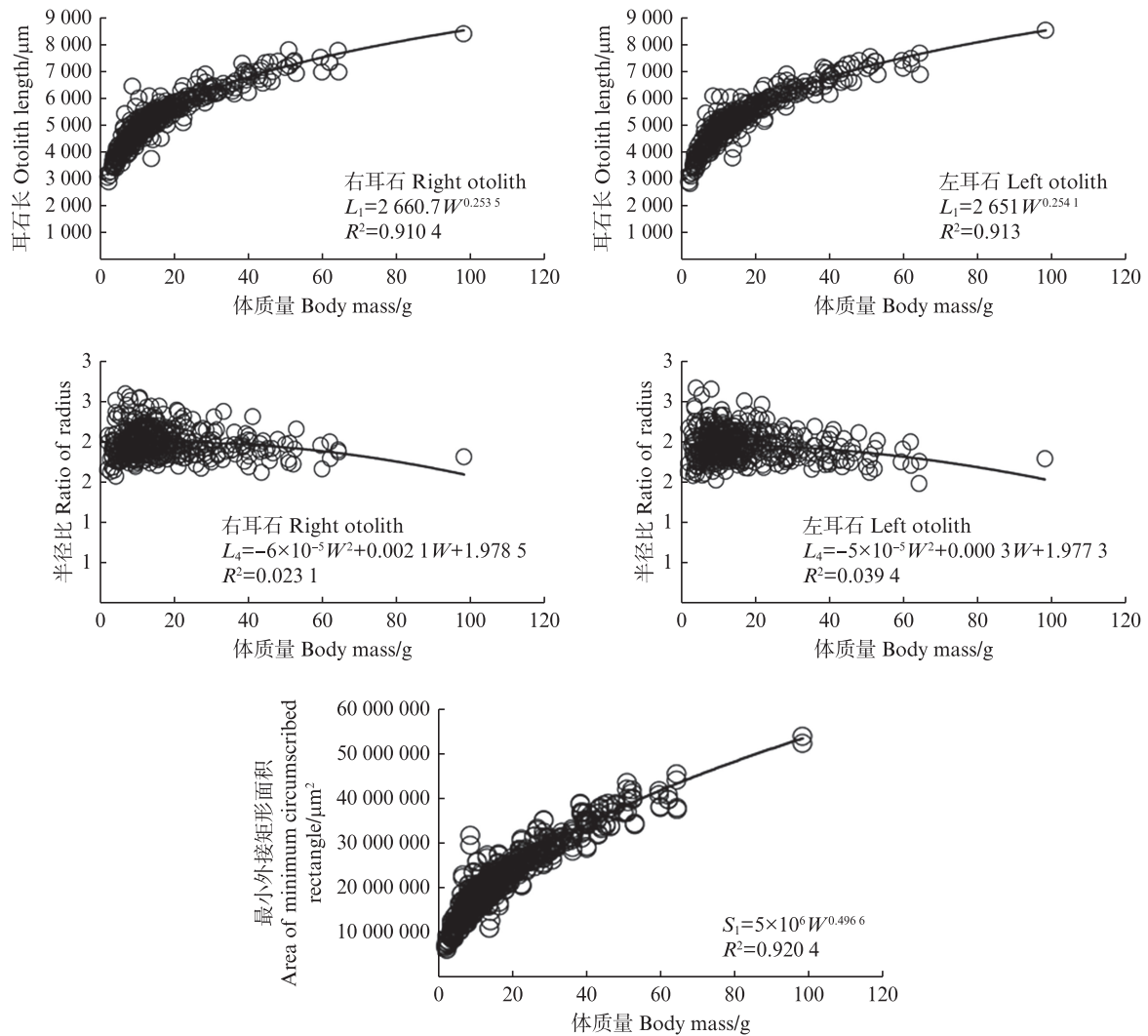


图4 棘头梅童鱼耳石主要形态指标与其体质量关系

Fig. 4 Relationship between primary morphological parameters of otolith and body mass of *Collichthys lucidus*

本研究采用二次多项式和幂函数模型进行拟合,通过耳石的形态参数为后续评估鱼类体长和体质量提供了理论依据,也为渔业资源监测与管理提供了新的思路和方法支持。研究结果显示,棘头梅童鱼左右耳石在整体形态上具有较强的对称性,但在耳石长、最小半径、周长等特征参数上仍表现出统计学上的显著差异。这一现象与个体在不同发育阶段、游动习性或微环境差异下耳石生长速度的变化有关,提示耳石形态可能受到复杂内外部因子的共同调控。进一步而言,耳石不仅能反映鱼类的生长状况,还会对水体盐度、温度、食物供给、底质类型等栖息地条件表现出高度敏感性。因此,未来可从环境因子对耳石形态形成机制的影响路径入手,结合稳定同位素、元素分析或生态模型,探讨其在个体生理调

节与环境适应中的功能意义,从而深化耳石研究在渔业生态学中的应用价值。

本次研究的样本量相对较小,未来研究可以增加样本数量,并涵盖更多季节和栖息地的数据,以提高结论的普遍性和可靠性。

#### 4 结论

本研究系统地探讨了长江口棘头梅童鱼耳石形态与体长、体质量之间的关系,为耳石在渔业资源监测中的应用提供了实证数据支持。研究表明,耳石长( $L_1$ )和最小外接矩形面积( $S_1$ )与体长、体质量的关系较为显著,尤其是二次多项式函数和幂函数模型在拟合这些关系时表现优越。未来的研究可进一步深入分析不同环境因素对耳石形态差异的影响,以提高耳石作为生长



状态指示物的应用广度。

作者声明本文无利益冲突。

# 参考文献:

- [1] ZHANG S, LI M, ZHU J F, et al. An integrated approach to determine the stock structure of spinyhead croaker *Collichthys lucidus* (Sciaenidae) in Chinese coastal waters[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 693954.
- [2] 吴常文, 王伟宏. 浙江近海棘头梅童鱼的分布生物学与资源变动[J]. *海洋渔业*, 1991(1): 6-10.  
WU C W, WANG W H. The Distribution, Biology and fluctuation of stock of *Collicdthys Lueidus* in the offshore waters of Zhejiang[J]. *Marine Fisheries*, 1991(1): 6-10.
- [3] GAN W, ZHAO C X, LIU X R, et al. Whole-genome sequencing and genome-wide studies of spiny head croaker (*Collichthys lucidus*) reveals potential insights for well-developed otoliths in the family Sciaenidae [J]. *Frontiers in Genetics*, 2021, 12: 730255.
- [4] 石娟, 刘永, 李纯厚, 等. 珠江口棘头梅童鱼营养生态位研究[J]. *南方水产科学*, 2024, 20(3): 56-65.  
SHI J, LIU Y, LI C H, et al. Trophic niche analysis of *Collichthys lucidus* in Pearl River Estuary [J]. *South China Fisheries Science*, 2024, 20(3): 56-65.
- [5] 贺舟挺, 薛利建, 金海卫. 东海北部近海棘头梅童鱼食性及营养级的探讨[J]. *海洋渔业*, 2011, 33(3): 265-273.  
HE Z T, XUE L J, JIN H W. On feeding habits and trophic level of *Collichthys lucidus* in inshore waters of northern East China Sea[J]. *Marine Fisheries*, 2011, 33(3): 265-273.
- [6] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴-2015 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 59-63.  
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fishery statistical yearbook-2015 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 59-63.
- [7] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2023[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 59-64.  
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook-2023 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023: 59-64.
- [8] 张成功, 王婷, 韩东燕, 等. 长江“十年禁渔”初期长江口水域渔业资源变动[J/OL]. *水生生物学报*, 2025, 49(8). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1230.q.20250429.0951.004.html>.  
ZHANG C G, WANG T, HAN D Y, et al. Changes in fishery resources communities in the Yangtze River estuary during the initial period of “10-Year Fishing Ban” on the Yangtze River [J/OL]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(8). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1230.q.20250429.0951.004.html>.
- [9] 何文平. 鱼类耳石形态研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(30): 14760-14762.  
HE W P. Review of fish otolith morphology research[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(30): 14760-14762.
- [10] 兰永伦, 罗秉征. 大黄鱼耳石、体长与年龄的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27(3): 323-329.  
LAN Y L, LUO B Z. Relationship among body length, otolith and age of the large croaker *Pseudosciaena crocea* [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 27(3): 323-329.
- [11] 黄庆竹, 黄慧娟, 李建华, 等. 基于耳石微化学 Sr/Ca 的浙江南部近海银姑鱼的生境履历重建[J]. *上海海洋大学学报*, 2024, 33(3): 768-775.  
HUANG Q Z, HUANG H X, LI J H, et al. Reconstruction of habitat history of *Pennahia argentata* in the offshore waters of southern Zhejiang based on otolith microchemical Sr/Ca [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024, 33(3): 768-775.
- [12] MACEINA M J, BETSILL R K. Verification and use of whole otoliths to age white crappie [M]//SUMMERFELT R C, HALL G E. Age and Growth of Fish. Ames, Iowa: Iowa State University Press, 1987: 267-278.
- [13] 张伊宁, 刘必林, 谈雅婷, 等. 西北太平洋公海加利福尼亚标灯鱼年龄和生长[J]. *上海海洋大学学报*, 2025, 34(2): 320-332.  
ZHANG Y N, LIU B L, DAN Y T, et al. Age and growth of *Symbolphorus californensis* in the high sea of Northwest Pacific Ocean [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2025, 34(2): 320-332.
- [14] CAMPANA S E, THORROLD S R. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(1): 30-38.
- [15] 潘剑波, 陈玉山. 鲤鱼生长曲线参数的估计及模型选择[J]. *渔业科学*, 2006, 23(5): 111-116.  
PAN J B, CHEN Y S. Estimation and model selection of growth curve parameters for common carp [J]. *Fisheries Science*, 2006, 23(5): 111-116.
- [16] 李志明, 吴志刚. 鱼类个体生长模型的比较研究[J]. *水产科学*, 2008, 27(2): 45-50.  
LI Z M, WU Z G. Comparative study on individual growth models of fish [J]. *Fisheries Science*, 2008, 27(2): 45-50.
- [17] 王国生, 刘建国. 鱼类生长曲线中对数模型的应用与评价[J]. *海洋渔业*, 2005, 10(3): 89-93.

- WANG G S, LIU J G. Application and evaluation of logarithmic models in fish growth curves [J]. Marine Fisheries, 2005, 10(3): 89-93.
- [18] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [19] 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: 231-241.
- [20] HÜSSY K, MOSEGAARD H, JESSEN F. Effect of age and temperature on amino acid composition and the content of different protein types of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) otoliths [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2004, 61(6): 1012-1020.
- [21] 麻秋云, 薛莹, 徐宾铎, 等. 胶州湾 12 种饵料鱼类耳石大小与体长的关系[J]. 水生生物学报, 2013, 37(3): 481-487.
- MA Q Y, XUE Y, XU B D, et al. Relationships between otolith size and fish size for twelve prey fish species from Jiaozhou Bay[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(3): 481-487.
- [22] 王旭, 韩志强, 朱柏军, 等. 东海小黄鱼耳石形态特征研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2012, 31(6): 492-496.
- WANG X, HAN Z Q, ZHU B J, et al. Morphologic features of statolith for *Pseudosciaena polyactis* in the East China Sea[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2012, 31(6): 492-496.
- [23] 彭露, 江艳娥, 徐姗楠, 等. 南海北部陆架区金线鱼矢耳石形态及其与体长、体质量关系[J]. 南方水产科学, 2018, 14(6): 27-33.
- PENG L, JIANG Y E, XU S N, et al. Otolith morphology of *Nemipterus virgatus* and its relation to body length and mass in continental shelf of northern South China Sea [J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(6): 27-33.
- [24] 方聪, 郭治明, 线微微, 等. 耳石形态在长江口小黄鱼生活史研究及群体识别中的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(8): 57-67.
- FANG C, GUO Z M, XIAN W W, et al. The application of otolith morphology in life history and group recognition of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in the Yangtze River estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(8): 57-67.

## Otolith morphological characteristics of *Collichthys lucidus* in the Yangtze River Estuary

YANG Chen<sup>1</sup>, ZHANG Chenggong<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>2,3</sup>, LI Jianhua<sup>1,3</sup>, ZHAO Jing<sup>1,3</sup>, CHEN Jinhui<sup>2,3</sup>

(1. School of Marine Biological Resources and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Research Center for Aquatic Wildlife Conservation, Shanghai 200125, China; 3. Joint Laboratory for Monitoring and Protection of Aquatic Organisms in the Estuary of the Yangtze River, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** To investigate the otolith morphological characteristics of *Collichthys lucidus* in the Yangtze River estuary and their relationships with individual growth traits (body length and body mass), a total of 409 specimens were collected from June 2022 to May 2023. Nine otolith morphometric parameters, including length, width, perimeter, area, maximum radius, minimum radius, minimum bounding rectangle area, aspect ratio and radius ratio were systematically measured on both left and right otoliths. Principal component analysis (PCA) was used to extract the key variables representing otolith shape variation. Subsequently, the relationships between otolith morphological indicators and body length/weight were analyzed and fitted using exponential, linear, logarithmic, power, and polynomial functions. The results indicated high consistency in major morphological parameters between left and right otoliths. However, significant differences ( $P < 0.05$ ) were observed in specific parameters: otolith length ( $L_1$ ), length-to-width ratio ( $L_3$ ), minimum radius ( $r$ ), radius ratio ( $L_4$ ), and perimeter ( $P_1$ ). PCA revealed that otolith length, minimum bounding rectangle area, and radius ratio were the most influential variables in shape variation. Among them, minimum bounding rectangle area showed no significant difference between sides ( $P > 0.05$ ), and thus data were pooled for further analysis. Polynomial models best described the relationships between otolith length and rectangle area with body length ( $R^2 > 0.85$ ,  $P < 0.05$ ), whereas power function models performed best in fitting their relationships with body weight ( $R^2 > 0.91$ ). The radius ratio showed poor correlation with both growth indices. This study demonstrates that otolith length and minimum bounding rectangle area can serve as effective predictors of individual growth in *C. lucidus*. These findings provide a theoretical basis for understanding the linkage between otolith morphology and fish growth, and offer practical insights for fisheries resource assessment and species management.

**Key words:** *Collichthys lucidus*; otolith; morphological characteristics; growth relationship