

pDOI: 10.12264/JFSC2023-0239

东平湖刀鲚生物学参数、单位补充量渔获量及产卵亲体量评估

丛旭日^{1,2,3}, 董贯仓², 李秀启², 王晴晴², 冷春梅², 高云芳², 任一平¹

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 山东省淡水渔业研究院, 农业农村部黄河下游渔业资源环境科学观测实验站, 山东 济南 250013;

3. 滨州学院, 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256600

摘要: 为完善东平湖刀鲚(*Coilia nasus*)的基础生物学数据, 并为其资源的可持续利用提供技术指导和理论依据, 本研究根据 2021—2023 年东平湖定置三层多目刺网调查获得的刀鲚体长、体重数据, 利用 ELEFAN_GA 技术对刀鲚的生长和死亡参数进行估算, 拟合 Von Bertalanffy (VBGF) 生长方程, 构建了基于体长结构的单位补充量渔获量(YPR)和单位补充量产卵亲体量(SSBPR)模型。结果显示, 东平湖刀鲚体长范围为 4.9~26.2 cm, 平均体长为 (12.2±2.4) cm, 体重范围 1.1~51.8 g, 平均体重为 (6.6±4.5) g; 使用基于 bootstrap 的 ELEFAN_GA 方法估算刀鲚渐进体长 L_{∞} =31.65 cm, 生长速率 K =0.66, 理论生产起点年龄 t_0 =-0.23, 季节性生产振幅 C =0.65, 1 年中生产最快的时间段 t_s =0.40; 刀鲚的总死亡系数 Z =2.71, 自然死亡系数 M =1.074, 捕捞死亡系数 F =1.641、开发率 E =0.604, 平均选择体长 L_{50} =9.15 cm; YPR 模型结果显示, 随着 F 增大, YPR 值呈现先上升后下降的趋势, 生物学参考点 $F_{0.1}$ 和 $F_{\max}$ 的值分别为 0.978 和 2.204; SSBPR 模型结果显示随着捕捞强度的增大, SSBPR 呈下降趋势, 现阶段捕捞强度介于 $F_{20\%}$ (2.848)与 $F_{40\%}$ (1.065)之间, 略大于 $F_{35\%}$ (1.286)。综上所述, 东平湖刀鲚生长表现出明显的季节性变化规律, 在与其他地理群体对比中, 东平湖刀鲚在生物学参数上的差异体现了其生长过程的空间异质性, K 值最大表明其可以用最短的时间生长到接近极限体长, 说明东平湖饵料丰富, 而同时较高的开发率和较低的开捕体长则表明目前东平湖刀鲚已处于过度开发状态, SSBPR 曲线得出现阶段捕捞强度小于极限值 $F_{20\%}$, 略大于生物学参考点 $F_{35\%}$ 。研究结果表明, 为使东平湖刀鲚资源达到生态、经济效益平衡, 可在适当减少渔船数量以降低捕捞强度的情况下, 通过增大网目尺寸以增加开捕体长来保持其可持续发展。

关键词: 东平湖; 刀鲚; 生物学参数; 单位补充量渔获量; 单位补充量产卵亲体量; 生物学参考点

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)10-1236-10

刀鲚(*Coilia nasus*), 属鲱形目(Clupeiformes)、鳀科(Engraulidae)、鲚属(*Coilia*), 俗称刀鱼, 广泛分布于我国沿海地区, 从洄游的角度, 刀鲚可以分为洄游型刀鲚和淡水定居型刀鲚。历史上东平湖是刀鲚最重要的产卵场^[1], 东平湖位于泰安市东平县境内, 属黄河流域, 总面积 626 km², 是黄河下游唯一湖泊, 亦是南水北调东线重要的调蓄湖库, 现阶段由于水坝修建、黄河断流等因素, 洄游型刀鲚已较为少见, 东平湖刀鲚属定居型生态

类群, 已经成为当地主要经济物种。因洄游型刀鲚具有伞护种(umbrella species)的属性, 即其所需的生境, 同时也包括诸多其他物种的生境, 对该物种的保护同时涵盖了生态系统中其他物种, 针对其研究已较为广泛, 但主要集中于长江流域。姜涛等^[2-4]利用耳石微化学技术研究了长江各个江段及附属水体刀鲚的生活史; 高春霞等^[5]、吴斌等^[6]也分别针对淀山湖、鄱阳湖刀鲚种群进行了生物学参数方面的研究。而在黄河流域的研究开展较

收稿日期: 2023-9-18; 修订日期: 2023-10-31.

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020MC193); 农业农村部“黄河专项”课题(HHDC-2022-0403); 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金资助项目(2021KFJJ03).

作者简介: 丛旭日(1990-), 男, 助理研究员, 研究方向为渔业生态和资源管理. E-mail: congxuri90@126.com

通信作者: 董贯仓(1980-), 研究员, 研究方向为渔业生态. E-mail: dgc3869676@163.com

晚, 且仅聚焦于洄游生态学^[7-8], 在渔业资源管理方面尚属空白。

近年来, R 语言方法已应用于渔业资源评估和管理。相较于 FiSAT II, 其主要优势是准确性和易重现性, 但由于其软件包尚不完善, 在淡水渔业资源领域应用程度并不广泛。在海洋领域中, 麻秋云等^[9]基于 TropFishR 评估了东、黄海星康吉鳗(*Conger myriaster*)生长死亡参数以及单位补充量渔获量, 结果表明, 星康吉鳗处于过度捕捞状态, 开捕体长过小; 高春霞等^[10]对浙江南部近海的小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)进行研究, 发现将开捕体长提高到 15 cm 可保证小黄鱼资源的可持续发展; 赵天亚等^[11]利用 TropFishR 比较了海州湾和莱州湾短吻红舌鲷(*Cynoglossus joyneri*)生长参数的异质性。本文根据东平湖刀鲚体长、体重数据, 基于 R 语言中的 TropFishR 软件包及自编程序, 对东平湖刀鲚种群的生物学参数、YPR 进行分析研究, 首次构建了基于刀鲚体长结构的 SSBPR 模型并估算相应生物学参考点, 以期更好地了解东平湖刀鲚的生长状况和资源利用程度, 完善其基础资料, 为更好的实现东平湖渔业资源生态保护和可持续发展提供技术方法和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究区域位于泰安市东平湖(116°7'E~116°16'E, 35°54'N~36°4'N), 共设置 4 个采样点(图 1), 采样时间为 2021 年 10—12 月, 2022 年 3 月、10—11 月, 2023 年 3 月, 共采集刀鲚样本 2267 尾。采样捕捞网具为定置三层多目刺网(下称刺网), 每次采样静置 24 h。刺网规格: 网高 2 m, 全长 100 m, 分 5 种网目, 分别为 1 cm、2 cm、3 cm、4 cm、7 cm 各 20 m。所有样本冰鲜带回实验室进行测量, 测量指标为体长(精确至 1 mm)和体重(精确至 0.1 g)。

1.2 数据处理

1.2.1 体长和体重关系 采用幂函数拟合体长和体重关系, 公式为: $W=aL^b$, 其中 W 为体重(g), L 为体长(cm), a 为条件因子, b 为异速生长指数。

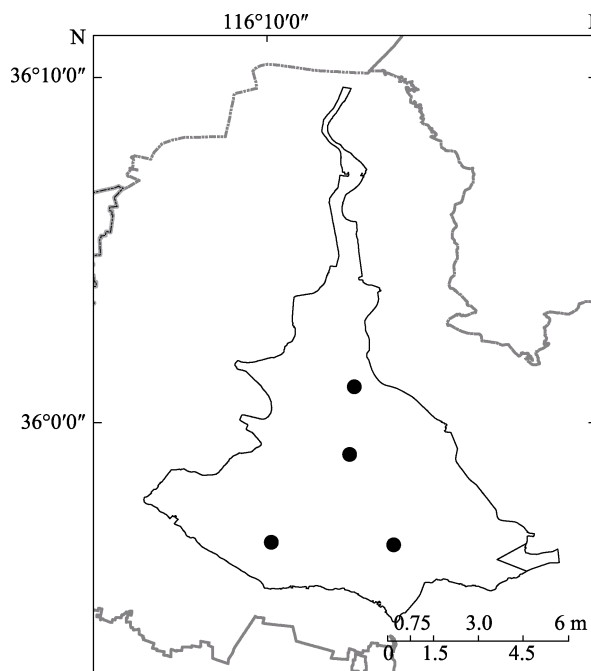


图 1 研究区域及采样点

Fig. 1 Study area and sampling sites

1.2.2 生长方程及生长、死亡参数 运用 TropFishR 软件包中的体长频率分析法(electronic length frequency analysis, ELEFAN)拟合 Von Bertalanffy 生长方程(VBGF), 使用遗传算法(genetical gorithm, GA)进行优化。本研究拟针对刀鲚的季节性生长变化进行研究, 使用季节性生长方程, 季节性增长方程由 Pither 和 MacDonald^[12]修正, 在原有的 VBGF 方程基础上添加了正弦波动。本文以年为时间标度单位, 公式为:

$$L_t = L_{\infty} \left[1 - e^{-K(t-t_0) - \left(\frac{CK}{2\pi} \sin 2\pi(t-t_s) \right) \sin 2\pi(t_0-t_s)} \right]$$

式中, L_t 为 t 时间时的体长(cm); L_{∞} 为渐进体长(cm), 也称极限体长; K 为生长速率(a^{-1}), 衡量个体体长趋向其渐进值的相对速率; t_s 表示一年中生长最快的时间段, C 表示季节性生长的振幅强度, t_0 为理论生长起点年龄, 运用 Pauly 经验公式^[13]求得, 公式为:

$$\ln(-t_0) = -0.3922 - 0.2752 \ln L_{\infty} - 1.308 \ln K$$

对参数优化度的评估, 采用 Pauly 等^[14]提出的拟合优度 $Rn_{\max}$ 指数为判别标准, 公式为:

$$Rn = 10^{ESP/ASP/10}$$

式中, ESP (explained sum of peaks)表示理论波峰数, ASP (available sum of peaks)表示可获得波峰和的最大值, 是曲线能够得到的最大值。Rn 指数值介于 0 到 1 之间, 是拟合优度估计值。不断更改 L_{∞} 、 K 的初始值, 通过检验拟合优度 Rn 指数大小变化, 从而得出 Rn 指数最大值 $Rn_{\max}$ 且相应参数在生物学上能接受的 L_{∞} 、 K 值, 即最佳值。利用 bootstrap 方法对生长参数进行优化, 此方法是指总体分布未知时可通过对总体样本进行有放回、反复抽样从而组建多个样本并利用这些样本对总体进行推断, 本研究使用 bootstrap 方法对样本进行 100 次有放回抽样以使结果更具有统计学意义。

运用 TropFishR 软件包中的体长变换渔获曲线法(length-converted catch curve)估计总死亡系数 $Z^{[15]}$, 公式为: $\ln(N_t/\Delta t) = a + b \times t$

式中, N_t 为 t 龄体长组占总样品尾数的比例, Δt 为其相应体长组下限生长到体长组上限所需时间, t 为对应体长组中值年龄, 用于拟合的数据点的选取以未全面补充年龄段和接近渐进体长年龄段不能用来回归为原则, 拟合曲线斜率相反数为总死亡系数^[15], 即 $Z = -b$ 。根据渔获曲线方程推算线性回归中未被使用的各点对应的期望值, 计算每个点的观测值与期望值之比, 即为对应的捕捞选择性系数(S), S 为 0.5 时对应的体长即为开捕体长 (L_{50})^[16]。捕捞选择性与体长的关系使用逻辑斯第模型表示:

$$S_j = \frac{1}{1 + e^{-r(L_j - L_{50})}}$$

式中, L_j 、 S_j 分别表示体长及对应的选择性, L_{50} 为开捕体长, r 为常数。

自然死亡系数 M 运用 Pauly 经验公式^[17]求得, 公式为:

$$\lg M = -0.0066 - 0.279 \lg L_{\infty} + 0.6543 \lg K + 0.4634 \lg T$$

式中, T 为调查范围内全年平均水温, 根据实测数据东平湖全年平均水温为 14.1 °C。捕捞死亡系数为总死亡系数与自然死亡系数差值, 即 $F = Z - M$ 。资源利用率为捕捞死亡系数与总死亡系数的比值, 即 $E = F/Z$ 。

1.2.3 YPR 模型 单位补充量渔获量(yield per recruitment, YPR)是基于 Beverton—Holt 动态综合

模型^[18], 反映了补充量恒定条件下产量与捕捞强度的关系, 传统的 YPR 模型通常基于鱼类年龄, 但实际应用中数据不容易获取, 成本较大, 因此模型受到一定限制, 体长数据较易获取, 亦可用于构建 YPR 模型^[19-21]。本研究采用基于体长的 YPR 模型, 通过定义体长组 L_j , 以体长分组代替年龄结构, 公式为:

$$d_j = L_{j+1} - L_j \quad (1)$$

$$\Delta T_j = \frac{1}{K} \ln \frac{L_{\infty} - L_j}{L_{\infty} - L_j - d_j} \quad (2)$$

$$N_j = R \cdot e^{-\sum_{k=1}^{j-1} (S_k F + M) \Delta T_k} \quad (3)$$

$$C_j = N_j \frac{S_j F}{S_j F + M} [1 - e^{-(S_j F + M) \Delta T_j}] \quad (4)$$

$$Y = \sum_{j=1}^n W_j C_j \quad (5)$$

$$\frac{Y}{R} = \sum_{j=1}^n \left[\frac{W_j S_j F}{S_j F + M} (1 - e^{-(S_j F + M) \Delta T_j}) e^{-\sum_{k=1}^{j-1} (S_k F + M) \Delta T_k} \right] \quad (6)$$

式(1)、(2)计算 j 和 $j+1$ 体长组间的生长间隔, 本研究以 1 cm 为组距构建模型。式(3)、(4)分别计算 j 体长组的生物量和捕捞生物量, 式(5)计算渔获量。综上可得式(6), 其中 Y 为渔获量, R 为补充量, S_j 、 W_j 为 j 体长组的捕捞选择性和平均重量。**1.2.4 SSBPR 模型** 单位补充量产卵亲体量(spawning stock biomass per recruitment, SSBPR), 是指单位补充量的产卵潜力, 亦是基于 Beverton—Holt 动态综合模型计算, 计算方法与 YPR 相似^[22]。

以上模型构建和参数计算均使用 R 软件(version 3.4.4), 使用“TropFishR”包进行生长方程和曲线的拟合。

2 结果与分析

2.1 生长参数及生长方程

东平湖刀鲚体长范围为 4.9~26.2 cm, 平均体长为(12.2±2.4) cm, 体重范围 1.1~51.8 g, 平均体重为(6.6±4.5) g, 体重(W)—体长(L)关系式为 $W = 0.0045L^{2.8574}$ ($R^2 = 0.9104$)(图 2), 表明刀鲚服从负异速生长规律。本研究将雌雄个体合并处理, 不做差异讨论。

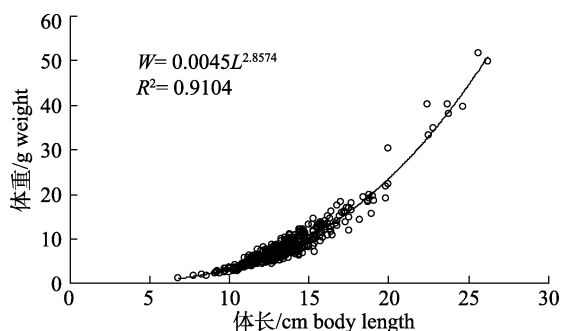


图 2 东平湖刀鲚体长(L)与体重(W)的关系
Fig. 2 Relationship between body length (L) and body weight (W) of *Coilia nasus* in the Dongping Lake

利用刀鲚体长数据,以 1 cm 组距建立体长频率分布直方图,运用 Elefan_GA 拟合 VBGF 季节性生长方程(图 3),Pauly 经验公式计算 t_0 ,对生长参数 L_{∞} 、 K 进行估算,并通过 bootstrap 进行参数优化(图 4),虚线(CI=95%)表示 95% bootstrap 置信区间所对应的相对生长曲线,粗实线表示概率密度最大的参数值所对应的相对生长曲线。X 轴所对应的值的含义是时间点,而非个体的年龄。经模型计算 $L_{\infty}=31.65\text{cm}$, $K=0.66$, $t_0=-0.23$, $C=0.65$, $t_s=0.40$, $Rn_{\max}=0.48$ 。

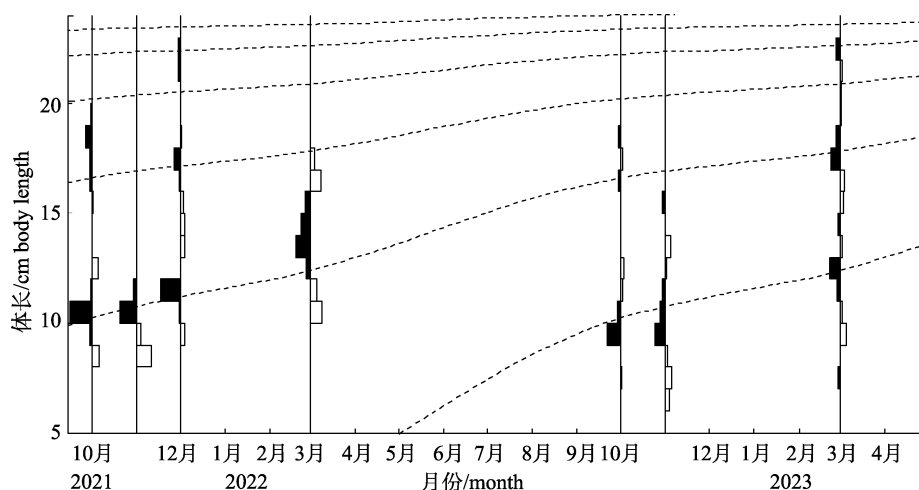


图 3 东平湖刀鲚的体长频率分布和 ELEFAN_GA 拟合的生长曲线
柱形图表示经过 ELEFAN_GA 方法重构的体长频率分布直方图,黑柱表示正峰值(高于移动平均值),白柱表示负峰值(低于移动平均值),虚线表示生长曲线。

Fig. 3 Size frequency of *Coilia nasus* in the Dongping Lake and growth curves estimated by ELEFAN.
Histogram indicates the length-frequency distribution restructured by ELEFAN, black column and white column indicated positive peak (above running average) and negative peak (below running average), dotted lines indicated growth curves

2.2 死亡参数、开发率及开捕体长

由软件估算可得各项参数,分别为 $Z=2.71 \pm 0.17$ 、 $M=1.074$ 、 $F=1.641$ 、 $E=0.604$ 。通过计算图 5 拟合线性关系中未利用点的 $\ln(N/t)$ 的观察值与期望值之比的累计率,估算刀鲚被捕获概率达 50% 的体长,即平均选择体长 L_{50} 为 9.15 cm。

2.3 YPR、SSBPR 模型

YPR 具体到东平湖刀鲚是指平均每补充进东平湖的 1 尾刀鲚一生中所能提供的生物量,本研究以 1 cm 体长为间隔,绘制 YPR 随 F 的趋势图(图 6)。随着 F 的增大,YPR 呈现先上升后下降的趋势,由图可知东平湖刀鲚现阶段的 F_{cur} 介于 $F_{0.1}(0.978)$ 和 $F_{\max}(2.204)$ 之间。SSBPR 是指平均每

补充进东平湖的 1 尾刀鲚一生中所能提供的产卵亲体的生物量(图 7),随着捕捞强度的增大,SSBPR 呈下降趋势。由图可知现阶段捕捞强度介于 $F_{20\%}(2.848)$ 与 $F_{40\%}(1.065)$ 之间,略大于 $F_{35\%}(1.286)$ 。通过拟合 YPR 与 L_{50} 关系图可知(图 8),目前的捕捞强度下 YPR 随开捕体长的增加表现出先增加至峰值后降低的趋势,当前开捕体长低于可获得 YPR 最大值的开捕体长(13.1 cm)。

3 讨论

3.1 刀鲚生长参数的空间异质性及 YPR、SSBPR 结果分析

鱼类生长参数可以有效反映鱼类的生命周期

和生长速度,既是研究鱼类资源波动和合理利用的基础,也是渔业资源管理和保护的前提^[23]。本研究拟合结果表明东平湖刀鲚每年 5 月份左右鱼卵孵化,经过 3 年的成长期可接近极限体长,振幅强度 $C=0.71$ 说明季节性生长规律较为明显,生长最快时间约为 6—7 月份,生长最慢季节为 12 月份,与经验观测结果较为一致。对比 4 种不同地理群体在生长、死亡参数等方面表现出明显差异(表 1),反映了不同地理群体通过改变生活史对策实现对其所处环境的适应,体现了不同水域刀鲚生长的空间异质性。历史上东平湖是黄河洄游型

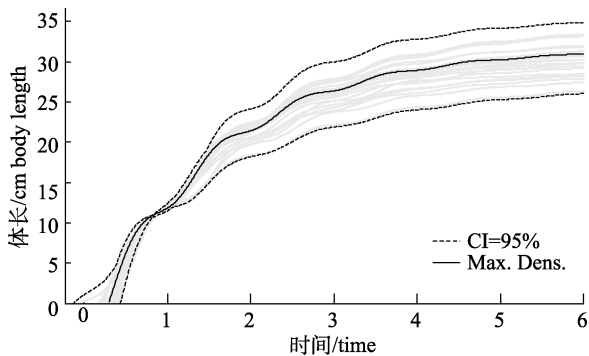


图 4 东平湖刀鲚相对生长曲线分布

虚线(CI=95%)表示 95% bootstrap 置信区间所对应的相对生长曲线,粗实线(Max.Dens, max density)表示概率密度最大的参数值所对应的相对生长曲线,细实线代表每次运算得到的曲线。

X 轴所对应的值的含义是时间点,而并非个体的年龄。

Fig. 4 The distribution of relative growth curves of *Coilia nasus* in the Dongping Lake

The dashed line (CI=95%) represents the relative growth curve corresponding to the 95% bootstrap confidence interval. The heavy line represents the relative growth curve corresponding to the parameter values with the maximum probability density. The thin lines represent every calculated relative growth curve. The values on the X-axis means time, not the age of the individual.

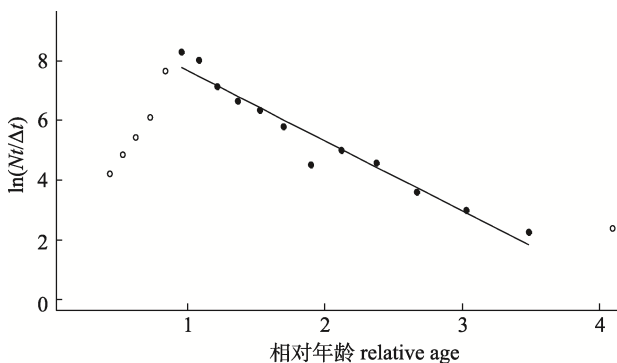


图 5 东平湖刀鲚体长转换渔获曲线

Fig. 5 Length-converted catch curve of *Coilia nasus* in the Dongping Lake

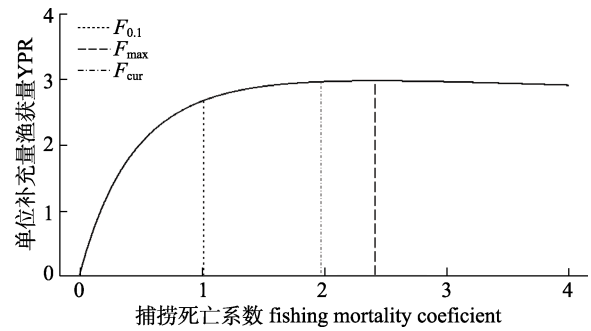


图 6 单位补充量渔获量随捕捞死亡系数的变化曲线

$F_{0.1}$ 为单位补充量渔获量曲线斜率为最大斜率的 10% 时捕捞死亡系数; F_{max} 为单位补充量所产出的渔获量最多时的捕捞死亡系数; F_{cur} 是指当前的捕捞死亡系数。

Fig. 6 Relationship of yield per recruitment (YPR) with fishing mortality coefficient

$F_{0.1}$: fishing mortality coefficient which is 10% of the maximum YPR slope. F_{max} : fishing mortality coefficient with the maximum YPR; F_{cur} : current fishing mortality coefficient.

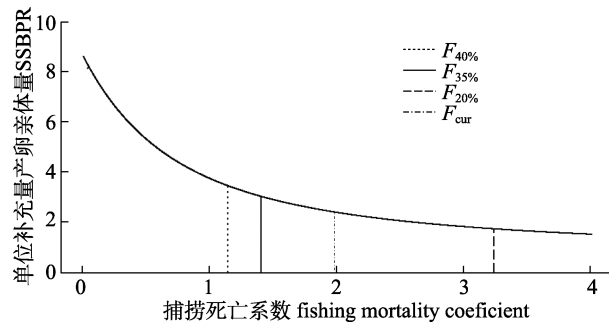


图 7 单位补充量产卵亲体量随捕捞死亡系数的变化曲线

$F_{20\%}$ 指单位补充量所提供的产卵亲体生物量为最大产卵亲体的生物量的 20% 时的捕捞系数,同 $F_{35\%}$, $F_{40\%}$;

F_{cur} 是指当前的捕捞死亡系数。

Fig. 7 Relationship of spawning stock biomass per recruitment (SSBPR) with fishing mortality coefficient

$F_{20\%}$: fishing mortality coefficient when SSBPR is 20% of the maximum SSBPR, which is the same as $F_{35\%}$, $F_{40\%}$.

F_{cur} : current fishing mortality coefficient.

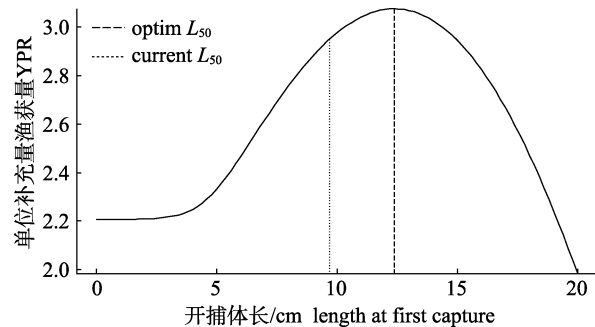


图 8 单位补充量渔获量随开捕体长变化曲线

断线代表最佳捕捞体长,点线代表当前捕捞体长。

Fig. 8 Relationship between yield per recruitment (YPR) and length at first capture

Broken lines indicate optimum length at first capture, dotted lines indicate current length at first capture.

表 1 不同水域刀鲚生长、死亡参数对比

Tab. 1 Comparison of growth and death parameters of *Coilia nasus* in different locations

地点 location	L_{∞}	K	Z	M	F	E	L_{50}
东平湖 Dongping Lake	31.7	0.66	2.71	1.07	1.64	0.60	9.15
淀山湖 Dianshan Lake ^[5]	35.7	0.54	2.12	0.87	1.25	0.59	11.18
鄱阳湖 Poyang Lake ^[6]	40.9	0.24	1.36	0.52	0.84	0.60	/
长江靖江段 Jingjing section of Yangtze River ^[24]	29.3	0.44	2.43	0.98	1.45	0.59	10.82

注: L_{∞} 为渐进体长; K 为生长速率; Z 为总死亡系数; M 为自然死亡系数; F 为捕捞死亡系数; E 为开发率; L_{50} 为开捕体长。
Note: L_{∞} is progressive body length; K is the growth rate; Z is overall mortality coefficient; M is nature mortality coefficient; F is fishing mortality coefficient; E is development rate; L_{50} is length at first capture.

刀鲚的主要产卵场,但由于水坝修建、黄河断流等因素,刀鲚洄游通道被阻断致使其资源量连年下降直至消失,研究表明刀鲚再次在东平湖出现始于南水北调东线实施调水后并迅速定居建群,表现出较强的环境适应性^[25],针对东平湖鱼类群落结构的研究表明近年来刀鲚已成为东平湖鱼类群落的优势种和主要经济种(未发表数据),在 4 个地理群体对比中,东平湖刀鲚 K 值最大表明其可以用最短的时间生长到接近极限体长,说明东平湖刀鲚适口饵料丰富,生长速度较快,推测来自相似生态位鱼类的竞争压力较小,但同样东平湖刀鲚 L_{∞} 较低、死亡参数最高,也说明东平湖刀鲚面临更大的捕捞压力。

东平湖刀鲚主要捕捞方式为刺网,开发率 $E=0.6$, Gulland 提出的一般鱼类最适开发率为 $0.5^{[26]}$,目前东平湖刀鲚已处于过度开发状态,同样的结论在 YPR 模型拟合中也有显现,在 YPR 模型中 $F_{\max}$ 是指单位补充量所产出的渔获量最多时的捕捞死亡系数, F_{cur} 是指当前的捕捞死亡系数, $F_{0.1}$ 是指单位补充量渔获量曲线斜率为最大斜率的 10%,即当捕捞死亡率达到 $F_{0.1}$ 时,所获得单位补充量渔获量接近最大值(大于最大单位补充量渔获量的 90%),而捕捞死亡率明显小于 $F_{\max}^{[27]}$,常被用来当作最佳的保护与开发的生物学参考点也称为最适产量所对应的捕捞努力量,是应用最广泛的目标参考点之一^[19]。根据曲线可知,降低捕捞强度至 $F_{0.1}$, YPR 基本保持不变,可以保证产量相对稳定。刘逸文等^[28]对山东近海口虾蛄的研究表明假如维持捕捞强度不变,仅通过改变开捕体长 YPR 增幅最高可达 10%,高春霞等^[10]针对淀山湖刀鲚的研究也表明增大开捕体长至 21.42 cm,

YPR 随之增大,与最佳状态下的 0.05 基本持平,本研究显示现有捕捞压力下的开捕体长为 $L_{50}=9.15\text{ cm}$,远小于淀山湖、长江靖江段的开捕体长,建议如保持现有捕捞压力不变的情况下,可通过调整网口密度,将开捕体长设置为 12.5~14.5 cm 之间以获取生态效益和经济效益的最大平衡。此外,本文为拟合 SSBPR 曲线,通过随机抽样用产卵亲体生物量与渔获量比值计算出潜在产卵潜力(spawning potential ratio, SPR)为 4.5%, Mace 等^[29]针对 SSBPR 提出了 3 个生物学参考点,该生物学参考点对制定禁渔期有指导性意义, $F_{35\%}$ 指当捕捞死亡率为 $F_{35\%}$ 时,单位补充量所提供的产卵亲体生物量为最大产卵亲体的生物量的 35%,适合作为渔业资源开发和管理生物学参考点, $F_{40\%}$ 则充分考虑了补充量的时空不稳定性,是相对较为保守的参考点,常被用作较为适宜的生物学参考点, $F_{20\%}$ 常被用作极限值,即该点获得 SSBPR 已接近最小值^[29-30]。通过拟合 SSBPR 曲线得出现阶段捕捞强度小于极限值 $F_{20\%}$,但尚未达到生物学参考点 $F_{35\%}$,目前东平湖禁渔期为每年 4 月 1 日至 8 月 31 日,根据对刀鲚生长参数和 SSBPR 拟合结果,该禁渔期设置较为合理(仅针对刀鲚)。综上所述,东平湖刀鲚目前处于过度开发阶段,应降低捕捞强度、增加开捕体长使其资源可持续利用,达到生态、经济效益平衡的目的,可采用减少渔船数量、增大网目尺寸等方法实现。

3.2 不同研究方法对比及研究进展

较早时期研究鱼类生长特征是首先对耳石、鳞片、脊椎骨鉴定年龄,然后结合体长进行生长方程的推算,但受制于此方法年龄鉴定周期长、数据量不足等制约因素,局限性和不确定性较大,

容易产生误差。此后 FAO 开发了用于渔业资源管理的软件 FiSAT II, 该软件根据体长频率分析法 (ELEFAN) 拟合生长方程, 由于体长数据较易获取, 该方法一定程度上解决了利用硬组织在推算年龄和生长参数中存在的系统性误差, 相较传统的以年龄鉴定为基础的工作方法, ELEFAN 为生长方程拟合提供了更为便捷、客观的方法, 该方法也可利用长度频率的时间规律对生物学参数、开捕体长、生物学参考点等进行估算, 弥补了通过硬组织年龄鉴定拟合的生长方程无法较为全面地描述渔业资源管理状况的缺陷^[31-32]。近年来基于 R 语言的评估模型应用快速发展, 相比于 FiSAT II 较为制式的计算方法, R 语言亦是基于 ELEFAN 但其可编辑的算法重现性更强、准确性更高、误差更小。有研究聚焦于减少此类误差方法, 如有研究表明结合 bootstrap 方法可以更好的评估由于样本质量问题所产生的参数误差, 此方法作为一种重要的非参数统计方法, 可以更为精确的计算生长参数并得出置信区间^[33-34], 还有研究^[35]对计算 VBGF 的遗传(GA)、模拟退火(simulating annealing, SA)和响应面分析(response surface analysis, RSA) 3 种优化算法进行比较得出基于并行运算的 GA 算法概率的全局优化性能最好, 刘逸文^[28]比较了 8 种自然死亡系数的计算方法并用平均值代替传统 Pauly 经验公式值以使误差更小。此外, R 语言也可利用单位补充量怀卵量(egg per recruitment, EPR)、SSBPR 等模型评价种群的繁殖潜力, 弥补了 FiSAT II 在此方面的不足。随着研究技术的深入, 基于种群动态模型的评估模型迅速发展^[36-37], 此类模型进一步加入了人类干扰因素, 综合考虑了种群的生长、繁殖、死亡和补充等主要生活史过程, 融入了补充限制和密度制约等关键过程, 较为全面地反映了种群动态^[38], 如 Sharma 等^[39]构建了多种模型为基础的种群动态评估框架, 包含了从亲鱼、鱼卵、仔稚鱼到成鱼的全过程生活史, 模拟了产卵场和栖息地的人为影响因子(增殖放流)与环境影响因子变化对太平洋鲑种群的影响, 但此类模型由于过程复杂、参数较多、所需数据量较大在国内的发展尚属于初探阶段。

参考文献:

- [1] Cai D L, Ji D C, Zhou C W. An ecological investigation and fishery of the anchovy (*Coilia ectenes* Jordan et Seale) in the lower Yello River[J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 1980, (2): 97-107. [蔡德霖, 汲岱昌, 周才武. 黄河下游刀鲚的生态和渔业概况[J]. 山东大学学报(自然科学版), 1980, (2): 97-107.]
- [2] Jiang T. Study on migratory ecology of coilia fish in chinese waters inferred from otolith morphometric and microchemical characteristics[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. [姜涛. 基于耳石形态和微化学特征的我国鲚属鱼类洄游生态学研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.]
- [3] Jiang T, Zhou X Q, Liu H B, et al. Two microchemistry patterns in otoliths of *Coilia nasus* from Poyang Lake, China[J]. Journal of Fishery of China, 2013, v.37(2): 239-244. [姜涛, 周昕期, 刘洪波等. 鄱阳湖刀鲚耳石的两微化学特征[J]. 水产学报, 2013, v. 37(2): 239-244.]
- [4] Chen T T, Jiang T, Lu M J, et al. Microchemistry analysis of otoliths of *Coilia nasus* and *Coilia brachygnathus* from the Jingjiang section of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, v. 28(1): 149-155. [陈婷婷, 姜涛, 卢明杰等. 基于耳石微化学的长江靖江段长颌鲚与短颌鲚生境履历重建[J]. 湖泊科学, 2016, v. 28(1): 149-155.]
- [5] Gao C X, Tian S Q, Dai X J. Stimulation 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.]
- [6] Wu B, Fang C L, Zhang Y P. Biological parameters and growth feature of reproductive population of tapertail anchovy *Coilia nasus* in Poyang Lake[J]. Fisheries Science, 2016, 35(2): 142-146. [吴斌, 方春林, 张燕萍. 鄱阳湖刀鲚繁殖群体生物学参数及生长特性的初步分析[J]. 水产科学, 2016, 35(2): 142-146.]
- [7] Cong X R, Li X Q, Dong G C, et al. Preliminary investigations on *Coilia nasus* from the Kenli section of the Huanghe River based on otolith microchemistry[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(1): 31-37. [丛旭日, 李秀启, 董贯仓等. 基于耳石微化学的黄河垦利段刀鲚生活史初步研究[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(1): 31-37.]
- [8] Cong X R, Li X Q, Dong G C, et al. Anadromous Tapertail Anchovy *Coilia nasus* is still found in Dongping Lake[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2019, 32(5): 55-59. [丛旭日, 李秀启, 董贯仓等. 东平湖仍有洄游性刀鲚分布的实证研究[J]. 水产学杂志, 2019, 32(5): 55-59.]
- [9] Ma Q Y, Mu X X, Ren Y P, et al. The growth, mortality and yield per recruitment of white-spotted conger (*Conger myri-*

- aster) in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 881-888. [麻秋云, 牟秀霞, 任一平等. 东、黄海星康吉鳗生长、死亡和单位补充量渔获量[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 881-888.]
- [10] Gao C X, Ma Q Y, Tian S Q, et al. Growth, mortality and yield per recruitment of small yellow croaker in offshore waters of southern Zhejiang[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(5): 925-937. [高春霞, 麻秋云, 田思泉等. 浙江南部近海小黄鱼生长、死亡和单位补充量渔获量[J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 925-937.]
- [11] Zhao T Y, Liu Y W, Wang K, et al. Heterogeneity of growth parameters of *Cynoglossus joyneri* in Haizhou Bay and Laizhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(10): 167-174. [赵天亚, 刘逸文, 王琨等. 海州湾和莱州湾短吻红舌鲷生长参数的异质性[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(10): 167-174.]
- [12] Malcolm Haddon. Modelling and Quantitative Methods in Fisheries[M]. Translated by Chen P M, Qin C X, Yuan H R, et al. Beijing: China Ocean Press, 2015: 187-189. [Malcolm Haddon. 渔业建模和定量评估方法[M]. 陈丕茂, 秦传新, 袁华荣等, 译. 北京: 海洋出版社, 2015: 187-189.]
- [13] Pauly D. Theory and management of tropical multispecies stocks: A review, with emphasis on the Southeast Asian demersal fisheries[M]. Metro Manila: ICLARM, 1979: 23-55.
- [14] Pauly D, David N. ELEFAN I, a basic program for the objective extraction of growth parameters from length-frequency data[J]. Meeresforschung, 1981, 28(4): 205-211.
- [15] Pauly D. Length-converted catch curves and the seasonal growth of fishes[J]. Fishbyte, 1990, 8(3): 33-38.
- [16] He B Q, Li H Q. Stock assessment of *Collichthys lucidus* in Pearl River estuary[J]. Journal of Fisheries of China, 1988, 12(2): 124-134. [何宝全, 李辉权. 珠江河口棘头梅童鱼的资源评估[J]. 水产学报, 1988, 12(2): 124-134.]
- [17] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters and mean environmental temperature in 175 fish stocks[J]. ICEC Journal of Marine Science, 1980, 39: 17-192.
- [18] Beverton R JH, Holt S J. On the dynamics of exploited fish populations[M]. London: Chapman & Hall, 1957: 33-35.
- [19] Hilborn R, Walters C J. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics, and uncertainty[M]. New York: Chapman & Hall, 1992: 41-45.
- [20] Kvamme C, Bogstad B. The effect of including length structure in yield-per-recruit estimates for northeast Arctic cod[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(2): 357-368.
- [21] Chen Y. A comparison study of age-and length structured yield-per-recruit models[J]. Aquatic Living Resources, 1997, 10(5): 271-280.
- [22] Sissenwine M P, Shepherd J G. An alternative perspective on recruitment overfishing and biological reference points[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1987, 44: 913-918.
- [23] Zhan B Y. Assessment of fishery resources[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 1-425. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 1-425.]
- [24] 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.]
- [25] Li X Q, Liu F, Leng C M, et al. Genetic structure and diffusion of population of *Coilia ectenes taihuensis* in Lake Nansi inferred from the mitochondrial control region[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4): 686-692. [李秀启, 刘峰, 冷春梅等. 基于线粒体 DNA 控制区的南四湖湖鲌(*Coilia ectenes taihuensis*)群体遗传结构和种群扩散[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 686-692.]
- [26] Mace P, Sissenwine M. How much spawning per recruit is enough[C]//Stephen J. Smith, Joseph J. Hunt, Denis Rivard. Risk Evaluation and Biological Reference Points for Fisheries Management. Canada: NRC Research Press, 1993, 120: 101-118.
- [27] Gulland J A, Boerema L K. Scientific advice on catch levels[J]. Fishery Bulletin, 1973, 71(2): 325-335.
- [28] Liu Y W, Zhang C L, Liu S D, et al. Yield per recruitment evaluation of *Oratosquilla oratoria* in coastal waters of Shandong[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(2): 213-221. [刘逸文, 张崇良, 刘淑德等. 山东近海口虾蛄单位补充量渔获量评估[J]. 水产学报, 2020, 44(2): 213-221.]
- [29] Mace P M. Relationships between comm on biological reference points used as thresholds and targets of fisheries management strategies[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994, 51: 110-122.
- [30] Gulland J A. Fish Stock Assessment: a Manual of Basic Methods[M]. New York: Wiley, 1983: 869-870.
- [31] Wang X H, Qiu Y S, Du F Y. Fisheries biology of *Nemipterus bathybius* and its optimum catchable size in northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(12): 2428-2434. [王雪辉, 邱永松, 杜飞雁. 南海北部深水金线鱼生物学及最适开捕体长[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2428-2434.]
- [32] Chen Z Z, Qiu Y S, Huang Z R. Estimation of growth and mortality parameters of *Argyrosomus argentatus* in northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 712-716. [陈作志, 邱永松, 黄梓荣. 南海北部

- 白姑鱼生长和死亡参数的估算[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 712-716.]
- [33] Johnson R W. An introduction to the bootstrap[J]. Teaching Statistics, 2010, 23(2): 49-54.
- [34] Bradley E, Tibshirani R J. Introduction to the Bootstrap[M]. New York and London: Chapman & Hall, 1993: 49-54.
- [35] Wang K, Zhang C L, Chen N, et al. Evaluating the growth parameters of *Pholis fangi* based on the bootstrap-ELEFAN method[J]. Fishery Sciences of China, 2019, 26(3): 512-521. [王琨, 张崇良, 陈宁等. 基于 Bootstrap 的 ELEFAN 方法在评估方氏云鲷群体生长参数中的应用[J]. 中国水产科学, 2019, 26(3): 512-521.]
- [36] Lorenzen K, Agnalt A L, Lee Blankenship H, et al. Evolving context and maturing science: Aquaculture-based enhancement and restoration 12 enter the marine fisheries management toolbox[J]. Reviews in Fisheries Science, 2013, 21(3-4): 213-221.
- [37] Zhang C L, Xu B D, Xue Y, et al. Fisheries stock enhancement assessment: Progress and prospect[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(8): 1509-1524. [张崇良, 徐宾铎, 薛莹等. 渔业资源增殖评估研究进展与展望[J]. 水产学报, 2022, 46(8): 1509-1524.]
- [38] Lorenzen K. Fish population regulation beyond “stock and recruitment”: The role of density-dependent growth in the recruited stock[J]. Bulletin of Marine Science, 2008, 83(1): 181-196.
- [39] Sharma R, Cooper A B, Hilborn R. A quantitative framework for the analysis of habitat and hatchery practices on Pacific salmon[J]. Ecological Modelling, 2005, 183(2-3): 231-250.

Estimation of biological parameters, yield per recruitment, and spawning stock biomass per recruitment of *Coilia nasus* in Dongping Lake

CONG Xuri^{1,2,3}, DONG Guancang², LI Xiuqi², WANG Qingqing², LENG Chunmei², GAO Yunfang², REN Yiping¹

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
2. Shandong Freshwater Fisheries Research Institute, Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Lower Reaches of the Huang River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250013, China;
3. Binzhou University, Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta; Binzhou 256600, China

Abstract: To provide technical guidance and a theoretical basis for the sustainable development of *Coilia nasus* resources in Dongping Lake, this study estimated the growth and death parameters of *C. nasus* using ELEFAN_GA technology and fitted the Von Bertalanffy (VBGF) growth equation based on the length and mass data of *C. nasus* obtained from a gillnet survey in Dongping Lake from 2021 to 2023. The yield per recruitment (YPR) and spawning stock biomass per recruitment (SSBPR) models based on body length structure were constructed to assess the resource dynamics and management strategy of *C. nasus* in Dongping Lake. The results show that the body length of *C. nasus* ranges from 4.9 to 26.2 cm, with an average body length of (12.2±2.4) cm. Meanwhile, the body weight ranged from 1.1 to 51.8 g, with an average weight of (6.6±4.5) g. The ELEFAN_GA method based on Bootstrap was used to estimate the parameters, and the result revealed that the growth parameters infinite length of *C. nasus* was 31.65 cm (L_{∞}), with a growth parameter of 0.66 (K). Meanwhile, the theoretical starting age of growth (t_0) was -0.23, with a growth amplitude of 0.65 (C), and the annual fastest growing time of 0.40 (t_s). The total coefficient of mortality was 2.71 (Z), with the coefficient of natural mortality at 1.074 (M), and the coefficient of fishing mortality at 1.641 (F). The exploitation rate was determined to be 0.604 (E), and the optimum catchable size was 9.15 cm (L_{50}). The results of the YPR model showed that with the increase of F , the YPR value first increased and then decreased, and the biological reference points $F_{0.1}$ and $F_{\max}$ were 0.978 and 2.204, respectively. The results of the SSBPR model show that with an increase in fishing intensity, the SSBPR shows a downward trend. The current fishing intensity was between $F_{20\%}$ (2.848) and $F_{40\%}$ (1.065), which was

slightly greater than that of $F_{35\%}$ (1.286). In conclusion, the growth of *C. nasus* in Dongping Lake shows obvious seasonal changes compared with other geographical populations, and the differences in the biological parameters of *C. nasus* in Dongping Lake reflect the spatial heterogeneity of its growth process. The maximum K value indicates that *C. nasus* in Dongping Lake can grow to an infinite length in the shortest time, indicating that Dongping Lake is rich in bait. However, the high exploitation rate and low optimum catchable size indicate that *C. nasus* in Dongping Lake is currently in an overexploited state. The SSBPR curve shows that the current fishing intensity is less than the limit value of $F_{20\%}$ and slightly less than the biological reference point of $F_{35\%}$. The schedule of closed fishing season in Dongping Lake is from April 1st to August 31st each year. According to the fitting results for the growth parameters and SSBPR, a closed fishing season was relatively reasonable (only for *C. nasus*). To ensure the sustainable use and achieve a balance between ecological and economic benefits of *C. nasus* in Dongping Lake, maintaining the sustainable development of fishery resources can be achieved by increasing the mesh size and optimum catchable size while appropriately reducing the number of fishing vessels to alleviate fishing intensity.

Key words: Dongping Lake; *Coilia nasus*; biological parameters; yield per recruitment; spawning stock biomass per recruitment; biological reference point

Corresponding author: DONG Guancang. E-mail: dgc3869676@163.com