

Guo H Y, Zhang Y, Tang W Q, *et al.* Temporal trends and sex-specific variation in growth characteristics of *Coilia nasus* in the Taizhou section of the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(12): 122503. [郭弘艺, 张亚, 唐文乔, 等. 长江泰州段刀鲚群体生长特征的时间趋势和性别差异 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(12): 122503.]

长江泰州段刀鲚群体生长特征的时间趋势和性别差异

郭弘艺^{1#} 张亚^{1#} 唐文乔^{1*} 刘凯^{2*}

(1. 上海海洋大学海洋动物系统分类与进化上海高校重点实验室, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 无锡 214081)

摘要: 为评估长江十年禁渔政策对刀鲚(*Coilia nasus*)种群恢复的生态效应, 研究基于2005、2009、2012和2024年汛期在长江泰州江段采集的958尾样本, 运用基于信息准则的多模型推理方法, 系统分析了刀鲚群体生长特征的时序动态变化。研究结果表明: (1)种群年龄结构显著优化, 由以1—2龄为主的低龄化结构转向以3+龄为主的高龄化结构, 其中3—4龄个体所占比例从2009年的24.7%显著提升至2024年的72.4%, 雌雄性比从0.69:1恢复至2.66:1; (2)群体形态学指标呈现典型的“U形”恢复模式, 平均体长从2009年的历史低值24.2 cm增长至2024年的29.6 cm, 平均体重从58.4 g增加至105.0 g, 增幅分别达22.3%和79.8%; (3) von Bertalanffy生长模型的拟合效果最优, 生长参数表现出显著的性别二态性: 雌性个体的渐近体长显著大于雄性(L_{∞} : 雌性39.05 cm, 雄性32.63 cm), 但生长系数小于雄性(k 值: 雌性0.41, 雄性0.56), 体现了“慢生长—大体形”的生活史策略, 而雄性则采取“快生长—小体型”策略; 时序分析显示, L_{∞} 与 k 分别呈“U形”和“倒U形”的恢复轨迹; (4)种群恢复存在性别差异, 雌性个体已完全恢复至2005年水平并有所增强, 雄性个体虽有改善但恢复程度相对滞后。研究证实长江十年禁渔政策对刀鲚种群保护与资源恢复产生了显著的积极效应, 为长江流域水生生物多样性保护成效评估提供了重要的实证支撑。

关键词: 生长参数; 种群动态; 性别二态性; 禁渔效果; 刀鲚

中图分类号: S932.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2025)12-122503-11

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0125 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0125



刀鲚(*Coilia nasus*)是一种中小型洄游性鱼类, 隶属于鲱形目(Clupeiformes)鲱科(Engraulidae), 主要分布于中国、日本和朝鲜半岛的沿海及内陆水域^[1]。在中国长江流域, 刀鲚可分为两种不同的生态类型: 定居型和溯河型。其中, 定居型刀鲚包括淡水生活的短颌鲚(*Coilia brachygnathus*)和因湖泊隔离形成的太湖湖鲚(*C. nasus taihuensis*)^[2, 3]。近期分子系统学研究表明, 短颌鲚可能具备独立物种地位^[4], 而太湖湖鲚仍保持亚种地位。值得注意的是, 耳石微化学分析发现, 尽管短颌鲚主要在淡水中生活, 在长江中存在参与江海洄游的短颌鲚个体^[5]。

相较于定居型, 溯河型刀鲚在形态学上具有显著延长的上颌骨等特征, 其繁殖行为呈现周期性时序差异——每年2—6月, 不同批次的种群从海洋溯游至淡水产卵场进行繁殖^[6]。历史监测数据显示, 溯河型刀鲚最远洄游距离可达1000 km, 至洞庭湖产卵, 完成繁殖后, 亲鱼及其后代返回海洋生活^[7]。就渔业价值而言, 溯河型刀鲚则与长江鲥(*Tenualosa reevesii*)和暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)并称为“长江三鲜”, 在长江流域具有重要的经济和文化价值, 而定居型刀鲚通常被视为低价值渔获^[8, 9]。

自20世纪70年代以来, 长江刀鲚资源持续衰退。

收稿日期: 2025-04-14; 修订日期: 2025-06-24

基金项目: 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD11)资助 [Supported by Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD11)]

作者简介: 郭弘艺(1980—), 女, 工程师; 主要从事保护生物学研究。E-mail: hy-guo@shou.edu.cn 张亚(1987—), 男, 博士, 工程师; 主要从事鱼类生态学研究。E-mail: zhangya@shou.edu.cn [#]共同第一作者

通信作者: 唐文乔(1964—), 男, 教授; E-mail: wqtang@shou.edu.cn 刘凯(1980—), 男, 研究员; E-mail: liuk@ffrc.cn ^{*}共同通信作者

监测数据表明, 其年产量从1973年峰值的3750吨, 锐减至2012年的仅57.5吨, 降幅达98.5%^[8]。这一显著衰退主要归因于长期过度捕捞和栖息地质量持续退化的叠加效应。研究发现, 该物种在捕捞操作中表现出极高应激敏感性, 导致组织创伤和高致死率, 严重制约人工繁育与增殖放流的技术效能^[10]。鉴于其严峻的资源现状, 世界自然保护联盟(IUCN)于2018年将刀鲚评估为濒危(EN)物种。为保护和恢复长江刀鲚资源, 中国农业农村部自2019年起逐步实施禁捕措施, 包括全面禁止刀鲚生产性捕捞、扩大长江口禁捕范围, 并于2021年1月1日正式启动长江十年禁渔计划^[8]。

长江禁捕政策实施以来, 多项研究证实刀鲚资源呈现明显的恢复趋势。长江口水域的监测结果显示, 2021年刀鲚平均体长和体重较2019—2020年分别增加4.41%和37.55%, 资源密度显著提高^[11]。类似地, 江苏海域的研究表明, 禁捕后刀鲚渔获规格逐渐增大, 全长和体重呈增长趋势, 种群资源恢复明显^[12]。鄱阳湖的监测数据进一步显示, 禁捕初期刀鲚汛期提前, 持续时间延长, 种群小型化趋势改善, 资源密度显著提升, 均反映出资源恢复的积极信号^[13]。然而, 现有研究多集中于资源量和分布特征的评估^[11-23], 缺乏对禁捕后溯河型刀鲚种群生物学特征深层次变化机制的系统性分析, 特别是在性别结构、年龄组成及生长特性等层面。鉴于此, 本研究以长江泰州段刀鲚洄游群体为研究对象, 通过构建性比结构、年龄组成、体长-体重关系与生长模型参数等多维指标体系, 系统阐释了其生长特性、性别二态性及时间演变规律, 旨在为深入理解刀鲚衰退机制和制定科学保护策略提供重要的理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 采样与标本处理

鉴于长江刀鲚的生产性捕捞已于2019年正式禁止。在禁渔政策实施前(2005、2009和2012年)的5—6月刀鲚汛期, 随机从持有刀鲚捕捞许可证的生产船上采集样本。禁渔后期(2024年), 经江苏省农业农村委员会批准并在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心科研调查船的协助下完成样本采集。4个年份的采样点均位于长江泰州段(32°12'14"N, 119°53'40"E), 采样网具均为规格统一的流刺网(网目尺寸4 cm, 网长180 m, 网高4 m)。所获样本经冰鲜保存后运回实验室进行测量。使用量鱼板测量标准体长(精确至0.1 cm), 并用电子天平称量体重(精确至0.1 g)。通过形态学鉴定并测量上颌骨长与

头长比值(>1.0), 确认采集的所有标本为刀鲚。

1.2 性别与年龄鉴定

性别鉴定采用徐钢春等^[24, 25]建立的性腺形态特征观察法。年龄鉴定则依据袁传宓^[15]的鳞片和耳石双重验证法进行。具体步骤: 首先在背鳍起点下方、侧线以上区域选取5—10片鳞片, 同时挖取矢耳石作为鉴定材料。鳞片经蒸馏水清洗后置于载玻片上; 矢耳石经横截面切片处理备用。两名经验丰富的研究人员在不知晓标本生物学信息的情况下, 使用光学显微镜(Zeiss Axio Lab.A1)独立进行年龄鉴定。在透射光下, 年龄判定以鳞片密环带和耳石不透明带为依据, 这些结构形成于生长缓慢时期。当两人判读结果一致时, 即认定为该标本的年龄; 若出现分歧, 则通过耳石不透明带计数进行复核, 复核后仍有分歧的样本予以剔除。在本研究中, 958尾样本的鳞片年龄鉴定中有9尾(0.9%)存在分歧, 但通过耳石复核后均达成一致, 整体年龄鉴定一致性达100%。

1.3 体长-体重关系分析

刀鲚的体重(W)与体长(L)关系通过幂函数方程(1)进行估算:

$$W = a \times L^b \quad (1)$$

式中, a 为系数, b 为指数。通过单样本 t 检验评估指数 b 是否显著偏离3, 以判断生长类型是否为等速生长^[26]。

协方差分析(Analysis of Covariance, ANCOVA)检验不同年份(2005、2009、2012和2024年)和性别的数据是否可以合并。以体长为协变量, 分别检验年份和性别的主效应及其与体长的交互作用。若年份效应(主效应和交互作用)显著($P < 0.05$), 则按年份分别分析; 若不显著($P > 0.05$), 则合并年份数据。基于相同的统计判断标准, 若性别效应显著, 则对雌雄分别建模; 若不显著, 则合并性别数据进行分析。

1.4 生长模型的选择评估及生长参数分析

基于信息理论的多模型推理方法^[27], 从4个候选模型中确定刀鲚群体的最佳生长模型: von Bertalanffy生长模型(VBGM)^[28]及3种S型模型(Gompertz模型^[29]、Logistic模型^[30]和Richards模型^[31])。前三种模型为三参数模型, Richards模型为四参数模型。

各生长模型的数学表达式:

$$\text{von Bertalanffy模型: } L_t = L_{\infty}(1 - e^{-k(t-t_0)}) \quad (2)$$

$$\text{Gompertz模型: } L_t = L_{\infty}e^{-e^{-k(t-t_0)}} \quad (3)$$

$$\text{Logistic模型: } L_t = L_{\infty}(1 + e^{-k(t-t_0)})^{-1} \quad (4)$$

$$\text{Richards模型: } L_t = L_{\infty} \left[1 + \left(\frac{1}{p} \right) e^{-k(t-t_0)} \right]^{-p} \quad (5)$$

式中, L_t 表示年龄 t 时的标准体长(cm), L_{∞} 为渐近体长, k 为生长系数, p 为Richards模型的无量纲参数, t_0 为von Bertalanffy模型中理论体长等于0时的年龄, 或其他模型中生长曲线的拐点年龄, Richards模型是广义的von Bertalanffy模型^[32]。

模型选择采用校正赤池信息准则(Akaike's Information Criterion for small sample sizes, AICc)^[33]。在所有候选模型中, AICc值最小的模型(AICc_{min})被确定为“最佳”模型。随后, 计算各候选模型 i 的AICc差值($\Delta_i = \text{AICc}_i - \text{AICc}_{\min}$)。为量化模型可信度, 基于AICc差值计算Akaike权重(Akaike weight, w_i), 计算公式^[27]:

$$w_i = \frac{e^{(-0.5\Delta_i)}}{\sum_{i=1}^4 e^{(-0.5\Delta_i)}} \quad (6)$$

式中, n 为模型数量。Akaike权重值越大, 表明该模型作为最佳模型的证据越强。

生长表现指数(Φ')计算公式^[34]:

$$\Phi' = \log_{10}(k) + 2\log_{10}(L_{\infty}) \quad (7)$$

式中, L_{∞} 为渐近体长, k 为生长系数。

1.5 生长特征的时间趋势分析

为量化禁渔政策实施前后刀鲚群体生长模式的时间动态, 采用两种方法进行分析。首先, 基于1.4节确定的最优生长模型计算体长残差(观测体长与模型预测体长的差值), 该残差反映个体生长相对于群体平均生长模式的偏离程度。采用广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)^[35]分析年份对体长残差的影响, 分别测试线性模型和非线性立方样条模型, 通过比较AICc值确定最优拟合关系。其次, 构建生长参数动态模型, 将渐近体长(L_{∞})和生长系数(k)分别表示为年份的常数、线性函数或二次函数, 基于这些函数组合共构建9种候选模型。使用最小二乘法拟合年龄-体长数据, 通过AICc值和Akaike权重筛选最优模型, 分析2005—2024年刀鲚群体的渐近体长(L_{∞})和生长系数(k)的时间变化趋势。

1.6 统计分析

采用卡方检验(χ^2)分析不同年份间的性别组成差异。并通过双因素方差分析(Two-way analysis of Variance, ANOVA)和Tukey事后检验评估年份和性别对年龄组成的影响。由于体长和体重数据均未

通过Shapiro-Wilk正态性检验($P < 0.05$), 因此采用非参数Kruskal-Wallis检验评估体长和体重在年际和性别间的差异。所有统计分析均在R 4.1.1软件中进行^[36]。

2 结果

2.1 性比和年龄

性别组成分析显示, 长江泰州段刀鲚群体中雌性个体占总数的60.3% ($n=578$), 雄性个体占39.7% ($n=380$), 呈现雌性偏向特征。卡方检验结果表明, 不同年份间的性别比例存在显著差异($P < 0.05$)。种群性比(雌:雄)呈现明显的年际波动: 2005年为1.52:1, 2009年降至0.69:1, 2012年回升至1.27:1, 2024年则增至2.66:1 (图1a)。

年龄结构分析表明, 研究样本包含1—4龄共四个年龄组, 其中2—3龄个体占总样本的85.8%, 为群体的主体构成。双因素方差分析结果显示, 采样年份($F=99.25$, $P < 0.05$)和性别($F=220.29$, $P < 0.05$)对年龄分布均具有显著影响, 且两因素间存在显著交互作用($F=6.89$, $P < 0.05$)。Tukey事后检验表明, 雄性个体的平均年龄(2.0 ± 0.6)显著低于雌性(2.7 ± 0.6)

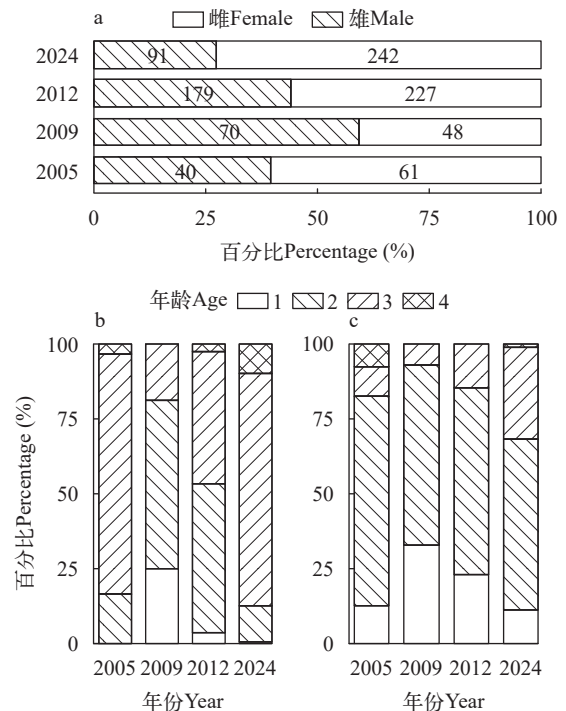


图1 长江泰州段刀鲚群体结构的时间动态

Fig. 1 Temporal dynamics of *C. nasus* population structure in the Taizhou section of the Yangtze River

a. 性比组成; b. 雌性年龄组成; c. 雄性年龄组成

a. sex ratio composition; b. female age composition; c. male age composition

($P<0.05$)。

种群年龄结构的年际变化分析, 雌性群体经历显著的结构转变: 2005年以3龄个体为主(80.3%); 2009年转变为2龄个体优势(56.2%); 2012年呈现2龄(49.8%)和3龄(44.1%)共同主导的结构; 2024年则显著向高龄方向偏移, 以3龄(77.7%)和4龄(9.2%)个体为主(图 1b)。雄性群体始终以2龄个体为主导(57.1%—70.0%), 但年龄组成同样呈现明显波动。2009—2012年, 低龄组(1—2龄)占比维持在80%以上; 而2024年群体结构发生明显变化, 3龄比例增至30.8%, 且4龄个体(1.1%)重现(图 1c)。总体而言, 2009—2024年, 刀鲚种群呈现出明显的年龄结构演变趋势: 雌雄群体均呈现低龄组(1—2龄)比例下降、高龄组(3—4龄)比例上升的特征。

2.2 体长和体重

长江泰州段刀鲚群体的平均体长(27.5 ± 4.1) cm [范围: (14.2—36.5) cm], 平均体重(84.6 ± 37.4) g [范围: (9.2—218.3) g]。Mann-Whitney U检验显示, 雌性个体在体长和体重上均显著大于雄性($P<0.05$)。其中, 雌性平均体长(29.1 ± 3.6) cm, 平均体重(100.1 ± 35.5) g; 雄性平均体长(24.9 ± 3.5) cm, 平均体重(61.0 ± 26.1) g (表 1)。

Kruskal-Wallis检验表明, 群体的体长和体重在年际间存在显著差异($P<0.05$), 且雌性个体的体长和体重始终显著大于同期雄性(表 1)。群体形态参数呈现“U形”波动格局: 从2005年的较高水平下降至2009年的最低点(雌性: 平均体长25.0 cm, 平均体重63.5 g; 雄性: 平均体长23.6 cm, 平均体重54.9 g), 随后自2012年开始回升, 至2024年已基本恢复或超过初期水平。小型个体(体长<20 cm和体重<40 g)的比例变化呈现明显的阶段性特征: 2005年较低, 雌性群体中此类个体比例分别为0和1.6%, 雄性为10.0%和27.5%; 2009年达到峰值, 雌性分别增至14.6%和22.9%, 雄性升至15.7%和40.0%; 2012年开始回落, 至2024年雌性群体中小型个体完全消失,

雄性也显著下降至4.4%和7.7%。这一先升后降的变化趋势形成清晰的“U形”模式, 与群体形态参数的时间动态特征完全吻合。

协方差分析结果表明, 体长与体重之间的关系在年际间无显著差异(年份主效应: $F=2.13$, $P=0.095$; 年份与体长交互作用: $F=2.35$, $P=0.071$), 这表明年际间的体长—体重关系保持相对稳定, 因此可将不同年份的数据合并进行后续分析。然而, 雌雄群体之间的体长—体重关系存在显著差异(性别主效应: $F=5.58$, $P<0.05$; 体长与性别交互作用: $F=4.83$, $P<0.05$), 表明雄性和雌性群体的体长—体重关系斜率有所不同。据此, 分别建立了雌雄群体的体长—体重关系式方程:

雌性: $W_{\text{♀}}=0.0034\times L^{3.04}$ (95%置信区间: $a=0.0024-0.0047$; $b=2.94-3.14$, $r=0.9452$);

雄性: $W_{\text{♂}}=0.0028\times L^{3.09}$ (95%置信区间: $a=0.0022-0.0035$; $b=3.03-3.16$, $r=0.9624$)。

两性群体的幂指数 b 均显著大于3 ($P<0.05$), 表明该物种呈现正异速生长(图 2)。

2.3 生长模型选择和参数估算

通过比较 ΔAICc 值和 w_i , 对4种候选生长模型进行系统评估, 结果表明VBGM模型最适合描述刀鲚群体生长特征。在雌性群体中, VBGM模型获得最高支持度($w_i=0.39$), 其次是Gompertz模型($\Delta\text{AICc}=0.479$, $w_i=0.30$)和 Logistic模型 ($\Delta\text{AICc}=1.253$, $w_i=0.20$)。雄性群体呈现相似的模型选择格局, VBGM获得最高支持($w_i=0.32$), 而Gompertz模型($\Delta\text{AICc}=0.166$, $w_i=0.29$)和 Logistic模型 ($\Delta\text{AICc}=0.361$, $w_i=0.27$)的支持度亦相当接近。值得注意的是, 理论上更为灵活的Richards模型在两性群体中均表现出最低支持度(雌: $\Delta\text{AICc}=2.571$, $w_i=0.11$; 雄: $\Delta\text{AICc}=2.227$, $w_i=0.12$; 表 2)。这表明刀鲚的生长模式更符合VBGM所描述的典型渐近生长特性, 但Gompertz和Logistic模型也能为雄性个体提供良好的生长描述。

基于VBGM模型构建的生长曲线显示, 雌雄刀

表 1 长江泰州段刀鲚群体的年龄、体长和体重特征

Tab. 1 Age, body length, and body weight characteristics of *C. nasus* in the Taizhou section of the Yangtze River

年份 Year	雌Female				雄Male			
	<i>n</i>	体长 Body length (cm)	体重 Body weight (g)	年龄 Age (a)	<i>n</i>	体长 Body length (cm)	体重 Body weight (g)	年龄 Age (a)
2005	61	30.4±2.3 22.4—33.4	102.5±22.3 37.8—133.6	2.9±0.4 2—4	40	26.5±4.2 17.0—33.2	71.2±33.1 17.9—127.8	2.1±0.7 1—4
2009	48	25.0±3.6 16.8—32.8	63.5±26.4 17.6—143.8	1.9±0.7 1—3	70	23.6±3.2 17.7—30.0	54.9±24.3 16.0—111.2	1.7±0.6 1—3
2012	227	27.8±3.5 17.7—35.1	87.7±33.6 19.8—208.4	2.5±0.6 1—4	179	24.3±3.3 14.2—31.3	56.9±23.6 9.2—118.5	1.9±0.6 1—3
2024	242	30.9±2.7 21.0—36.5	118.4±31.0 43.3—218.3	3.0±0.5 1—4	91	26.3±3.3 16.9—32.0	69.2±26.0 17.8—136.7	2.2±0.6 1—4
总体Total	578	29.1±3.6 16.8—36.5	100.1±35.6 17.6—218.3	2.7±0.6 1—4	380	24.9±3.5 14.2—33.2	61.0±26.1 9.2—136.7	2.0±0.6 1—4

鲚在1龄时平均体长相近,但随着年龄增长,性别差异逐渐显著,雌性在后续各年龄段的平均体长均大于雄性(图 3)。参数估算结果表明,雌性渐近体长(L_{∞})为39.05 cm,较雄性(32.63 cm)高6.42 cm,体现

出明显的性别二态性特征(表 2)。同时,雄性的生长率系数 k (0.56/年)高于雌性(0.41/年)。雌性的生长表现指数(Φ' =2.796)略高于雄性(Φ' =2.775),与渐近体长的性别差异表现一致。

GLM分析结果显示,体长残差与年份之间存在显著相关性,其中两性群体的年份效应均以立方样条(df=2)拟合效果最佳(AICc最小;表 3)。体长残差的时间序列分析进一步揭示了雌雄刀鲚体长的长期变化模式:两性个体均在2010—2012年降至历史最低点,随后呈现持续恢复趋势。然而,恢复轨迹存在明显的性别分化——雌性个体在2024年的体长预测值已超过2005年的初始参考水平,表明其完全恢复甚至有所增强;而雄性个体虽同样呈现持续改善态势,但其2024年预测值仍未达到2005年的初始水平(图 4)。

2.4 生长模型参数的时间趋势分析

引入年份变量显著改善了刀鲚雌雄群体生长模型的拟合优度(表 4)。模型选择结果表明,同时包含 L_{∞} 和 k 与年份二次关系的模型对雌雄群体均具有最佳拟合效果(雌: w_i =0.39; 雄: w_i =0.68)。2005—2024年的时序分析显示: (1)雌雄群体的极限体长(L_{∞})均呈先下降后上升的“U型”变化趋势; (2)生长速率(k)则表现为先上升后下降的“倒U型”格局。

比较分析显示,雄性群体生长参数的年际波动程度显著超过雌性群体: L_{∞} 的年际相对变化幅度雄性达18.6%,而雌性仅为14.2%; k 的年际相对变化幅度雄性高达41.2%,雌性为28.4% (图 5)。

3 讨论

3.1 种群生长特性的时间动态

本研究表明,长江泰州段刀鲚种群在2005—2024年经历了显著的年龄结构转变,高龄个体(3—4龄)

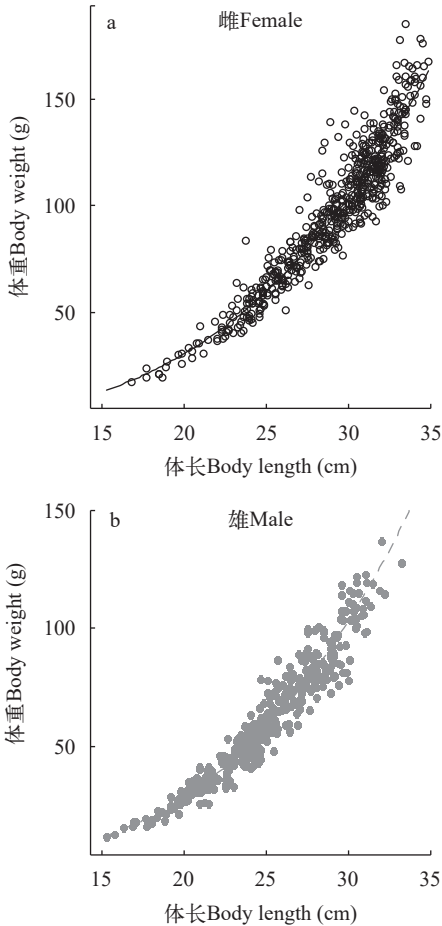


图 2 长江泰州段刀鲚群体雌性(a)和雄性(b)体长与体重的关系
Fig. 2 Relationship between body length and body weight for female (a) and male (b) populations of *C. nasus* in the Taizhou section of the Yangtze River

表 2 长江泰州段刀鲚雌雄群体生长模型的参数估计和模型选择

Tab. 2 Parameter estimation and model selection of different growth models for female and male *C. nasus* in the Taizhou section of the Yangtze River

性别 Sex	模型 Model	L_{∞} (cm)	k	t_0	ρ	Φ'	AICc	Δ_i	w_i
雌Female	冯·贝塔朗菲生长模型VBGM	39.05	0.41	-0.80		2.796	977.428	0.000	0.39
	戈姆帕兹模型Gompertz	37.12	0.58	0.13		2.903	977.907	0.479	0.30
	逻辑斯蒂模型Logistic	35.98	0.75	0.64		2.987	978.681	1.253	0.20
	理查兹模型Richards	36.98	0.59	0.19	10.00	2.907	979.999	2.571	0.11
雄Male	冯·贝塔朗菲生长模型VBGM	32.63	0.56	-0.72		2.775	622.615	0.000	0.32
	戈姆帕兹模型Gompertz	31.77	0.72	-0.08		2.861	622.781	0.166	0.29
	逻辑斯蒂模型Logistic	31.15	0.90	0.34		2.941	622.976	0.361	0.27
	理查兹模型Richards	31.70	0.74	-0.03	10.00	2.871	624.842	2.227	0.12

注: AICc是校正的赤池信息准则; Δ_i 是每个候选模型与最优模型的AICc差值; w_i 是赤池权重; L_{∞} 、 k 、 t_0 、 ρ 为各生长模型的参数
Note: AICc is the Corrected Akaike Information Criterion; Δ_i is the difference in AICc between each candidate model and the best model; w_i is the Akaike weight; L_{∞} , k , t_0 and ρ are parameters of the growth models

比例明显回升, 种群年龄结构呈现恢复态势。虽然尚未完全达到20世纪70年代的历史水平(最大年龄可达6龄, 3—4龄个体占84.52%^[15]), 但较2005年(3龄个体占52.5%)和1993—2002年^[17](2龄个体占89.09%)已有显著改善。

长期历史数据对比分析显示, 刀鲚种群的形态参数在过去50年间呈现“先降后升”的恢复轨迹。种群体型从20世纪70年代初的高水平(平均体长31.45 cm, 平均体重117.7 g^[15])持续下降, 于2009年达到历史低谷(平均体长24.2 cm, 平均体重58.4 g)。此后呈现恢复性增长, 至2024年已基本恢复至历史较高水平(平均体长29.6 cm, 平均体重105.0 g), 较2009年最低点分别增长22.3%和79.8% (图 6)。不同时期的恢复速率对比显示, 禁渔前(2009—2020年)

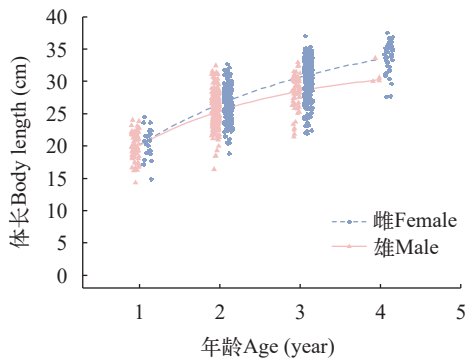


图3 长江泰州段雌雄刀鲚的年龄—体长数据及冯·贝塔朗菲生长模型

Fig. 3 Length-at-age data and Von Bertalanffy Growth Models (VBGM) for female and male *C. nasus* in the Taizhou section of the Yangtze River

体长和体重的年均增长率分别为1.3%和1.6%; 禁渔后(2021—2024年), 增长率显著提升至2.9%和5.0%。这表明禁渔政策有效促进了种群形态参数的恢复, 对体重恢复的促进作用尤为显著。

值得注意的是, 雌雄个体在恢复过程中呈现明显的性别特异性响应模式——雌性表现出更强的恢复响应能力, 而雄性恢复相对滞后。这种差异响应可能源于历史捕捞压力的性别选择性效应^[9, 11]: 雌性刀鲚通常比同龄雄性体型更大^[37], 在高强度捕捞期间承受了更大的选择压力, 因此在选择压力解除后表现出显著的补偿性恢复。

研究还发现, 种群恢复过程中性比结构与年龄组成变化高度关联。从2009年的“低龄化-雄性偏

表3 长江泰州段刀鲚群体广义线性模型(GLM)的参数估计

Tab. 3 Parameter estimates from generalized linear models (GLM) for the *C. nasus* population in the Taizhou section of the Yangtze River

性别Sex	年份效应Year effect	模型Model	AICc	Δ_i	w_i
雌Female	线性	$R=\alpha_{\text{year}}+\varepsilon$	2606.635	10.147	0.01
	立方样条(df=2)	$R=\text{spline}_2(\text{year})+\varepsilon$	2596.488	0	0.99
雄Male	线性	$R=\alpha_{\text{year}}+\varepsilon$	1699.730	14.472	0
	立方样条(df=2)	$R=\text{spline}_2(\text{year})+\varepsilon$	1685.258	0	1.0

注: R 代表体长残差, α_{year} 表示年份效应, ε 为误差项; AICc是校正的赤池信息准则, Δ_i 表示每个候选模型与最优模型的AICc差值, w_i 是赤池权重, df表示自由度

Note: R represents the residual body length, α_{year} indicates the year effect, and ε is the error term. AICc refers to the corrected Akaike Information Criterion, Δ_i represents the AICc difference between each candidate model and the best model, and w_i denotes the Akaike weight. df stands for degrees of freedom

表4 长江泰州段刀鲚群体生长参数 k 和 L_∞ 的时间趋势模型比较

Tab. 4 Comparison of growth models for temporal trends in growth parameters k and L_∞ of *C. nasus* populations in the Taizhou section of the Yangtze River

模型 Model			雌 Female			雄 Male		
f_1	f_2		AIC _C	Δ_i	w_i	AIC _C	Δ_i	w_i
1	L_∞	k	2619.721	27.551	0	1703.008	20.820	0
2	$L_\infty+\alpha_1 l$	k	2608.618	16.448	0	1703.356	21.168	0
3	$L_\infty+\alpha_1 l+\alpha_2 l^2$	k	2593.215	1.045	0.23	1686.401	4.213	0.08
4	L_∞	$k+\beta_1 l$	2610.389	18.219	0	1704.364	22.176	0
5	L_∞	$k+\beta_1 l+\beta_2 l^2$	2597.162	4.992	0.03	1691.691	9.503	0.01
6	$L_\infty+\alpha_1 l$	$k+\beta_1 l$	2610.348	18.178	0	1704.231	22.043	0
7	$L_\infty+\alpha_1 l+\alpha_2 l^2$	$k+\beta_1 l$	2592.718	0.548	0.30	1684.363	2.175	0.23
8	$L_\infty+\alpha_1 l$	$k+\beta_1 l+\beta_2 l^2$	2596.607	4.437	0.04	1691.335	9.147	0.01
9	$L_\infty+\alpha_1 l+\alpha_2 l^2$	$k+\beta_1 l+\beta_2 l^2$	2592.170	0	0.39	1682.188	0	0.68

注: f_1 和 f_2 是模型中与生长参数 L_∞ 和 k 相关的函数, 其中 α_1 和 α_2 描述了 L_∞ 与年份 l 之间的关系, β_1 和 β_2 描述了 k 与年份 l 之间的关系, AICc 为校正的赤池信息准则, Δ_i 表示各候选模型与最优模型的AICc差值, w_i 是赤池权重

Note: f_1 and f_2 are functions in the model related to the growth parameters L_∞ and k , where α_1 and α_2 describe the relationship between L_∞ and year l , and β_1 and β_2 describe the relationship between k and year l . In the functions, AICc is the corrected Akaike Information Criterion, Δ_i represents the AICc difference between each candidate model and the best model, and w_i is the Akaike weight

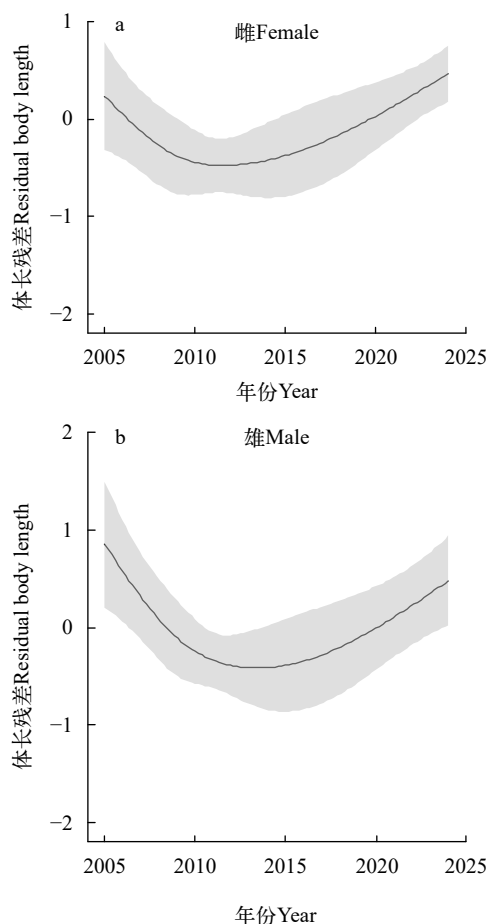


图4 长江泰州段刀鲚雌性(a)和雄性(b)群体体长残差的时间趋势预测

Fig. 4 Predicted temporal trends in body length residuals for female (a) and male (b) populations of *C. nasus* in the Taizhou section of the Yangtze River.

实线表示广义线性模型立方样条函数预测结果, 灰色阴影为95%置信区间

The solid lines represent predictions from generalized linear models using cubic splines, while the shaded gray areas indicate the 95% confidence intervals

向”结构转变为2024年的“高龄化-雌性偏向”结构, 这一转变反映了刀鲚种群对捕捞压力的适应性调节机制: 高捕捞压力时期形成以快速补充为特征的应激型种群结构, 捕捞压力缓解后恢复以繁殖效率为核心的稳定型种群结构。该发现与形态参数的恢复格局高度一致, 共同证实了刀鲚种群对捕捞压力变化具有敏感的生态响应特征和显著的内在恢复潜能。

3.2 雌雄体型差异及其生长策略

研究表明, 长江泰州段刀鲚种群呈现典型的雌性偏大的性别二态性。雌性个体的平均体长和体重均显著大于雄性, 其中体重差异程度(64.1%)远超体长差异(16.9%), 这表明雌性在体型增长中优

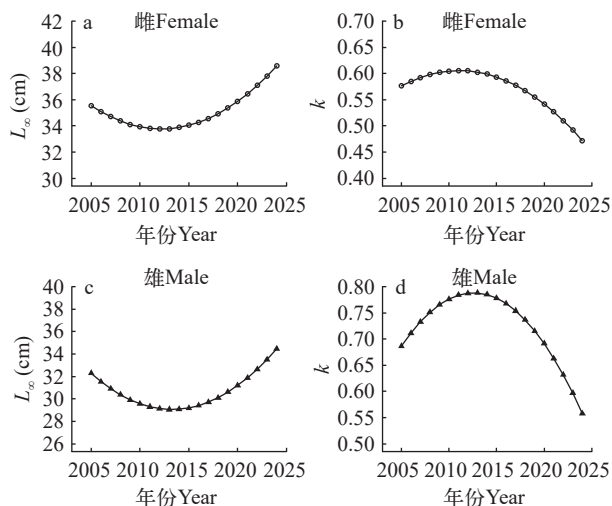


图5 长江泰州段刀鲚群体生长参数的时间变化趋势

Fig. 5 Temporal trends in growth parameters of *C. nasus* populations in the Taizhou section of the Yangtze River

a. 雌性 L_{∞} ; b. 雌性 k ; c. 雄性 L_{∞} ; d. 雄性 k

a. female L_{∞} ; b. female k ; c. male L_{∞} ; d. male k

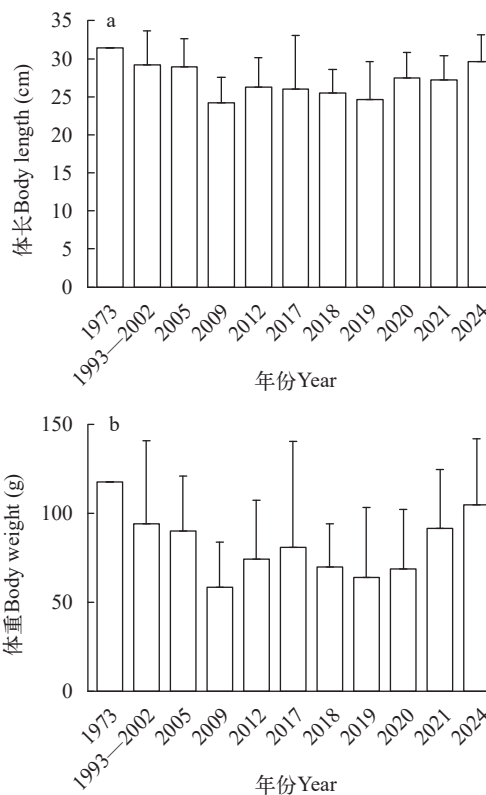


图6 长江刀鲚的平均体长(a)和平均体重(b)年际变化

Fig. 6 Interannual variations in the average body length (a) and body weight (b) of *C. nasus* in the Yangtze River

1973年数据引自袁传宓等^[15], 1993—2002年的数据引用自张敏莹等^[17], 2017—2021年数据引自马凤娇等^[11]。2005、2009、2012和2024年的数据为本研究

The data for 1973 are from Yuan *et al.*^[15], the data for 1993—2002 are from Zhang *et al.*^[17], the data for 2017—2021 are from Ma *et al.*^[11]. The data for 2005, 2009, 2012, and 2024 are from this study

先投资于体重积累, 该分配策略与产卵所需的大量能量积累密切相关^[24]。同时, 雌性平均年龄(2.7岁)明显高于雄性(2.0岁), 进一步印证了性别间截然不同的生长策略。

Von Bertalanffy生长模型分析表明, 雌性具有更大的渐近体长(雌性39.05 cm, 雄性32.63 cm)但生长速率较低(雌性0.41, 雄性0.56), 综合生长性能指数雌性($\Phi'=2.796$)略优于雄性(2.776)。这些参数差异反映了性别间的不同生长对策: 雌性采取“生长更大”策略, 通过延长生长期实现体型最大化以提高繁殖投资; 雄性则采取“生长更快”策略, 通过缩短性成熟时间增加繁殖机会。

进一步分析显示, 作为典型的一次性产卵鱼类^[24], 刀鲚成熟雌性的产卵量(29908—74041粒)与体型呈显著正相关关系, 体型优势能够有效转化为繁殖成功率^[14]。相比之下, 雄性繁殖成功主要依赖于性成熟时间和配子竞争能力, 体型增长的边际收益低于提前性成熟的适合度收益。这种雌性偏大的性别二态性反映了繁殖角色分化驱动的适应性进化, 在缺乏父系照料的鱼类中普遍存在, 体现了性别特异的繁殖投资策略^[38—43]。

3.3 性成熟年龄和生活史策略

刀鲚性成熟年龄通常为2龄, 但在过度捕捞和生态环境胁迫下可提前至1龄^[9, 16]。研究表明, 泰州段刀鲚具有多样化的生活史特征: 既存在短期和长期淡水依存型的洄游群体^[44]; 在临近的南京江段^[45]和常熟江段^[46]还发现了完全淡水生活史的个体。此外, 泰州段附近的崇明岛绿华镇、海门区新通海沙、南通港闸区和如皋长青沙典园附近的水域均为刀鲚的潜在产卵场^[47]。这种生活史模式的多样性为理解捕捞压力对种群的影响提供了重要背景。

在本研究中, 高捕捞压力期(2009年), 刀鲚种群呈现显著的早熟小型化特征: 32.9%的个体为1龄鱼, 13.6%体长<20 cm, 33.1%体重<40 g, 且雄性小型化现象更为严重(体重<40 g的个体占40.0%, 而雌性仅占22.9%)。禁渔实施后(2024年), 种群结构发生根本性改善: 1龄个体比例降至3.3%, 体长<20 cm和体重<40 g的个体比例分别降至1.2%和2.1%, 雌性小型个体完全消失, 雄性小型个体比例也降至7.7%。前后对比鲜明地证实了捕捞压力是驱动刀鲚早熟小型化的关键因子。

根据体型依赖迁移假说^[48], 鱼类个体大小和能量储备决定了洄游距离和产卵场选择: 大型个体具有更充足的能量储备和更低的单位体重代谢率, 能够支撑长距离洄游; 小型个体因能量储备有限且代谢消耗率较高, 通常只能选择短距离迁移。基于该

假说, 结合本研究观察到的小型化现象和产卵场分布特征, 本文推测高强度捕捞导致的早熟小型个体可能倾向于选择近距离产卵场繁殖^[13, 47, 49], 从而使其生活史策略从长距离洄游向短距离洄游转变。类似的洄游模式转换在其他洄游性鱼类中也有报道, 美洲银鱼(*Osmerus mordax*)^[50]和大西洋鲑(*Salmo salar*)^[51]等在面临捕捞压力或环境胁迫时, 同样表现出从长距离洄游向短距离洄游的模式转变, 进一步支持了本文的推测。

在禁渔实施后, 刀鲚种群逐步恢复了长距离洄游能力, 这一推断得到了长江禁渔后鄱阳湖溯河洄游型刀鲚数量激增43倍的观测证据支持^[52]。这充分体现了保护政策的深层生态效应: 不仅能恢复种群数量和优化年龄结构, 还能重塑物种的迁移模式和繁殖策略。

4 结论

本研究证实长江全面禁渔后泰州段刀鲚种群呈现显著恢复态势, 具体表现为年龄结构优化、形态参数提升和性别比例趋于平衡, 为长江生态保护政策成效提供了重要实证支撑。

需要说明的是, 本研究采用的分析策略虽然在统计学上具有合理性, 但合并20年数据可能使某些时期的特征“平均化”, 本文通过残差分析和参数趋势分析在一定程度上缓解了这一问题。此外, 虽然本研究主要针对河海洄游型个体, 但无法完全排除少量不同生态类型个体的影响。未来研究计划建立长期监测体系以持续追踪种群动态, 扩大调查范围涵盖更多江段, 结合耳石微化学等技术进行精确生态类型识别, 并深入开展能量代谢研究阐明生活史策略转变机制, 为刀鲚保护管理提供更完善的科学依据。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Whitehead P J P, Nelson G J, Wongratana T. 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-herrings. Part 1-Chirocentridae, Clupeidae and Pristigasteridae [M]. Rome: FAO Fisheries Synopsis, 1988 1-303.
- [2] Tang W Q, Hu X L, Yang J Q. Species validities of *Coilia brachygnathus* and *C. nasus taihuensis* based on sequence variations of complete mtDNA control region [J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(3): 224-231. [唐文乔, 胡雪莲, 杨金权. 从线粒体控制区全序列变异看短颌鲚和湖鲚]

- 的物种有效性[J]. *生物多样性*, 2007, **15**(3): 224-231.]
- [3] Liu D, Li Y, Tang W, *et al.* Population structure of *Coilia nasus* in the Yangtze River revealed by insertion of short interspersed elements [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2014(54): 103-112.
- [4] Cheng F, Wang Q, Maisano Delser P, *et al.* Multiple freshwater invasions of the tapertail anchovy (*Clupeiformes: Engraulidae*) of the Yangtze River [J]. *Ecology and Evolution*, 2019, **9**(21): 12202-12215.
- [5] Xu G C, Gu R B, Liu H B, *et al.* Fluctuation of Sr/Ca in otoliths of *Coilia nasus* in the Yangtze River and the validation for the anadromous migratory history [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, **38**(7): 939-945. [徐钢春, 顾若波, 刘洪波, 等. 长江短颌鲚耳石Sr/Ca值变化特征及其江海洄游履历[J]. 水产学报, 2014, **38**(7): 939-945.]
- [6] Yuan C M, Qin A Q, Liu R H, *et al.* On the classification of the anchovies, *Coilia*, from the lower Yangtze River and the southeast coast of China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1980, **16**(3): 67-82. [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, **16**(3): 67-82.]
- [7] Yuan C M. Reproductive migration of *Coilia ectenes* [J]. *Freshwater Fisheries*, 1977, **7**(6): 19-24. [袁传宓. 刀鲚的生殖洄游[J]. 淡水渔业, 1977, **7**(6): 19-24.]
- [8] Ma F, Wang Y, Su B, *et al.* Gap-free genome assembly of anadromous *Coilia nasus* [J]. *Scientific Data*, 2023, **10**(1): 360.
- [9] Zheng F, Guo H Y, Tang W Q, *et al.* Age structure and growth characteristics of anadromous populations of *Coilia nasus* in the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2012, **47**(5): 24-31. [郑飞, 郭弘艺, 唐文乔, 等. 溯河洄游的长江刀鲚种群的年龄结构及其生长特征[J]. 动物学杂志, 2012, **47**(5): 24-31.]
- [10] Xu G, Du F, Li Y, *et al.* Integrated application of transcriptomics and metabolomics yields insights into population-asynchronous ovary development in *Coilia nasus* [J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 31835.
- [11] Ma F J, Yang Y P, Fang D A, *et al.* Characteristics of *Coilia nasus* resources after fishing ban in the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(10): 1580-1590. [马凤娇, 杨彦平, 方弟安, 等. 长江禁捕后长江口刀鲚资源特征[J]. 水生生物学报, 2022, **46**(10): 1580-1590.]
- [12] Li Z D, Tang J H, Wu L, *et al.* Spatio-temporal distribution and influencing factors of *Coilia nasus* in sea areas off Jiangsu before fishing ban in Changjiang river [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2024, **55**(2): 441-450. [李子东, 汤建华, 吴磊, 等. 长江禁捕前江苏海域刀鲚(*Coilia nasus*)时空分布及环境因子的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2024, **55**(2): 441-450.]
- [13] Yang Y P, Wang S, Xuan Z Y, *et al.* Temporal characteristics and environmental impact factors of *Coilia nasus* migration into and out of the Poyang Lake during the early period of the fishing ban [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2025, **32**(3): 387-395. [杨彦平, 王生, 轩中亚, 等. 禁捕初期鄱阳湖刀鲚出入湖时序特征及环境影响因子[J]. 中国水产科学, 2025, **32**(3): 387-395.]
- [14] Song C, Li Y G, Zhao F, *et al.* Reproductive population composition and reproductive performance of *Coilia nasus* from the Yangtze Estuary [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, **29**(7): 951-959. [宋超, 李亚鸽, 赵峰, 等. 长江口刀鲚繁殖群体组成及繁殖性能[J]. 中国水产科学, 2022, **29**(7): 951-959.]
- [15] Yuan C M, Lin J B, Liu R H, *et al.* On the age and growth of the Chinese anchovy, *Coilia ectenes*, from the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1978, **6**(3): 285-298. [袁传宓, 林金榜, 刘仁华, 等. 刀鲚的年龄和生长[J]. 水生生物学集刊, 1978, **6**(3): 285-298.]
- [16] Dong W X, Tang W Q, Wang L. Growth characteristics of reproductive population of *Coilia nasus* in the Yangtze River [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, **23**(5): 669-674. [董文霞, 唐文乔, 王磊. 长江刀鲚繁殖群体的生长特性[J]. 上海海洋大学学报, 2014, **23**(5): 669-674.]
- [17] Zhang M Y, Xu D P, Liu K, *et al.* Studies on biological characteristics and change of resource of *Coilia nasus* Schlegel in the lower reaches of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(6): 694-698. [张敏莹, 徐东坡, 刘凯, 等. 长江下游刀鲚生物学及最大持续产量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(6): 694-698.]
- [18] Wang D T, Yang J, Jiang T, *et al.* A comparative study of the morphology of different geographical populations of *Coilia nasus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, **36**(1): 78-90. [王丹婷, 杨健, 姜涛, 等. 不同水域刀鲚形态的分析比较[J]. 水产学报, 2012, **36**(1): 78-90.]
- [19] Guo H Y, Zhou T S, Tang W Q, *et al.* Temporal pattern of *Coilia nasus* biomass along the Jingjiang section of the Yangtze River over the last decade [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(4): 565-571. [郭弘艺, 周天舒, 唐文乔, 等. 长江近口段沿岸刀鲚生物量的时间格局[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(4): 565-571.]
- [20] Guo H Y, Tang W Q. The relationship between sagittal otolith weight-age and its use in age determination in *Coilia nasus* from the estuary of Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2006, **30**(3): 347-352. [郭弘艺, 唐文乔. 长江口刀鲚矢耳石重量与年龄的关系及其在年龄鉴定中的作用[J]. 水产学报, 2006, **30**(3): 347-352.]
- [21] Guo H Y, Liu D, Zhang X G, *et al.* Growth, mortality and recruitment pattern of *Coilia nasus* at Jingjiang section of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(10): 2831-2839. [郭弘艺, 刘东, 张旭光, 等. 长江靖江段沿岸刀鲚的生长、死亡参数及种群补充[J]. 生态

- 学杂志, 2017, **36**(10): 2831-2839.]
- [22] Gao C X, Tian S Q, Dai X J. Estimation of biological parameters and yield per recruitment for *Coilia nasus taihuensis* in Dianshan Lake, Shanghai, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(5): 1506-1512. [高春霞, 田思泉, 戴小杰. 淀山湖刀鲚的生物学参数估算及其相对单位补充量渔获量 [J]. 应用生态学报, 2014, **25**(5): 1506-1512.]
- [23] Cheng W X, Tang W Q. Some phenotypic varieties between different ecotypes of *Coilia nasus* in Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2011, **46**(5): 33-40. [程万秀, 唐文乔. 长江刀鲚不同生态型间的某些形态差异 [J]. 动物学杂志, 2011, **46**(5): 33-40.]
- [24] Xu G C, Wan J J, Gu R B, *et al.* Morphological and histological studies on ovary development of *Coilia nasus* under artificial farming conditions [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, **18**(3): 537-546. [徐钢春, 万金娟, 顾若波, 等. 池塘养殖刀鲚卵巢发育的形态及组织学研究 [J]. 中国水产科学, 2011, **18**(3): 537-546.]
- [25] Xu G C, Nie Z J, Zhang C X, *et al.* Histological studies on testis development of *Coilia nasus* under artificial farming conditions [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2012, **31**(2): 247-252. [徐钢春, 聂志娟, 张呈祥, 等. 刀鲚精巢发育的组织学研究 [J]. 华中农业大学学报, 2012, **31**(2): 247-252.]
- [26] Froese R. Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2006, **22**(4): 241-253.
- [27] Katsanevakis S, Maravelias C D. Modelling fish growth: multi-model inference as a better alternative to a priori using von Bertalanffy equation [J]. *Fish and Fisheries*, 2008, **9**(2): 178-187.
- [28] Von Bertalanffy L. A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws. II) [J]. *Human Biology*, 1938, **10**(2): 181-213.
- [29] Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 1825(**115**): 513-583.
- [30] Ricker W E. Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations [M]. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada, 1975: 1-382.
- [31] Richards F J. A flexible growth function for empirical use [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1959, **10**(2): 290-301.
- [32] Pauly D. Gill Size and Temperature as Governing Factors in Fish Growth: A Generalization of Von Bertalanffy's Growth formula [R]. Kiel: Institut für Meereskunde, 1979: 1-159.
- [33] Burnham K P, Anderson D R. Model Selection and Multi-model Inference: A Practical Information-Theoretic Approach [M]. New York: Springer, 2010: 1-488.
- [34] Moreau J, Bambino C, Pauly D. Indices of Overall Growth Performance of 100 Tilapia (Cichlidae) Populations [C]//Maclean J L, Dizon L B, Hosillos L V. The First Asian Fisheries Forum. Manila: Asian Fisheries Society, 1986: 201-206.
- [35] Williams A J, Farley J H, Hoyle S D, *et al.* Spatial and sex-specific variation in growth of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) across the South Pacific Ocean [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(6): e39318.
- [36] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing [Z]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013.
- [37] Li Y X, He W P, Liu J S, *et al.* Annulus validation and age and growth estimation of anadromous *Coilia ectenes* in the Yangtze Estuary [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(4): 787-793. [黎雨轩, 何文平, 刘家寿, 等. 长江口刀鲚耳石年轮确证和年龄与生长研究 [J]. 水生生物学报, 2010, **34**(4): 787-793.]
- [38] Holtby L B, Healey M C. Sex-specific life history tactics and risk-taking in coho salmon [J]. *Ecology*, 1990, **71**(2): 678-690.
- [39] Walsh C T, Pease B C, Booth D J. Sexual dimorphism and gonadal development of the Australian longfinned river eel [J]. *Journal of Fish Biology*, 2003, **63**(1): 137-152.
- [40] De Leo G A, Gatto M. A size and age-structured model of the European eel (*Anguilla anguilla* L.) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, **52**(7): 1351-1367.
- [41] Parker G A. The evolution of sexual size dimorphism in fish [J]. *Journal of Fish Biology*, 1992, **41**(sB): 1-20.
- [42] Erlandsson A, Ribbink A J. Patterns of sexual size dimorphism in African cichlid fishes [J]. *South African Journal of Science*, 1997(93): 498-506.
- [43] Gagliardi-Seeley J L, Itzkowitz M. Male size predicts the ability to defend offspring in the biparental convict cichlid *Archocentrus nigrofasciatus* [J]. *Journal of Fish Biology*, 2006, **69**(4): 1239-1244.
- [44] Hu Y H, Jiang T, Liu H B, *et al.* Otolith microchemical fingerprints of *Coilia nasus* from the Taizhou section of Changjiang River in Jiangsu Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, **43**(4): 967-974. [胡玉海, 姜涛, 刘洪波, 等. 长江江苏泰州段刀鲚耳石微化学指纹特征 [J]. 生态学杂志, 2024, **43**(4): 967-974.]
- [45] Chen T T, Jiang T, Li M M, *et al.* Inversion of habitat history for the long-jaw ecotype *Coilia nasus* collected from Nanjing section of the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, **40**(6): 882-892. [陈婷婷, 姜涛, 李孟孟, 等. 长江南京江段长颌鲚生境履历的反演 [J]. 水产学报, 2016, **40**(6): 882-892.]
- [46] Chen T T, Jiang T, Liu H B, *et al.* Do all long supermaxilla-type estuarine tapertail anchovies (*Coilia nasus* Temminck et Schlegel, 1846) migrate anadromously [J]?

- Journal of Applied Ichthyology*, 2017, **33**(2): 270-273.
- [47] Xue X P, Peng Y X, Fang D A, *et al.* Preliminary study of *Coilia nasus* spawning grounds at Sutong section in the lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, **46**(8): 1377-1388. [薛向平, 彭云鑫, 方弟安, 等. 长江下游苏通江段刀鲚产卵场的初步研究 [J]. 水产学报, 2022, **46**(8): 1377-1388.]
- [48] Slotte A, Fiksen Ø. State-dependent spawning migration in Norwegian spring-spawning herring [J]. *Journal of Fish Biology*, 2000, **56**(1): 138-162.
- [49] Huang R S. Biological characteristics, resource status and protection strategies of *Coilia* fish [J]. *Reservoir Fisheries*, 2005, **25**(2): 33-37. [黄仁术. 刀鱼的生物学特性及资源现状与保护对策 [J]. 水利渔业, 2005, **25**(2): 33-37.]
- [50] McKenzie R A. Smelt Life History and Fishery in the Miramichi River, New Brunswick [R]. Bulletin No. 144, Ottawa: Fisheries Research Board of Canada, 1964: 1-75.
- [51] Kallio-Nyberg I, Pruuki V. Diversity in the salmon stock (*Salmo salar* L.) and the rehabilitation strategy in the Tornionjoki River [R]. Helsinki: Finnish Game and Fisheries Research Institute, 1987: 1-36.
- [52] Jiang T, Yang J, Xuan Z Y, *et al.* Preliminary report on the effects of resource recovery on anadromous *Coilia nasus* in Poyang Lake under the national 10-year fishing ban [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, **43**(1): 24-30. [姜涛, 杨健, 轩中亚, 等. 长江禁渔对鄱阳湖溯河洄游型刀鲚资源恢复效果初报 [J]. 渔业科学进展, 2022, **43**(1): 24-30.]

TEMPORAL TRENDS AND SEX-SPECIFIC VARIATION IN GROWTH CHARACTERISTICS OF *COILIA NASUS* IN THE TAIZHOU SECTION OF THE YANGTZE RIVER

GUO Hong-Yi¹, ZHANG Ya¹, TANG Wen-Qiao¹ and LIU Kai²

(1. Shanghai Universities Key Laboratory of Marine Animal Taxonomy and Evolution, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstract: To evaluate the ecological effects of 10-year fishing ban policy in the Yangtze River on the population recovery of *Coilia nasus*, this study systematically analyzed the temporal dynamics of growth characteristics using multi-model inference approaches based on information criteria. A total of 958 specimens were collected during fishing seasons in 2005, 2009, 2012, and 2024 from the Taizhou section of the Yangtze River. The results showed: (1) Population structure optimized significantly, with age composition shifting from younger to older cohorts. The proportion of 3—4 year-old individuals increased notably from 24.7% in 2009 to 72.4% in 2024, while the sex ratio (female: male) recovered from 0.69: 1 to 2.66: 1. (2) Morphometric parameters exhibited a typical U-shaped recovery pattern, with mean body length increasing from the historical low of 24.2 cm in 2009 to 29.6 cm in 2024, and mean body weight increasing from 58.4 to 105.0 g, representing increases of 22.3% and 79.8%, respectively. (3) The von Bertalanffy growth model showed the best fit, revealing significant sexual dimorphism in growth parameters: females exhibited greater asymptotic length than males, with L_{∞} values of 39.05 cm for females and 32.63 cm for males, but lower growth coefficient, with k values of 0.41 for females and 0.56 for males, reflecting a “slow growth-large body size” life history strategy, while males adopted a “fast growth-small body size” strategy. Temporal analysis revealed U-shaped and inverted U-shaped recovery trajectories for L_{∞} and k , respectively. (4) Population recovery exhibited sex-specific differences, with females fully recovering to 2005 levels and showing enhancement, while males improved but with relatively delayed recovery. This study confirms the significant positive effects of 10-year fishing ban policy in the Yangtze River on *C. nasus* population conservation and resource recovery, providing important empirical support for assessing the effectiveness of aquatic biodiversity conservation in the Yangtze River Basin and scientific basis for formulating adaptive management strategies for endangered anadromous fish species.

Key words: Growth parameters; Population dynamics; Sexual dimorphism; Fishing ban effectiveness; *Coilia nasus*