



## 长江中游宜昌江段铜鱼的种群特征和资源量

盖帅帅<sup>1,2</sup>, 李君轶<sup>1</sup>, 沈丽<sup>1</sup>, 方冬冬<sup>1,3</sup>, 危起伟<sup>1,2,4\*</sup>

(1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;

2. 西南大学生命科学学院, 重庆 400715;

3. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214000;

4. 武汉长江中华鲟保护中心, 湖北 武汉 430223)

**摘要:** 为了解三峡水库蓄水后, 长江中游宜昌江段铜鱼的种群动态变化特征, 基于 2003—2005 年、2009—2011 年和 2017—2019 年用流刺网在宜昌江段收集的 9 120 尾铜鱼样本的基础生物学数据, 运用 FISAT II 软件对种群参数和资源量进行估算。结果显示, 2003—2005 年、2009—2011 年和 2017—2019 年宜昌江段铜鱼体长分布范围分别为 118~416、111~409 和 107~380 mm, 平均体长(平均值±标准差)为 (230.7±49.8)、(217.5±54.3) 和 (267.2±34.1) mm; 体重分布范围分别为 10~1000、19~889 和 16~816 g, 平均体重(平均值±标准差)分别为 (195.8±123.6)、(153.2±118.6) 和 (250.3±84.2) g; 生长指数  $b$  值分别为 3.015 1、3.031 9 和 2.977 5, 均属匀速生长型。由 Powell-Wetherall plot 法和 ELEFAN I 法拟合渐进体长  $L_{\infty}$  分别为 535、530、500 mm; 生长系数  $k$  值分别为 0.18、0.14 和 0.15, 属中等速率生长型; 由体长结构实际种群分析估算铜鱼年资源量分别为  $1.14 \times 10^6$ 、 $1.89 \times 10^6$  和  $2.10 \times 10^6$  尾。研究表明, 三峡水库蓄水后, 宜昌江段铜鱼为匀速生长型, 资源数量增加明显, 但生长速率减缓, 存在小型化趋势。研究结果将为长江禁渔后的渔业资源保护与利用提供科学依据。

**关键词:** 铜鱼; 种群参数; 资源量; 体长股分析; 宜昌江段

**中图分类号:** S 932.4

**文献标志码:** A

铜鱼 (*Coreius heterodon*) 隶属于鲤形目 (Cypriniformes) 鲤科 (Cyprinidae) 鮡亚科 (Gobioninae) 铜鱼属 (*Coreius*), 广泛分布于长江干支流中。铜鱼是典型的半洄游性鱼类, 在繁殖季节, 性成熟的个体洄游到上游的急流中产卵, 鱼卵在漂流过程中孵化, 幼鱼在水流较缓的中游育肥<sup>[1]</sup>。水利工程对铜鱼等洄游性鱼类的生存影响显著<sup>[2]</sup>, 随着 1981 年葛洲坝水利工程于宜昌建设蓄水, 中下游铜鱼的洄游通道被切断, 坝上产卵场受损,

产卵规模下降; 三峡大坝位于葛洲坝上游 38 km 处, 于 1997 年动工截流, 2003 年下闸蓄水, 致使上游的鱼卵难以漂流到中游, 进一步加剧了这一影响<sup>[3]</sup>。铜鱼和同属的圆口铜鱼 (*C. guichenoti*) 曾作为长江中上游重要的经济鱼类, 在渔获物中的占比可达 1/3~2/3<sup>[4]</sup>。现如今, 圆口铜鱼在中游干流及支流中基本绝迹<sup>[5]</sup>, 铜鱼在葛洲坝建成后 (1981 年) 于坝下宜昌虎牙滩江段开辟了新的产卵场, 资源量得到补充, 不至枯竭<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2022-08-28 修回日期: 2023-02-18

资助项目: 农业农村部财政专项“长江渔业资源与环境调查”(CJDC-2017-14)

第一作者: 盖帅帅 (照片), 从事渔业资源调查研究, E-mail: 2396885822@qq.com

通信作者: 危起伟, 从事渔业资源调查研究, E-mail: weiqw@yfi.ac.cn



对鱼类种群参数和资源量的评估是渔业资源合理开发和保护的基础。国内学者常采用的方法包括繁殖性能推算法<sup>[7]</sup>、标志重捕法<sup>[8]</sup>、体长与年龄股分析法<sup>[9]</sup>和声学探测法<sup>[10]</sup>等, 其中体长股分析法 (length-structured virtual population analysis, VPA) 因不需要鉴定研究对象的年龄, 具有采样工作量小和数据结构简单等优点而倍受青睐。2005年, 联合国粮农组织 (FAO) 推出的 FISAT II 渔业评估软件内含了 VPA 模块, 可以利用鱼类体长或年龄结构数据估算资源量<sup>[11]</sup>, 在海洋和内陆水域鱼类资源量估算过程中被广泛应用<sup>[12]</sup>。

受葛洲坝和三峡工程影响, 长江中游铜鱼繁殖群体无法上溯, 上游早期资源下行也严重受损, 中游水文节律也发生显著变化, 但三峡工程对长江中游铜鱼种群特征的深远影响未有报道。已有的研究多聚焦于长江铜鱼年龄生长<sup>[13-14]</sup>和遗传特征<sup>[15-16]</sup>, 时间跨度短且研究区域多集中在长江上游, 缺少长江中游铜鱼种群特征数据。铜鱼在不同栖息环境下的种群参数差异显著, 说明铜鱼生长具有可变性, 三峡蓄水改变了长江宜昌葛洲坝下游江段的栖息环境, 有必要对该江段铜鱼的种

群动态进行研究。本研究基于 2003—2005 年、2009—2011 年以及 2017—2019 年宜昌江段收集的铜鱼数据, 利用 FISAT II 渔业评估软件估算宜昌江段铜鱼的资源量和种群参数, 分析宜昌江段铜鱼种群特征的变化, 填补了该江段铜鱼的研究空白, 以期为今后长江中游渔业资源研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

调查采样区域位于长江中游宜昌中华鲟自然保护区, 根据长江十年禁渔要求, 该区域的生产捕捞已于 2018 年正式停止。收集整理禁渔前 (2003—2005 年、2009—2011 年和 2017 年) 每年在宜昌江段进行的渔业资源调查数据; 保护区实施禁捕后 (2018—2019 年), 经湖北省农业农村厅批准, 雇当地渔民在葛洲坝至胭脂坝约 15 km 江段使用三层流刺网 (网长 30~40 m, 网高 1.0~1.5 m, 网目 3~6 cm) 进行渔业资源监测作业 (图 1)。对捕获的铜鱼进行常规的生物学测量, 包括全长 ( $L'$ , 精确至 1 mm)、体长 ( $L$ , 精确至 1 mm) 和体重 ( $W$ ,

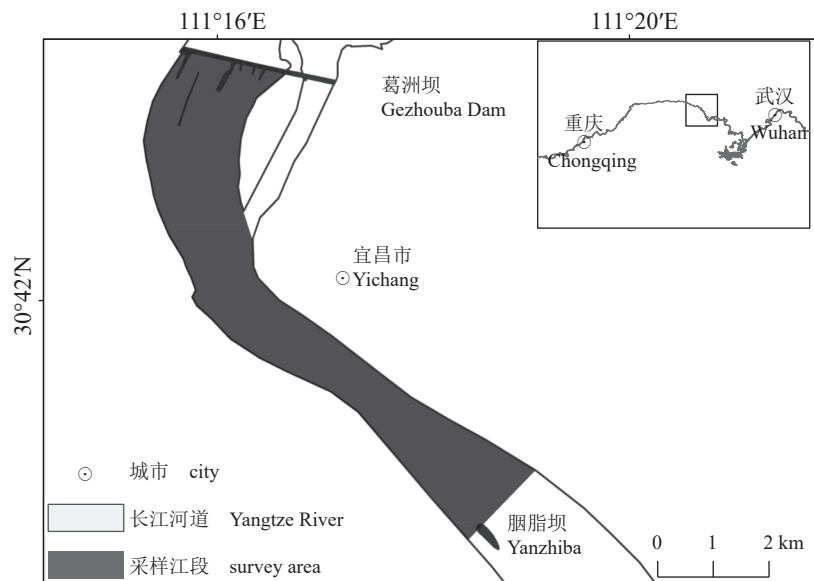


图 1 宜昌江段采样示意图

Fig. 1 Map of survey area in Yichang reach

精确至 1 g)。调查区域水温数据 ( $^{\circ}\text{C}$ , 精确到  $0.1^{\circ}\text{C}$ ) 取自湖北宜昌水文站。访问渔民, 统计调查江段常年作业渔船数、渔具以及全年作业天数等渔业捕捞信息。实验期间, 操作者严格遵守实验动物福利伦理规范。

### 1.2 数据分析

采用 Microsoft Excel 2021、SPSS 26.0 和 FISAT II 1.2.2 软件进行数据的录入与处理分析, 采用 ArcGIS 10.8 和 Origin 2021 软件作图。

体长与体重关系 对历年铜鱼的体长和体

重进行 Pearson 相关性检验, 若  $P$  值小于 0.05, 体长-体重关系采用 Keys 公式<sup>[17]</sup> 拟合:

$$W = aL^b$$

式中,  $a$  为生长条件因子,  $b$  为生长指数。通过比较  $b$  值和匀速增长理论值 (3.00) 的大小, 可以判断体长和体重的生长是否为匀速, 若  $b=3$ , 说明体长和体重是匀速生长, 否则为变速生长。

生长方程 采用 Von Bertalanffy 生长方程描述铜鱼的生长规律<sup>[18]</sup>, 体长生长方程为:

$$L_t = L_\infty [1 - e^{-k(t-t_0)}]$$

式中,  $L_t$  表示年龄为  $t$  龄时的理论体长 (mm);  $L_\infty$  表示渐进体长 (mm);  $k$  为生长系数;  $t$  为年龄;  $t_0$  表示理论生长起点的年龄。生长系数  $k$  是评估渔业资源的一项重要参数, 能反映鱼类的生长速率, 通过将  $k$  值与  $0.10 \text{ a}^{-1}$  和  $0.20 \text{ a}^{-1}$  进行比较, 将鱼的生长速率分为 3 类: 当  $k \leq 0.10 \text{ a}^{-1}$  为缓慢型; 当  $0.10 \text{ a}^{-1} < k \leq 0.20 \text{ a}^{-1}$  为中速型; 当  $0.20 \text{ a}^{-1} < k$  为快速型。

生长参数 渐进体长 ( $L_\infty$ ) 和生长系数 ( $k$ ) 用 FISAT II 软件中基于体长频率数据的 Powell-Wetherall plot 法和 ELEFAN I 法进行估算。Snedecor 法和 Sturges 法分别计算分组组距, 并求其平均值作为参考, 根据计算规范确定合适组距<sup>[19]</sup>, 计算公式:

$$\text{组距(Snedecor)} = \text{Range} / \left( \frac{\text{Range}}{\text{SD}} \times 4 \right)$$

$$\text{组距(Sturges)} = \text{Range} / (1 + 3.322 \times \lg N)$$

式中, Range 表示体长全距, 即体长极差; SD 表示体长的标准差;  $N$  表示样本数量。

理论起点生长年龄 ( $t_0$ ) 通过 Pauly(1979) 经验公式计算:

$$\lg(-t_0) = -0.3922 - 0.2752 \lg L_\infty - 1.038 \lg k$$

生长性能指数 ( $\varphi$ ) 用以衡量铜鱼总体的生长表现<sup>[20]</sup>, 计算公式为:

$$\varphi = \lg k + 2 \lg L_\infty$$

死亡系数和死亡率 死亡系数包括总死亡系数 ( $Z$ )、自然死亡系数 ( $M$ ) 和捕捞死亡系数 ( $F$ ), 三者存在  $Z = M + F$  的关系。总死亡系数 ( $Z$ ) 通过 FISAT II 中的体长变换渔获物曲线模块 (length-converted catch curves) 估算得出<sup>[21]</sup>; 自然死亡系数 ( $M$ ) 根据 Pauly(1980) 经验公式估算<sup>[22]</sup>:

$\lg M = -0.0066 - 0.2790 \lg L_\infty + 0.6543 \lg k + 0.4634 \lg T$  式中,  $T$  为调查江段的平均水温, 由历年的水温数据计算得到 2003—2005 年、2009—2011 年和 2017 年宜昌江段的平均水温分别为 18.6、18.8 和 19.0 °C。铜鱼属温带集群性鱼类,  $M$  值取为公式计算值的 4/5;  $L'_\infty$  表示渐进全长 (mm), 通过拟合各年份体长 ( $L$ ) 和全长 ( $L'$ ) 的线性关系, 计算各年份的渐进全长。

资源开发率 资源开发率由  $E = F / Z$  计算, 利用 FISAT II 软件中 Beverton-Holt 模块的 Knife-edge 模型建立相对单位补充量渔获量 ( $Y/R$ ) 和相对单位补充量生物量 ( $B/R$ ) 曲线, 模型中  $E_{10}$  表示  $Y/R$  边际增长减少 10% 时的开发率,  $E_{50}$  表示资源量下降到原始水平 50% 时的开发率,  $E_{\max}$  表示获得最大渔获量的开发率。

资源量估算 年总渔获量  $Y$  (尾) 为调查江段所有渔船年渔获量之和, 计算公式为:

$$Y = x \times f \times t$$

式中,  $x$  为作业渔船的单位捕捞努力量渔获量 (catch per unit effort, CPUE), 单位为 [尾/(船·d)];  $f$  为作业船只数量, 根据渔政部门的统计数据和当地渔民访问结果, 调查江段常年作业船数为 60 艘;  $t$  为年捕捞作业时间 (d), 除去春季禁渔期、洪水期及其他原因导致的非作业天数, 本研究中年作业天数按 180 d 计算。

通过 FISAT II 软件中的体长股分析模块对宜昌江段的铜鱼资源量进行估算。将年渔获铜鱼的尾数按照体长分组录入到模块中, 输入渐进体长 ( $L_\infty$ )、生长系数 ( $k$ )、自然死亡系数 ( $M$ )、最大体长组的捕捞死亡系数 ( $F_l$ ) 以及体长与体重关系式中的常数 ( $a$ ) 和生长指数 ( $b$ )。最大体长组的捕捞死亡系数 ( $F_l$ ) 初始值取 0.5, 通过迭代法反复计算 3~4 次, 直到输出结果无明显变化为止, 确定最终的  $F_l$  值<sup>[23]</sup>。将最终的  $F_l$  值录入到 VPA 模型中, 运行后即可得到各体长组的捕捞死亡系数和资源尾数, 各体长组的资源尾数之和便是调查江段铜鱼的年资源尾数<sup>[21]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 渔获群体组成

2003—2005 年、2009—2011 年和 2017—2019 年分别采集铜鱼样本 1715、1156 和 6249 尾。2003—2005 年样本体长变幅为 118~416 mm, 平均体长

为  $(230.7 \pm 49.8)$  mm; 2009—2011 年样本体长变幅为 111~409 mm, 平均体长为  $(217.5 \pm 54.3)$  mm; 2017—2019 年样本体长变幅为 107~380 mm, 平均体长为  $(267.2 \pm 34.1)$  mm (图 2)。2003—2005 年样本体重变幅为 10~1000 g, 平均体重  $(195.8 \pm 123.6)$  g; 2009—2011 年样本体重变幅为 19~889 g, 平均体重为  $(153.2 \pm 118.6)$  g; 2017—2019 年样本体重变幅为 16~816 g, 平均体重为  $(250.3 \pm 84.2)$  g (图 3)。单因素方差分析结果表明, 2003—2005 年、2009—2011 年和 2017—2019 年铜鱼样本体长、体重均有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 随着时间推移, 铜鱼的平均体长和体重表现为先下降后上升趋势。

## 2.2 生长参数

铜鱼的全长 ( $L'$ ) 和体长 ( $L$ ) 在各年份段均呈

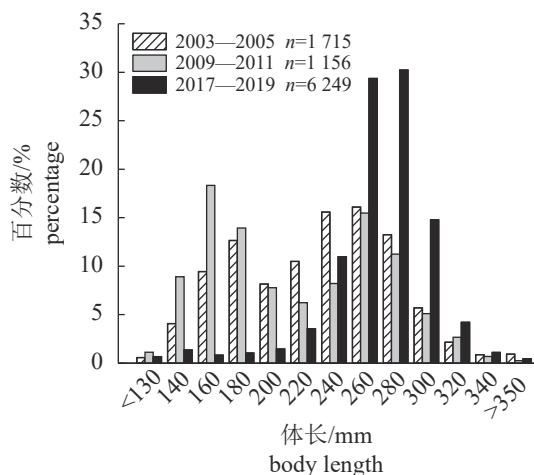


图 2 铜鱼体长分布

Fig. 2 Body length of *C. heterodon*

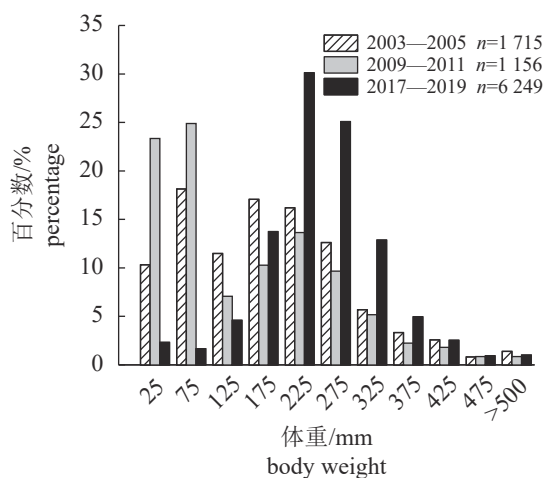


图 3 铜鱼体重分布

Fig. 3 Body weight of *C. heterodon*

显著线性关系, 拟合不同年份的全长体长关系得到以下线性方程:

$$2003-2005 \text{ 年: } L' = 1.1304L + 0.8591 \quad (N = 1715, R^2 = 0.9766, P < 0.01)$$

$$2009-2011 \text{ 年: } L' = 1.1303L + 1.0175 \quad (N = 1156, R^2 = 0.9895, P < 0.01)$$

$$2017-2019 \text{ 年: } L' = 1.1308L + 1.3138 \quad (N = 2286, R^2 = 0.9524, P < 0.01)$$

对 3 个年份段的体长和体重进行相关性分析,  $P$  值均小于 0.01, 可采用 Keys 公式进行拟合 (图 4), 体长-体重关系式分别为:

$$2003-2005 \text{ 年: } W = 0.0130L^{3.0151} \quad (N = 300, R^2 = 0.9159)$$

$$2009-2011 \text{ 年: } W = 0.0116L^{3.0319} \quad (N = 307, R^2 = 0.9642)$$

$$2017-2019 \text{ 年: } W = 0.0136L^{2.9755} \quad (N = 349, R^2 = 0.9306)$$

经  $t$  检验, 各年份段体长-体重关系的幂指数  $b$  值与匀速增长理论值 (3.00) 无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 表明宜昌江段铜鱼的生长类型为匀速生长型, 可以采用 Von Bertalanffy 生长方程描述铜鱼的生长规律。

以 Snedecor 方法和 Sturges 方法计算的分组组距均值作为参考, 结合分组规范和习惯, 确定分组组距为 20 mm。将铜鱼的体长频率分布数据录入 FISAT II 软件中, 通过 Powell-Wetherall plot 法和 ELEFAN I 法拟合出 2003—2005 年、2009—2011 年和 2017 年铜鱼的渐进体长 ( $L_\infty$ ) 和生长系数 ( $k$ ),  $L_\infty$  分别为 535、530 和 500 mm,  $k$  值分别为  $0.18 \text{ a}^{-1}$ 、 $0.14 \text{ a}^{-1}$  和  $0.15 \text{ a}^{-1}$ ; 将  $L_\infty$  和  $k$  值代入 Pauly (1979) 经验公式, 得到理论生长起点年龄 ( $t_0$ ), 分别为 -0.43、-0.56 和 -0.53, 从而得到 Von Bertalanffy 生长方程。将渐进体长 ( $L_\infty$ ) 代入全长体长关系式得到渐进全长 ( $L'_\infty$ ),  $L'_\infty$  分别为 606、600 和 557 mm。生长性能  $\phi$  值分别为 4.71、4.59 和 4.57 (表 1)。铜鱼的渐进体长 ( $L_\infty$ ) 呈减小趋势, 生长系数 ( $k$ ) 值在 2009—2011 年和 2017 年相近, 且低于 2003—2005 年。生长性能指数 ( $\phi$ ) 值相近。

## 2.3 死亡系数和开发率

将调查江段年均水温代入 Pauly (1980) 经验公式得到自然死亡系数 ( $M$ ); 运用 FISAT II 软件中体长变换渔获物曲线模块估算总死亡系数 ( $Z$ ), 排除未全面进入补充年龄段和体长接近渐近体长的数据点后, 进行线性回归分析, 斜率的相反数即

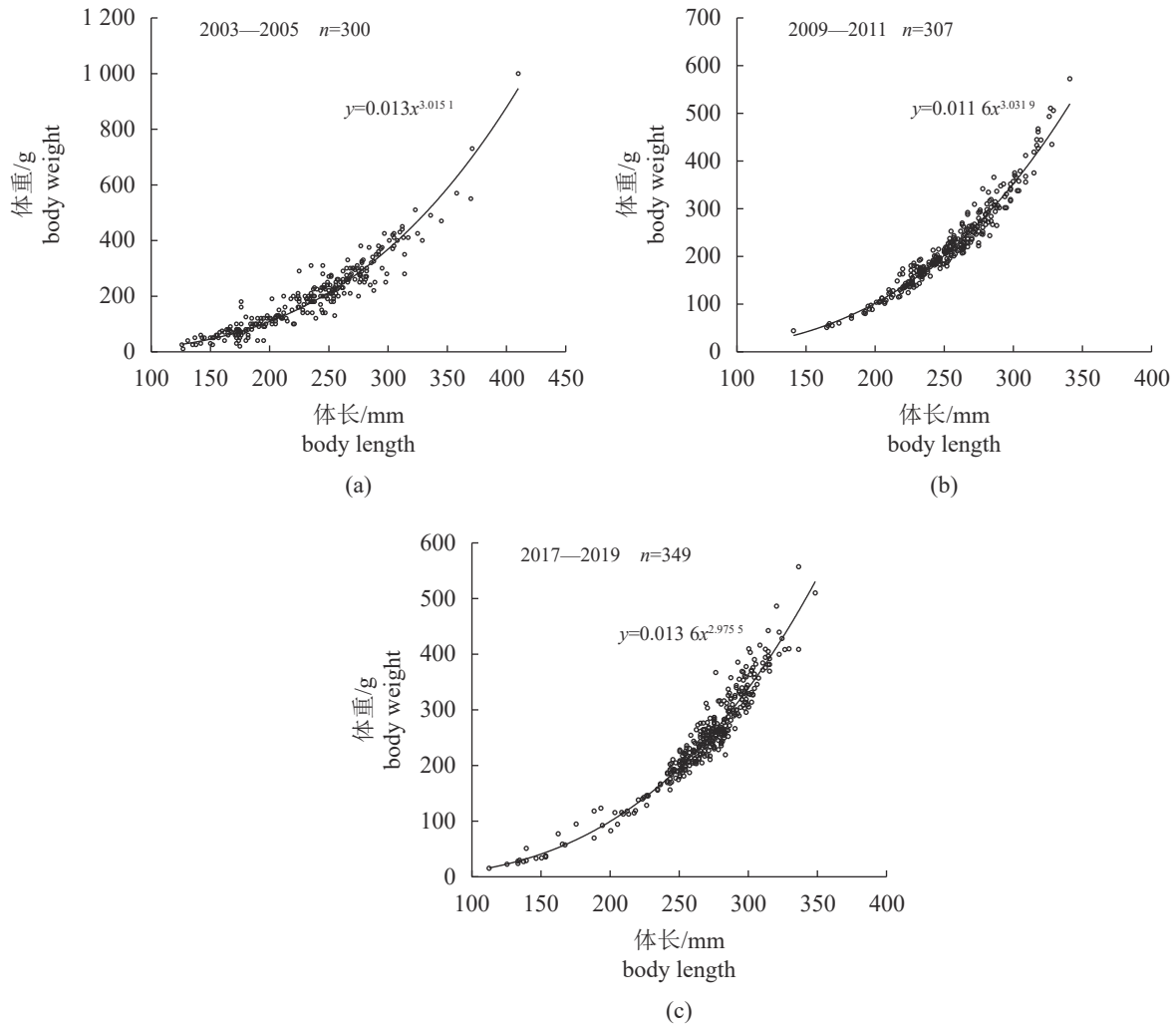


图 4 铜鱼体长-体重关系式

Fig. 4 Relationship between body length and body weight of *C. heterodon*

表 1 宜昌江段铜鱼的生长参数及生长方程

Tab. 1 Growth parameters and growth equations of *C. heterodon* from Yichang reach

年份 year	渐进体长 $L_{\infty}$ /mm	生长系数 $k/a^{-1}$	理论初始年龄 $t_0$	生长性能指数 $\phi$	体长生长方程
2003—2005	535	0.18	-0.43	4.71	$L_t = 535[1 - e^{-0.18(t+0.43)}]$
2009—2011	530	0.14	-0.56	4.59	$L_t = 530[1 - e^{-0.14(t+0.56)}]$
2017	500	0.15	-0.53	4.57	$L_t = 500[1 - e^{-0.15(t+0.53)}]$

为  $Z$  值。因宜昌江段于 2018 年开始实行全面禁渔政策, 故只估算 2017 年之前的死亡系数和开发率。2003—2005 年、2009—2011 年和 2017 年铜鱼的  $Z$  值分别为 1.170、1.370 和 1.680。捕捞死亡系数 ( $F$ ) 由  $F=Z-M$  得出,  $F$  值分别为 0.855、1.101 和 1.393。资源开发率 ( $E$ ) 由  $E=F/Z$  得出,  $E$  值分别为 0.731、0.804 和 0.829; 开捕体长 ( $L_c$ ) 由渔获物中体长最小值代替, 利用 FISAT II 软件中 Bever-

ton-Holt 模块的 Knife-edge 模型, 估算得到  $E_{10}$ 、 $E_{50}$  和  $E_{max}$ (图 5)。  $E_{10}$  值分别为 0.359、0.369 和 0.366,  $E_{50}$  值分别为 0.282、0.277 和 0.278,  $E_{max}$  值分别为 0.463、0.455 和 0.458 (表 2)。以上结果显示, 铜鱼的总死亡系数 ( $Z$ ) 值和捕捞死亡系数 ( $F$ ) 值均呈升高趋势, 自然死亡系数 ( $M$ ) 相对稳定, 资源开发率 ( $E$ ) 均大于最大开发率 ( $E_{max}$ ), 属于过度捕捞。

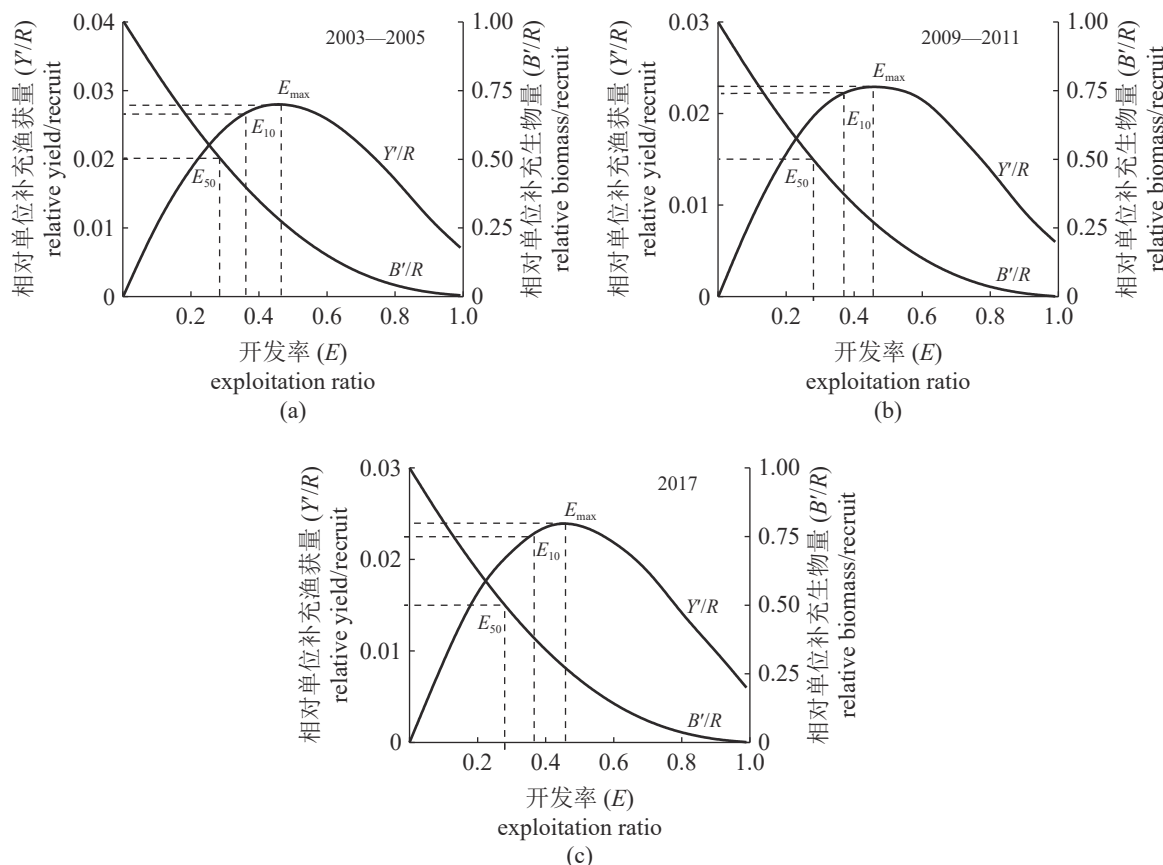


图 5 铜鱼相对单位补充量渔获量、生物量与开发率的关系

Fig. 5 Relationship between relative yield-per-recruit ( $Y'/R$ ), biomass-per-recruit ( $B'/R$ ) and exploitation ratio ( $E$ ) of *C. heterodon*

表 2 宜昌江段铜鱼的种群参数

Tab. 2 Population parameters of *C. heterodon* from Yichang reach

年份 year	总死亡系数( $Z$ ) total mortality coefficient	自然死亡系数( $M$ ) natural mortality coefficient	捕捞死亡系数( $F$ ) fishing mortality coefficient	资源开发率			
				$E$	$E_{10}$	$E_{50}$	$E_{max}$
2003—2005	1.170	0.315	0.855	0.731	0.359	0.282	0.463
2009—2011	1.370	0.269	1.101	0.804	0.369	0.277	0.455
2017	1.680	0.287	1.393	0.829	0.366	0.278	0.458

## 2.4 资源量估算

根据统计的渔获量数据, 计算得到年均单位捕捞努力量渔获量 (CPUE) 分别为: 2003—2005 年 10.23 尾/(船·d)、2009—2011 年 15.78 尾/(船·d)、2017 年 10.87 尾/(船·d), 计算得到调查江段铜鱼的年均渔获尾数 ( $Y$ ) 分别为 110 484、170 424 和 117 396 尾。

将各项参数录入到 FISAT II 软件中, 运行 VPA 模块估算资源量, 通过迭代计算确定各年份间最大体长组的捕捞死亡系数 ( $F_t$ ) 分别为 0.320、0.276 和 0.124, 对应的铜鱼年资源量估算结果分

别为  $1.14 \times 10^6$  (1 144 927)、 $1.89 \times 10^6$  (1 890 899) 和  $2.10 \times 10^6$  (2 103 556) 尾 (图 6), 宜昌江段铜鱼的资源量呈稳步增加趋势。

## 3 讨论

### 3.1 铜鱼种群参数变化

对体长和体重进行换算分析在渔业资源利用和保护中是极其重要的, 由此可以将不同生活区域的鱼类进行比较, 并对相同渔具捕捞鱼类的生物量进行估算<sup>[24]</sup>。本研究中宜昌江段铜鱼在 2003—2005 年 (3.02)、2009—2011 年 (3.03) 和 2017—2019

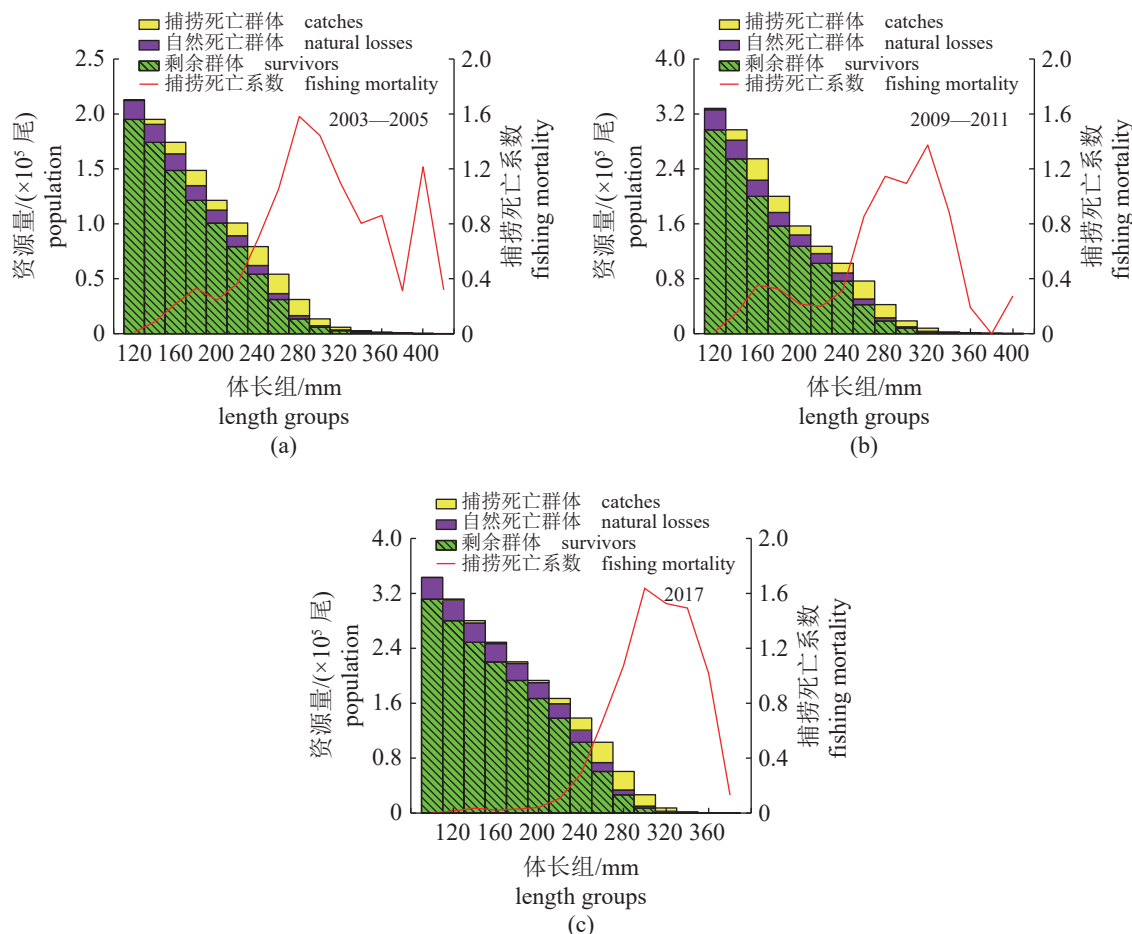


图 6 铜鱼的体长结构实际种群分析

Fig. 6 Length structure analysis for actual *C. heterodon* populations

年(2.98)的 $b$ 值无显著差异,且经 $t$ 检验均与理论值(3.00)无显著差异( $P>0.05$ ),体长与体重属匀速增长类型,符合Von Bertalanffy生长模型以及Beverton-Holt资源评估模型的使用条件。本研究铜鱼的 $b$ 值与三峡水库蓄水前长江中上游(3.01)及三峡蓄水后长江中游武汉段(3.10)、长江上游江津段(3.10)的研究结果相似<sup>[14, 16, 25]</sup>;但与蓄水后万州江段(3.22)和秭归江段(3.24)的差异较大<sup>[26]</sup>。这种差异可能与铜鱼栖息地理位置的差异有关,万州和秭归江段位于三峡库区水流较缓的中下部,研究期间捕获到的低龄铜鱼较多,导致了 $b$ 值估算偏高。分析认为,三峡水库蓄水对长江中游宜昌江段铜鱼的体长和体重生长关系无显著影响,为匀速生长型。

已有研究表明,铜鱼在长江中上游( $0.23 \text{ a}^{-1}$ )、长江上游江津段( $0.23 \text{ a}^{-1}$ )及长江中游武汉段( $0.21 \text{ a}^{-1}$ )均是快速生长型<sup>[14, 16]</sup>,在万州段( $0.09 \text{ a}^{-1}$ )和秭归段( $0.08 \text{ a}^{-1}$ )是缓慢生长型<sup>[26]</sup>。本研究结果表明,宜昌江段铜鱼的 $k$ 值介于 $0.10 \text{ a}^{-1}$ 和 $0.20 \text{ a}^{-1}$ 之间,

属于中等速率生长型;2009—2011年(0.14)和2017年(0.15)的 $k$ 值明显小于2003—2005年(0.18)。造成这种差异的原因较为复杂,其一,可能是栖息环境和饵料丰度的不同。万州和秭归江段位于三峡库区,蓄水后底栖生物群落较其他江段有明显变化,铜鱼的饵料种类和丰度变化,导致生长系数不同<sup>[26]</sup>。其二,利用ELEFAN I法估算 $k$ 值时,体长数据中的最大值对估算结果的影响较大<sup>[27]</sup>。在江津段采集到的铜鱼最大体长为530 mm,估算的 $k$ 值较大;在秭归段采集到的铜鱼最大体长为303 mm,估算的 $k$ 值较小。本研究结果中 $k$ 值较低的原因,可能是采集到的铜鱼最大体长(416 mm)较低,影响了 $k$ 值的估算。此外,宜昌江段的底栖生物群落自三峡蓄水后发生较大改变,底栖饵料丰度变小可能影响铜鱼的 $k$ 值。葛洲坝作为低水头径流式电站,水库基本无拦蓄作用,随着三峡蓄水泄洪对下游的冲刷,葛洲坝下的河床硬度和粗糙度升高,充塞度下降<sup>[28]</sup>,底栖生物群落变化,进而影响铜鱼的生长系数。受三峡蓄

水的影响, 长江中游宜昌江段铜鱼的生长速率低于其他江段, 为中等速率生长型。

生长性能指数 ( $\phi$ ) 很好地结合了  $k$  与  $L_{\infty}$  的表现。通常相近鱼种的  $\phi$  值比较接近, 相同鱼种或相近鱼种资源群体  $\phi$  值的差异可以在一定程度上反映出生长参数估算的精确程度<sup>[29]</sup>。本研究中, 3 段年份间的  $\phi$  值差异不显著, 平均值 (4.62) 与武汉江段 (4.71) 和万县 (4.76) 相似<sup>[7, 14]</sup>, 说明本研究对  $k$  与  $L_{\infty}$  的估算较为准确。

### 3.2 铜鱼资源开发状况

目前, 关于鱼类群体资源的最适开发率阈值的选取仍有较大争议, Gulland<sup>[30]</sup> 认为  $E = 0.5$  时, 该区域的渔业资源开发程度最佳。而 Mehanna<sup>[31]</sup> 则认为只要在  $E < E_{\max}$  的范围内都能实现渔业资源的可持续发展。在本研究中,  $E$  值连续增加, 远大于 0.5, 且均大于  $E_{\max}$ , 与江津段 (0.75) 和长江中上游 (0.876) 研究结果相似<sup>[16, 25]</sup>。根据《中国渔业统计年鉴》数据, 1979—2018 年长江中游捕捞渔船数量和机动渔船功率呈现总体上升趋势<sup>[32]</sup>; 2003 年湖北省的渔业捕捞产量约为 40 万 t, 2011 年湖北省的渔业捕捞产量为 900 万 t<sup>[33]</sup>, 这可能是  $E$  值持续升高的主要原因。与过度开发相对应的是铜鱼群体小型化趋势愈发明显, 调查期间渔获铜鱼最大个体的体长不断变小,  $L_{\infty}$  的估算值也不断减小, 远小于 1999 年庄平等<sup>[25]</sup> (600 mm) 和 2002 年陈大庆等<sup>[34]</sup> (620 mm) 在长江中上游的研究结果。谭巧<sup>[35]</sup> 研究表明, 随着渔业现代化的实现, 渔业捕捞量增加, 嘉陵江下游的主要经济鱼类在组成上表现出小型鱼类比例增加、个体小型化趋势明显的特点, 与本研究铜鱼个体变化相似。本研究表明, 宜昌江段的铜鱼自 2003 年至 2017 年一直处于过度开发状态, 而且开发力度在不断增加, 铜鱼个体小型化趋势明显。

### 3.3 铜鱼资源量变化

通过体长股分析模块 (VPA) 估算资源量时, 年渔获量数据的精度直接影响估算结果的准确性<sup>[11]</sup>。通过对当地渔民和渔政部门的访问, 调查江段常年作业的渔船数量较为固定, 年作业天数受禁渔期、洪水期及其他不确定因素影响, 导致统计结果偏差较大, 本研究选择较为保守的作业天数 (180 d)。本研究只统计了流刺网中的铜鱼, 虽然导致计算的年捕获量存在偏差, 但排除了不同渔具进行换算造成的误差。

本研究结果表明, 三峡水库建成后, 宜昌江段铜鱼的资源量明显增加。铜鱼历史产卵场多集中在长江上游重庆干流江段, 葛洲坝水电站的修建切断了中下游铜鱼产卵洄游通道。受困于中游的铜鱼在宜昌虎牙滩江段开辟了新的产卵场, 且产卵规模稳步扩大, 同时葛洲坝上的卵苗仍能漂流至坝下进行资源补充, 这为中游铜鱼种群扩张提供了良好基础<sup>[3]</sup>。铜鱼幼鱼在中下游水流较缓的江段索饵育肥, 性成熟后溯游而上, 葛洲坝修建后, 宜昌江段成为长江中下游铜鱼的洄游终点, 长江中下游铜鱼资源量的变动在宜昌江段将尤为明显。已有研究发现, 三峡水库蓄水后, 铜鱼在中游荆州、岳阳等江段作为优势种, 渔获物占比稳步增加<sup>[6, 36]</sup>, 在一定程度上表明中游铜鱼资源量整体的增加趋势, 与本研究结果相似。铜鱼资源量增加还可能与长江中下游“春季禁渔”制度的实施有关, 铜鱼的繁殖季节在 5—7 月, “春季禁渔”的实施有效保护了产卵群体, 对铜鱼种群扩增有积极作用。此外, 生态位重叠导致的竞争对鱼类资源量的变化影响显著<sup>[37-38]</sup>。铜鱼和圆口铜鱼有着相似的功能组成, 生态位竞争激烈<sup>[39]</sup>。三峡水库蓄水后, 上游圆口铜鱼卵苗难以漂流到坝下, 中游圆口铜鱼丧失了早期资源的补充, 数量锐减<sup>[40]</sup>, 铜鱼的生态位竞争压力减小, 有利于种群数量的增加。

### 3.4 总结和展望

本研究基于 FISAT II 渔业评估软件评估三峡蓄水后长江中游宜昌江段铜鱼种群参数和资源量, 表明三峡蓄水后宜昌江段铜鱼体长和体重生长关系无显著变化, 为匀速生长型; 铜鱼生长速率有所下降且显著低于其他江段, 为中等速率生长型; 铜鱼资源量明显增加, 个体小型化趋势明显。

长江“十年禁渔”的实施, 将长江干流的鱼类从巨大的捕捞压力中解放出来, 渔业资源可能逐步恢复。铜鱼作为长江土著鱼种, 在长江上中下游均有分布, 其自然资源量变动在一定程度上反映长江鱼类资源和生态健康状况, 研究其种群特征变化有助于今后“十年禁渔”效果评估。本研究选取三峡水库蓄水初期至长江十年禁渔前铜鱼的调查数据, 对长江中游宜昌江段铜鱼的生长参数和资源量进行估算, 为今后铜鱼资源量及禁渔效果的评估奠定基础。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)



## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 许蕴珩, 邓中彝, 余志堂, 等. 长江的铜鱼生物学及三峡水利枢纽对铜鱼资源的影响 [J]. 水生生物学集刊, 1981, 7(3): 271-293.  
Xu Y G, Deng Z L, Yu Z T, *et al.* The biological aspects of *Coreius heterodon* (Bleeker) and the effects of proposed Sanxia hydroelectric project on its resource[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1981, 7(3): 271-293 (in Chinese).
- [ 2 ] Park Y S, Chang J B, Lek S, *et al.* Conservation strategies for endemic fish species threatened by the Three Gorges Dam[J]. *Conservation Biology*, 2003, 17(6): 1748-1758.
- [ 3 ] 刘乐和, 吴国犀, 王志玲. 葛洲坝水利枢纽兴建后长江干流铜鱼和圆口铜鱼的繁殖生态 [J]. 水生生物学报, 1990, 14(3): 205-215.  
Liu L H, Wu G X, Wang Z L. Reproduction ecology of *Coreius heterodon* (Bleeker) and *Coreius guichenoti* (Sauvage et Dabry) in the mainstream of the Changjiang River after the construction of Gezhouba Dam[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1990, 14(3): 205-215 (in Chinese).
- [ 4 ] 长江水系渔业资源调查协作组. 长江水系渔业资源 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990.  
Cooperation group on fishery resources investigation of the Yangtze River water system. Fishery resources of the Yangtze River system[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990 (in Chinese).
- [ 5 ] 李修峰, 黄道明, 谢文星, 等. 汉江中游鱼类资源现状 [J]. 湖泊科学, 2005, 17(4): 366-372.  
Li X F, Huang D M, Xie W X, *et al.* Status of fisher resources in the Middle Reaches of the Hanjiang River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(4): 366-372 (in Chinese).
- [ 6 ] 董春燕, 李君轶, 张辉, 等. 长江中游鱼类资源量的估算 [J]. 动物学杂志, 2021, 56(1): 73-79.  
Dong C Y, Li J Y, Zhang H, *et al.* Estimation of fish resources in Middle Reaches of Yangtze River[J]. Chinese Journal of Zoology, 2021, 56(1): 73-79 (in Chinese).
- [ 7 ] 冷永智, 何立太, 魏清和. 葛洲坝水利枢纽截流后长江上游铜鱼的种群生物学及资源量估算 [J]. 淡水渔业, 1984(5): 21-25.  
Leng Y Z, He L T, Wei Q H. Population biology and resources estimate of *Coreius heterodon* in the upper reaches of the Changjiang River after the construction of Gezhouba Dam[J]. *Freshwater Fisheries*, 1984(5): 21-25 (in Chinese).
- [ 8 ] 胡德高, 柯福恩, 张国良, 等. 葛洲坝下中华鲟产卵场的调查研究 [J]. 淡水渔业, 1992(5): 6-10.  
Hu D G, Ke F E, Zhang G L, *et al.* Investigation on the spawning ground of Chinese sturgeon down Gezhouba Dam[J]. *Freshwater Fisheries*, 1992(5): 6-10 (in Chinese).
- [ 9 ] 周永东, 徐汉祥. 应用体长股分析法估算东海海鳗资源量 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2007, 26(4): 399-403.  
Zhou Y D, Xu H X. Biomass estimates of *Muraenesox cinereus* are calculated by LCA in the East China Sea[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2007, 26(4): 399-403 (in Chinese).
- [10] 陶江平, 艾为明, 龚昱田, 等. 采用渔业声学方法和 GIS 模型对楠溪江鱼类资源量及空间分布的评估 [J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2992-3000.  
Tao J P, Ai W M, Gong Y T, *et al.* Assessment of fish abundance and distribution using fisheries acoustics and GIS modeling in the Nanxi River of Wenzhou City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2992-3000 (in Chinese).
- [11] Gayanilo F C Jr, Sparre P. FAO-ICLARM Stock assessment tools II: FiSAT II: user's guide[M]. Rome: Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2005.
- [12] 吴金明, 娄必云, 赵海涛, 等. 赤水河鱼类资源量的初步估算 [J]. 水生态学杂志, 2011, 32(3): 99-103.  
Wu J M, Lou B Y, Zhao H T, *et al.* Preliminary assessment of fish stock in the Chishui River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(3): 99-103 (in Chinese).
- [13] 刁晓明, 周容树. 铜鱼年龄与生长的初步研究 [J]. 四川动物, 1994, 13(1): 32-33.  
Diao X M, Zhou R S. The preliminary study on age and growth of *Coreius heterodon*[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 1994, 13(1): 32-33 (in Chinese).
- [14] 田波, 吴金明, 梁孟, 等. 长江中游武汉江段铜鱼的年龄与生长 [J]. 水产学报, 2021, 45(1): 68-78.  
Tian B, Wu J M, Liang M, *et al.* Age and growth of *Coreius heterodon* from Wuhan stretch of the middle Yangtze River[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021,

- 45(1): 68-78 (in Chinese).
- [15] Cheng F, Li W, Wu Q J, *et al.* Microsatellite DNA variation among samples of bronze gudgeon, *Coreius heterodon*, in the mainstem of the Yangtze River, China[J]. *Ichthyological Research*, 2013, 60(2): 165-171.
- [16] 刘红艳, 熊飞, 段辛斌, 等. 长江上游江津江段铜鱼种群参数和资源量评估 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(8): 1420-1428.
- Liu H Y, Xiong F, Duan X B, *et al.* Estimating population parameters and abundance of *Coreius heterodon* in Jiangjin section of the upper Yangtze River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1420-1428 (in Chinese).
- [17] Keys A B. The weight-length relation in fishes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1928, 14(12): 922-925
- [18] Von Bertalanffy L. A quantitative theory of organic growth (Inquiries on growth laws. II)[J]. *Human Biology*, 1938, 10(2): 181-213.
- [19] 陈国宝, 李永振, 陈丕茂, 等. 鱼类最佳体长频率分析组距研究 [J]. *中国水产科学*, 2008, 15(4): 659-666.
- Chen G B, Li Y Z, Chen P M, *et al.* Optimum interval class size of length-frequency analysis of fish[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(4): 659-666 (in Chinese).
- [20] Pauly D, Munro J L. Once more on the comparison of growth in fish and invertebrates[J]. *Fishbyte*, 1984, 2(1): 1-21.
- [21] 詹秉义. 渔业资源评估 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- Zhan B Y. Fishery resources assessment[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995 (in Chinese).
- [22] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1980, 39(2): 175-192.
- [23] 吴斌, 方春林, 贺刚, 等. FiSAT II 软件支持下的体长股分析法探讨 [J]. *南方水产科学*, 2013, 9(4): 94-98.
- Wu B, Fang C L, He G, *et al.* FiSAT II software supported length based cohort analysis[J]. *South China Fisheries Science*, 2013, 9(4): 94-98 (in Chinese).
- [24] Nasser A K V. Length-weight relationships of tuna baitfish from the Lakshadweep Islands, India[J]. *Naga*, 1999, 22(4): 42-44.
- [25] 庄平, 曹文宣. 长江中、上游铜鱼的生长特性 [J]. *水生生物学报*, 1999, 23(6): 577-583.
- Zhuang P, Cao W X. Growth characteristics of *Coreius heterodon* in the middle and upper reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, 23(6): 577-583 (in Chinese).
- [26] Xia Y G, Lloret J, Li Z J, *et al.* Status of two *Coreius* species in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(1): 19-33.
- [27] Campana S E. Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods[J]. *Journal of Fish Biology*, 2001, 59(2): 197-242.
- [28] 杜浩, 危起伟, 张辉, 等. 三峡蓄水以来葛洲坝下中华鲟产卵场河床质特征变化 [J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 3124-3131.
- Du H, Wei Q W, Zhang H, *et al.* Changes of bottom substrate characteristics in spawning ground of Chinese sturgeon downstream the Gezhouba Dam from impounding of three gorge reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 3124-3131 (in Chinese).
- [29] Ama-Abasi D, Holzloehner S, Enin U. The dynamics of the exploited population of *Ethmalosa fimbriata* (Bowdich, 1825, Clupeidae) in the Cross River Estuary and adjacent Gulf of Guinea[J]. *Fisheries Research*, 2004, 68(1-3): 225-235.
- [30] Gulland J A. Fish stock assessment: a manual of basic methods[M]. New York: FAO/Wiley, 1971: 1223.
- [31] Mehanna S F. Stock assessment and management of the Egyptian sole *Solea aegyptiaca* Chabanaud, 1927 (Osteichthyes: Soleidae), in the southeastern Mediterranean, Egypt[J]. *Turkish Journal of Zoology*, 2007, 31(4): 379-388.
- [32] 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 (1979—2018)[M]. 北京: 中国农业出版社.
- The Ministry of Agriculture Fisheries Fisheries Authority, National Aquatic Technology Promotion Station, China Fisheries Association. China fisheries statistical yearbook (1979—2018)[M]. Beijing: China Agricultural Press (in Chinese).
- [33] 董蓓. 湖北省渔业可持续发展指标体系构建及综合评价研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Dong B. Research on the construction of the index system of sustainable development of fishery in Hubei Province [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.

- tem of fisheries sustainable development in Hubei province and comprehensive evaluation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese).
- [34] 陈大庆, 刘绍平, 段辛斌, 等. 长江中上游主要经济鱼类的渔业生物学特征 [J]. *水生生物学报*, 2002, 26(6): 618-622.
- Chen D Q, Liu S P, Duan X B, *et al.* A preliminary study of the fisheries biology of main commercial fishes in the middle and upper reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(6): 618-622 (in Chinese).
- [35] 谭巧. 嘉陵江下游鱼类群落与环境因子的关系及生物完整性评价 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- Tan Q. Relationship between fish community and environmental factors and biotic integrity evaluation in the lower reaches of Jialing River[D]. Chongqing: Southwest University, 2017 (in Chinese).
- [36] 刘绍平, 段辛斌, 陈大庆, 等. 长江中游渔业资源现状研究 [J]. *水生生物学报*, 2005, 29(6): 708-711.
- Liu S P, Duan X B, Chen D Q, *et al.* Studies on status of fishery resources in the middle reach of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(6): 708-711 (in Chinese).
- [37] Munday P L, Jones G P, Caley M J. Interspecific competition and coexistence in a guild of coral - dwelling fishes[J]. *Ecology*, 2001, 82(8): 2177-2189.
- [38] Klemetsen A, Amundsen P A, Dempson J B, *et al.* Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2003, 12(1): 1-59.
- [39] 张晨. 长江流域典型生境鱼类群落结构变化特征及构建机制 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- Zhang C. Characteristics and assembly mechanisms of fish community in typical habitat types in the Yangtze River Basin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021 (in Chinese).
- [40] 罗佳, 姜伟, 陈求稳, 等. 葛洲坝下中华鲟产卵场食卵鱼资源量的调查和分析 [J]. *淡水渔业*, 2013, 43(5): 27-30.
- Luo J, Jiang W, Chen Q W, *et al.* Estimation on abundance of egg-predatory fishes in the spawning ground of Chinese sturgeon below the Gezhouba Dam[J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, 43(5): 27-30 (in Chinese).

## Population characteristics and resource status of *Coreius heterodon* in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River

GAI Shuaishuai<sup>1,2</sup>, LI Junyi<sup>1</sup>, SHEN Li<sup>1</sup>, FANG Dongdong<sup>1,3</sup>, WEI Qiwei<sup>1,2,4\*</sup>

(1. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;

2. College of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214000, China;

4. Center for Chinese Sturgeon Conservation, Wuhan 430223, China)

**Abstract:** To understand the population characteristics and resource changes of *Coreius heterodon* in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir, population parameters and resource status of *C. heterodon* were analyzed using FISAT II software based on the biological data obtained from gillnets deployed in the Yichang section during 2003–2005, 2009–2011 and 2017–2021. Results showed that body length ranges were 118–416 mm, 111–409 mm and 107–380 mm, and weight ranges were 10–1 000 g, 19–889 g and 16–816 g, respectively. Average body lengths and weights of *C. heterodon* in the three periods were (230.7±49.8) mm, (217.5±54.3) mm, (267.2±34.1) mm, (195.8±123.6) g, (153.2±118.6) g and (250.3±84.2) g, respectively. Growth indices ( $b$ ) were 3.015, 3.032 and 2.978, respectively, which belonged to the uniform growth type. The asymptotic length ( $L_{\infty}$ ) of *C. heterodon* was 535 mm in 2003–2005, 530 mm in 2009–2011 and 500 mm in 2017–2019, respectively, with growth coefficients ( $k$ ) at 0.18, 0.14 and 0.15. According to the length-structured virtual population, annual population of *C. heterodon* were estimated to be  $1.10 \times 10^6$ ,  $1.89 \times 10^6$  and  $2.10 \times 10^6$ , respectively. After the impoundment of the Three Gorges Reservoir, although the *C. heterodon* in the Yichang section grew at a uniform rate, and the resource increased significantly, the growth rate slowed down and showed a trend of miniaturization. Results in this paper would provide scientific basis for the protection and utilization of fishery resources in the middle reaches of the Yangtze River after the moratorium.

**Key words:** *Coreius heterodon*; population characteristics; resource status; length-structured virtual population analysis; Yichang section

**Corresponding author:** WEI Qiwei. E-mail: [weiqw@yfi.ac.cn](mailto:weiqw@yfi.ac.cn)

**Funding projects:** Project of Yangtze Fisheries Resources and Environment Investigation from the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China (CJDC-2017-14)