

基于体长频率数据的西江封开段赤眼鳟可捕规格与资源保护研究

朱书礼, 李跃飞, 武智, 李捷, 夏雨果, 杨计平, 李新辉

(中国水产科学研究院珠江水产研究所/农业农村部珠江中下游渔业资源环境科学观测实验站, 广东广州 510380)

摘要: 该研究于 2014 年在西江封开段进行了 8 个月的渔获物调查, 采集了 526 尾赤眼鳟 (*Squaliobarbus curriculus*) 的体长、体质量等生物学信息, 利用体长频率分布估算赤眼鳟生长、死亡参数, 并分析渔业资源利用状况。结果显示, 赤眼鳟体长-体质量的幂函数关系参数 $a=0.0288$, $b=2.8582$ 。von Bertalanffy 生长参数渐近体长 $L_{inf}=74$ cm, 生长系数 $K=0.1$, 自然死亡系数 $M=0.19$, 总死亡系数 $Z=1.51$, 捕捞死亡系数 $F=1.32$, 开发率 $E=0.88$ 。渔业资源量分析显示, 2014 年西江封开段赤眼鳟资源量为 2 234 652 尾、428.558 t。单位补充量渔获量 (Yield per recruit, YPR) 模型分析显示, 当前赤眼鳟首次开捕体长为 12.3 cm, F 为 1.32, YPR 为 1.89 g; 当首次开捕体长调整为 27.8 cm、 F 调整为 0.45 时, 可获得 YPR 7.76 g。当前赤眼鳟资源处于过度开发状态, 建议将开捕体长设为 27.8 cm, 将捕捞强度降至 0.45。

关键词: 赤眼鳟; 体长频率; 可捕规格; 资源保护; 西江封开段

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Research on catchable size and resource protection of *Squaliobarbus curriculus* in Xijiang River Fengkai section based on length-frequency data

ZHU Shuli, LI Yuefei, WU Zhi, LI Jie, XIA Yuguo, YANG Jiping, LI Xinhui

(Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Middle and Lower Reaches of Pearl River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510380, China)

Abstract: We conducted an eight-month catch survey in 2014 and collected 526 individuals of *Squaliobarbus curriculus*. Based on their body length and mass, we estimated the biological stock characteristics (growth and mortality parameters) and assessed the stock size and status of *S. curriculus*. The length-mass relationship was fitted by a power function ($a=0.0288$, $b=2.8582$). The von Bertalanffy growth parameters were estimated: the asymptotic length L_{inf} was 74 cm; the growth coefficient K was 0.1; the natural mortality coefficient M was 0.19; the total mortality coefficient Z was 1.51; the fishing mortality rate was as 1.32; the exploitation rate was 0.88. In 2014, the size of the stock in numbers and biomass were 2 234 652 individuals and 428.558 t, respectively. Results of the yield per recruit (YPR) modeling shows that the current length at first capture was 12.3 cm; the fishing mortality rate was 1.32; the current YPR was 1.89 g. When the length at first capture was 27.8 cm and the fishing mortality rate was 0.45, the YPR was 7.76. The current stocks of *S. curriculus* have been over-exploited. It is suggested that the length at first capture should be 27.8 cm, and the fishing mortality rate should be 0.45.

收稿日期: 2019-11-13; 修回日期: 2020-02-26

资助项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”(2018YFD0900903); 珠江渔业资源调查与评估创新团队项目(2020TD10, 2020ZJTD-04)

作者简介: 朱书礼(1987—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事渔业资源和分子生物学研究。E-mail: zshuli2009@126.com

通信作者: 李新辉(1961—), 男, 研究员, 从事渔业资源与生态保护研究。E-mail: lxhui01@aliyun.com

Key words: *Squaliobarbus curriculus*; Length frequency; Catchable size; Resource conservation; Xijiang River Fengkai section

西江是珠江的主干流,发源于云南省曲靖市沾益县马雄山,在广东省佛山市三水区思贤窖与北江汇合后进入三角洲网河区,然后注入南海^[1]。西江属于亚热带气候区,气候温和、雨量充沛,流域水环境适合鱼类生长,鱼类资源丰富,是主要的淡水鱼类产区之一^[2]。赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculus*)隶属于鲤形目、鲤科、雅罗鱼亚科、赤眼鳟属,广泛分布于中国、朝鲜和越南地区^[3]。赤眼鳟为杂食性,对环境适应能力强,在珠江中下游的渔业生产中占有较高的比重,是珠江主要的经济鱼类^[4]。20世纪80年代,中国水产科学研究院珠江水产研究所联合有关单位对珠江水系渔业资源进行过一次系统调查,研究了赤眼鳟生长、繁殖、摄食等生物学特征,并阐述了其产卵场、渔期、渔场等信息^[5]。

西江是赤眼鳟重要的产卵和育肥栖息地。为保护赤眼鳟的种质资源,西江典型水域划定了保护区,以保护其资源及生存环境^[6]。从2011年起西江流域开设实施禁渔期制度,这也为赤眼鳟的资源养护提供了重要保证。然而近年来,受梯级开发、航道清礁、疏浚、过度捕捞、环境污染等因素影响,西江渔业资源衰退严重,亟需对渔业资源现状开展评估,为西江渔业资源养护提供科学指导。渔业的科学分析和评价,为渔业资源的生态、经济和社会可持续发展奠定了基础。了解当前的捕捞压力和生物学参考水平资源量,将有助于渔业资源可持续发展管理战略的制定^[7]。传统的渔业资源评估成本较高且缺乏调查数据,难以进行有效的分析评估。统计调查显示,全球渔业种类有资源评估的不足1%^[8]。计算机模拟能力的提高促进了渔业资源评估方法的快速发展,资源评估模型也呈现多样化和复杂化。利用数据有限条件下的评估模型可以分析种群的生物量、自然死亡系数(M)、可持续产量和捕捞风险等。目前,用于渔业资源评估的模型还是以单物种模型为主^[9]。R软件包TropFishR是一种新的利用长度频率(LFQ)数据进行单种鱼类资源评估的分析工具,该工具编译单一物种资源量评估方法,专门为数据量有限的渔业提供评估分析^[7]。基于体长频率数据的渔业可捕规格及资源保护研究已有报道^[10-11],但尚未见有关赤眼鳟的研究。因此,为评估西江赤眼鳟渔业开发利用状况,本研究利用2014年在西江封开段赤眼鳟渔业生物学调查

数据,根据体长频率数据对其生长、死亡参数及资源利用状况进行分析,以期对西江赤眼鳟渔业资源保护提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间、地点和方法

2014年1、3、4、6、8、9、10和11月在西江封开江段(111°22'E—111°32'E, 23°13'N—23°28'N)利用流刺网、抛网和定置网进行采样调查,流刺网、抛网和定置网网目尺寸分别为5~10 cm、7~10 cm和5 cm。对采集的赤眼鳟样品进行体长和体质量的生物学测定,体长测定精确到0.1 cm,体质量测定精确到0.1 g。

1.2 数据分析方法

1.2.1 体长和体质量关系 赤眼鳟体长和体质量关系参考耿平等^[12]采用幂函数关系进行拟合,表达式为 $W=a \times L^b$ 。式中, W 表示体质量(g), L 表示体长(cm), a 为条件因子, b 为幂指数。

1.2.2 生长、死亡参数的估算 本研究使用TropFishR(v1.2)软件包在R 3.5.2上完成数据分析。将体长数据电子表格导入R转换为LFQ列表,组间距设置为2 cm,移动平均值(Moving average, MA)设置为9 cm^[13]。

von Bertalanffy生长函数(VBGF)的生长参数[渐近体长(L_{inf})和生长系数(K)]利用电子长度频率分析(Electronic length frequency analysis, ELEFAN)进行分析,使用Powell-Wetherall、ELEFAN、ELEFAN模拟退火法(ELEFAN_SA)和ELEFAN遗传算法(ELEFAN_GA)函数进行估算^[14-16]。利用Powell-Wetherall方法首先估算 L_{inf} ,然后将估算的 L_{inf} 用于ELEFAN的进一步分析^[7]。基于ELEFAN估算 L_{inf} 和 K 有4种方法:1) K-scan法用于估算固定 L_{inf} 对应的 K ;2) 响应面分析法(Response surface methodology, RSM);3) ELEFAN_SA;4) ELEFAN_GA。后3种方法可以同时估计 L_{inf} 和 K ^[17-18]。

M 和总死亡系数(Z)使用M_empirical和catchCurve函数进行计算。 M 的计算采用了基于200种鱼类综合分析得出的最新公式,该方法需要使用 L_{inf} 和 K ^[19]。catchCurve函数将长度转换的线

性捕获曲线应用于长度频率数据, 估算瞬时 Z 。捕捞死亡系数 (F) 和开发率 (E) 根据公式计算: $F=Z-M$, $E=F/Z$ ^[20]。

1.2.3 渔业资源状况分析 渔业资源量分析利用实际种群分析 (Virtual population analysis, VPA) 和 predict_mod 函数完成。赤眼鳟各体长组的资源量和 F 使用琼斯长度转换队列分析 (Jones' length converted cohort analysis, CA) 进行估算, CA 分析需要利用生长和死亡参数, 以及体长-体质量关系参数 a 和 b ^[7, 21-22]。

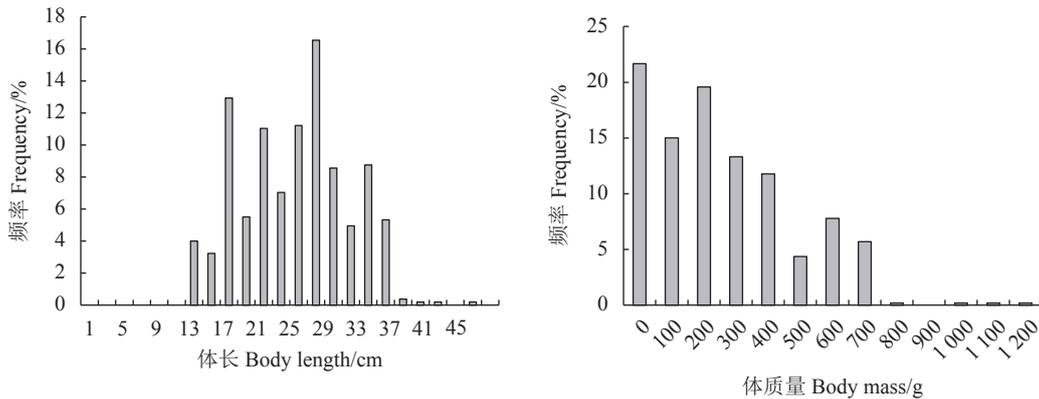


图1 西江封开江段赤眼鳟体长、体质量分布

Figure 1 Body length and mass distribution of *S. curriculus* in Fengkai section of Xijiang River

根据赤眼鳟体长和体质量数据, 拟合西江封开江段赤眼鳟体长-体质量的幂函数关系为 $W=0.0288L^{2.8582}$, $R^2=0.87$; $a=0.0288$, $b=2.8582$ (图2, 表1)。式中 $b<3$, 说明赤眼鳟的生长呈负异速生长, 体长生长速度要快于体质量^[23]。

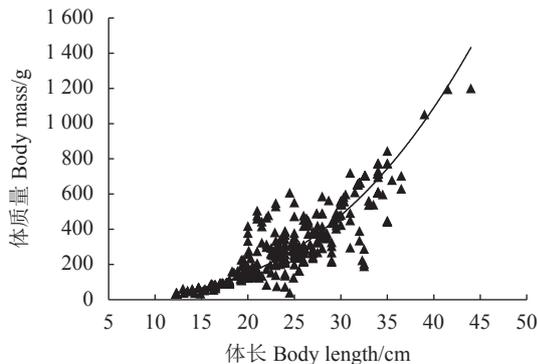


图2 西江封开江段赤眼鳟的体长和体质量的关系

Figure 2 Body length-mass relationship of *S. curriculus* in Fengkai section of Xijiang River

2.2 生长、死亡参数估算

将赤眼鳟体长数据电子表格导入 R 转换为 LFQ 列表, 数据可视化见图3。

利用 Excel 2010 和 R 软件完成数据的整理、统计分析和图形构建。

2 结果

2.1 体长、体质量分布及幂函数关系

2014 年在西江封开江段共采集赤眼鳟 526 尾, 体长为 12.30~44.00 cm, 平均 24.25 cm, 优势体长组为 17.00~35.00 cm (91.83%); 体质量为 34.0~1 200.0 g, 平均 313.3 g, 优势体质量组为 0~400 g (81.37%, 图1)。

利用 Powell-Wetherall、ELEFAN、ELEFAN_SA 和 ELEFAN_GA 函数对西江封开江段赤眼鳟 L_{inf} 和 K 进行估算。4 个函数估算的 L_{inf} 依次为 72、67、74 和 70 cm, K 依次为 0.46、0.51、0.10 和 0.33。在 L_{inf} 和 K 的估算过程中, 首先使用 Powell-Wetherall 估算 L_{inf} , 估算结果被进一步用于 ELEFAN 分析, 缩小值的搜索范围; ELEFAN 的不足之处在于无法对使用的参数进行自动优化; 相较于 ELEFAN, ELEFAN_SA 和 ELEFAN_GA 通过模拟退火算法和遗传算法进行了优化^[13, 24]。

M 和 Z 的分析参考 Mildenberger 等^[7] 使用 M_empirical 和 catchCurve 函数完成。其中 L_{inf} 和 K 使用 ELEFAN_SA 函数估算的结果。结果显示, 西江封开江段赤眼鳟 $M=0.19$, $Z=1.51$ 。计算得出 $F=1.32$, $E=0.88$ 。

2.3 资源量及状况分析

西江封开江段赤眼鳟资源量尾数为 2 234 652, 资源量为 428.558 t(图4)。

利用 predict_mod 函数进行单位补充量渔获量 (Yield per recruit, YPR) 模型分析(图5)。结果显

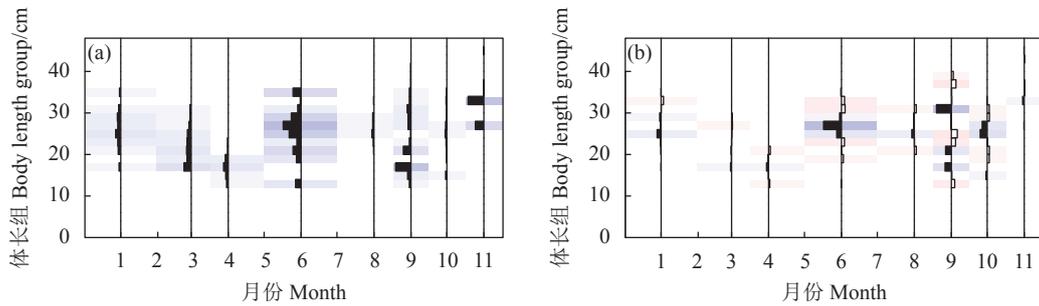


图3 体长频率数据可视化图

a. 原始捕获数据; b. 移动平均值为9 cm 的重建数据

Figure 3 LFQ Data visualization diagram

a. Original catches data; b. Data that restructured with a moving average setting of 9 cm

表1 不同时期西江赤眼鲮生长参数比较

Table 1 Growth and mortality parameters of *S. curriculus* in different periods in Xijiang River

生长参数 Growth parameter	年份 Year		
	1982 ^[5]	2008 ^[25]	2014 (本研究 This study)
生长条件因子 (a) Growing conditions factor	1.0809×10^{-2}	0.90×10^{-2}	2.88×10^{-2}
幂指数系数 (b) Power factor	3.101 2	3.136	2.858 2
生长系数 (K) Growth coefficient	0.053 3	0.135 9	0.1
自然死亡系数 (M) Natural mortality coefficient	0.085 8	0.193 6	0.19
渐近体长 (L_{inf}) Asymptotic length/cm	118.36	61.634	74

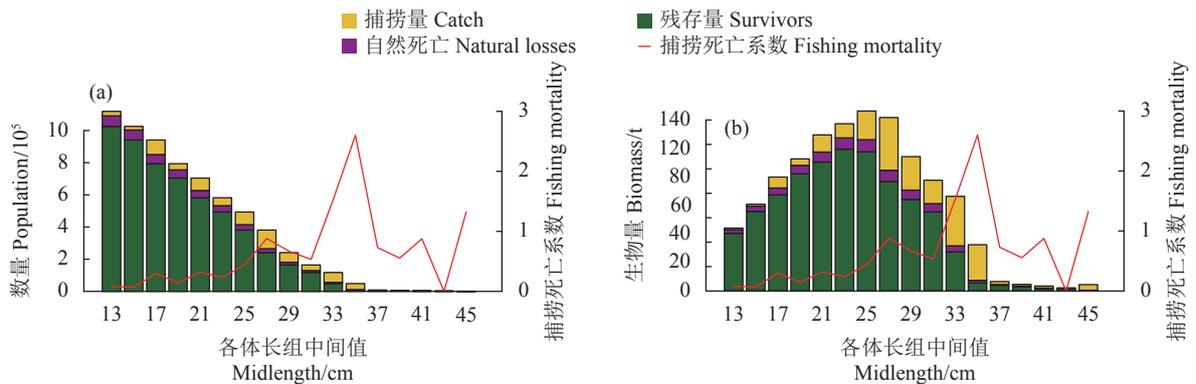


图4 基于琼斯长度转换队列分析的重建种群结构

Figure 4 Results of Jones' length converted cohort analysis with reconstructed population structure

示, YPR 先随着 F 的增大而快速增加, 当 F 增加到一定程度时, 增长率减缓, 达到最大值后开始呈现下降的趋势。当前状态下赤眼鲮的 $F=1.32$, 首次开捕体长为 12.3 cm, 对应的 YPR 为 1.89 g; 若保持 F 不变, 将首次开捕体长设置为 27.8 cm, YPR 可增至 5.95 g。从生物学参考点角度来看, 首次开捕体长设定为 27.8 cm, F 设定为 $F_{0.5}=0.25$ 时, 对应 YPR 的 $Y_{0.5}=6.98$ g; F 设定为 $F_{msy}=0.45$

时, 可获得最大 YPR 为 7.76 g (图 5-a)。当前的 F 和首次开捕体长状况, 表明西江封开江段赤眼鲮资源遭受过度捕捞。

当捕捞强度较小时 ($F < 0.1$), 开捕体长对 YPR 的影响不大, 增加开捕体长的情况下, YPR 不会有大的增加; 而随着捕捞强度的增大 ($F > 0.2$), 增加开捕体长时, 对应 YPR 会显著地增加。若保持当前赤眼鲮 $F=1.32$ 不变, 将开捕体长增至

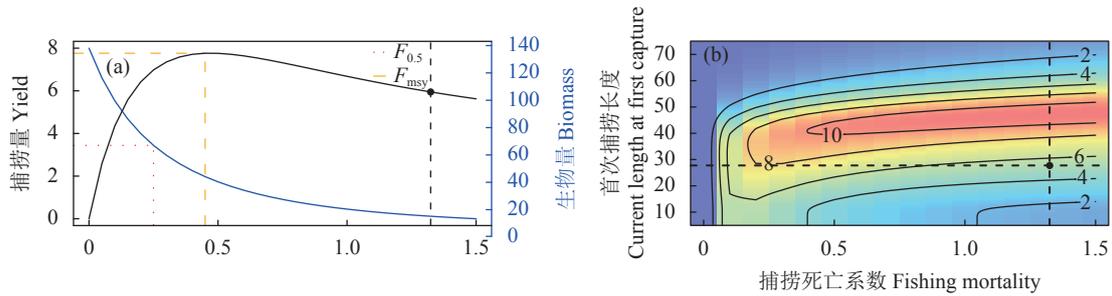


图5 汤普森和贝尔模型的结果

a. 开捕体长=27.8 cm 时, 单位补充产量和生物量变化曲线, 黑点表示当前捕捞压力下单位补充产量和生物量, 黄色和红色虚线分别代表最大可持续产量 (F_{msy}) 的 F 和原始生物量减少 50% 的 $F (F_{0.5})$; b. 不同捕捞强度和开捕体长对单位补充产量的影响, 黑点代表着当前的捕捞状况, x 轴表示 F

Figure 5 Results of Thompson and Bell model

a. Curves of yield and biomass per recruit when the current length at first capture was 27.8 cm. The black dots represent yield and biomass per recruit under current fishing pressure. The yellow and red dashed lines represent fishing mortality for maximum sustainable yield (F_{msy}) and fishing mortality associated with a 50% reduction relative to the virgin biomass ($F_{0.5}$); b. Exploration of impact of different exploitation rates and L_c values on the yield per recruit. The black dots represent the current fishing regime. The x -axis corresponds to the fishing mortality.

47.2 cm, YPR 为 10.92 g; 若保持当前开捕体长 12.3 cm 不变, 将 F 降至 0.2, YPR 为 5.70 g; 若同时调整开捕体长和捕捞强度, 将首次开捕体长调整为 27.8 cm, F 调整为 0.45, 则 YPR 为 7.76 g; 将开捕体长设定为 47.9 cm, 捕捞强度设定为 1.5, 对应 YPR 为 10.96 g (图 5-b)。

3 讨论

3.1 评估方法

目前有多种 R 软件包可用于渔业资源评估, 涵盖了渔业科学的一般分析方法和基于年龄的渔业资源评估分析方法^[26-28]。FiSAT II 软件利用体长频率数据进行单一物种种群资源量评估^[29-30]。相较而言, 本研究使用的 TropFishR 进一步增强了数据限制方法的功能, 包括传统的和更新版本的电子长度频率分析方法及一整套利用 LFQ 数据进行渔业分析的方法; TropFishR 利用一年的体长频率数据, 通过 YPR 模型评估渔业资源, 获得渔业资源管理的生物学参考水平^[7]。电子长度频率分析对数据重构中 MA 的设置具有重要的作用, MA 设置低时会导致 L_{inf} 的估值过高; 设置合适的 MA, 生长方程参数能够得到较好的估算, 且精度较高^[18]。在 FiSAT II 软件中 MA 设置为固定值 5^[31], 本研究中 MA 设置为 9 比较合适。在渔业资源调查中, 由于体长大的鱼类样本获得比较困难, 样本的统计数量比较少, 导致利用 ELEFAN 方法难以估算 L_{inf} 的参数值^[7]。本研究通过 Powell-Wetherall 先粗略估

算一个 L_{inf} , 将 L_{inf} 的搜索细化到更小范围。 L_{inf} 的范围被限制后, K 会根据长度频率数据自动受到限制。通常小型的生命周期短的物种 K 较高 (如 >1.5), 而大型且生命周期长的物种 K 较低 (<1.0)^[7]。

3.2 生长及死亡参数

鱼类体长与体质量幂函数关系中, 幂指数系数 b 的变化与鱼类的生长和营养有关, 不同种群之间或同一种群不同年份之间 b 有所差异, 淡水鱼类的 b 介于 2.5~4.0^[32]。本研究中赤眼鲮 b 为 2.858 2, 小于 1982 年研究的对应值 (表 1), 当前赤眼鲮的生长呈负异速生长, 体长比体质量生长快。 K 和 M 的值对资源量的估算具有重要的影响, 准确估算资源量大小要求 K 和 M 值有足够的准确度^[33]。 K 满足 $e^{-k} < 1$ 时, 用 von Bertalanffy 方程能较好地拟合鱼类生长; M/K 介于 1.5~2.5 时, M 的估算比较合理^[34]。本研究 $e^{-k} = 0.90$, M/K 为 1.87, K 和 M 的估算符合理论要求。本研究赤眼鲮的 L_{inf} 和 1981—1982 年相比, 减小了 37.5%, 呈现迅速减小的趋势, 表明当前赤眼鲮遭受严重的捕捞压力和环境胁迫。 M 和鱼类生长及栖息地环境等有着密切的关系, 本研究赤眼鲮的 M 较 1981—1982 年增加了 117.9%, 这也反映了西江日益恶化的水环境及渔业过度捕捞的状况, 西江渔业资源面临的现实状况十分严峻。水利工程建设也是影响赤眼鲮渔业资源变动的重要原因, 据不完全统计, 20 世纪 80 年代珠江修建水库 8 731 座, 水闸共 3 311 座^[35], 目前珠江修建的水库有 1.7 万座, 水闸 8 500 座^[1]。赤

眼鳊为产漂流性卵鱼类, 需要洄游产卵完成繁殖, 众多水利枢纽的建设对西江赤眼鳊的洄游形成了阻隔, 这对赤眼鳊的资源补充造成严重的影响。此外水质污染和外来种入侵也会对赤眼鳊资源变化产生重要的影响。水质污染对赤眼鳊仔鱼及幼鱼的生长产生不利影响, 致使补充群体损失严重。西江外来入侵鱼类有 10 多种, 这些外来种和土著鱼类争夺生态位空间, 对本地土著鱼类资源造成严重损害。

3.3 资源利用现状及保护

生物学参考点作为渔业资源养护管理和捕捞强度控制的重要参考基准, 具有保守性和预防性的优点, 在全球渔业资源状况整体呈现衰退的趋势下, 国内外学者对该理论均有广泛的关注和应用^[23,36-38]。Beverton-Holt 动态综合模型通过研究 2 个可控因素——捕捞强度和开捕规格对 YPR 的影响, 为渔业管理制定最适开捕体长和捕捞强度提供依据。基于体长频率数据的赤眼鳊可捕规格与资源保护研究在西江尚未见报道, 本研究首次对西江封开段赤眼鳊进行了体长频率分析。西江封开江段赤眼鳊当前的 F 为 1.32, 首次开捕体长为 12.3 cm, 赤眼鳊资源处于过度捕捞状态。长期经受较大的捕捞强度时, 鱼类的表型性状会产生适应性响应, 体长和性成熟年龄表现较为明显, 个体呈现小型化趋势。开捕体长的选择可能是影响鱼类表型对捕捞压力响应的原因, 人为选择因素对鱼类种群的进化产生影响, 引起个体生物学特征产生变化; 当 F 长期数倍高于 M 时, 也会增强资源群体的选择性, 促使小个体快速补充进入渔业^[12]。YPR 模型分析, 若保持当前捕捞强度不变, 将开捕体长调整至 27.8 cm, YPR 可增至 5.95 g; 将开捕体长增加至 47.2 cm 时, YPR 可达 10.92 g; 若保持当前开捕体长 12.3 cm 不变, 将 F 降至 0.2 时, YPR 为 5.70 g; 若同时调整开捕体长和捕捞强度, 将首次开捕体长调整为 27.8 cm, F 调整为 0.45, 可获得 YPR 为 7.76 g; 将开捕体长设置为 47.9 cm, 捕捞强度为 1.5 时, 对应 YPR 为 10.96 g。在实际渔业管理操作中, 将捕捞强度增至 1.5, 与当前捕捞强度相比变化不大, 保护效果不够显著; 将开捕体长增至 47.2 cm, YPR 增幅较大, 但对应的捕捞渔具规格要求过大, 这会导致渔民实际的渔获量比例大幅降低, 不能保证渔业捕捞的产量。因此, 采取适当降低捕捞强度和首次开捕体长相结合的渔业管理和保护

手段对资源的利用效果更好。在自然条件下, 西江赤眼鳊雌雄个体都要在 3 龄时才能全部达到性成熟, 对应体长约 27 cm^[5,35]。综合考虑赤眼鳊 YPR 及达到性成熟的条件, 建议将首次开捕体长设为 27.8 cm, 将捕捞强度降至 0.45, 这样既能保证渔获产量, 也可以保护产卵群体, 有利于赤眼鳊资源群体的修复, 实现资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] 《中国河湖大典》编纂委员会. 中国河湖大典 珠江卷 [M]: 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 1-6.
- [2] 李捷, 李新辉, 贾晓平, 等. 西江鱼类群落多样性及其演变 [J]. 中国水产科学, 2010, 17(2): 298-311.
- [3] 陈宜瑜. 中国动物志, 硬骨鱼纲, 鲤形目 (中卷) [M]: 北京: 科学出版社, 1998: 104-106.
- [4] 谭细畅, 李跃飞, 王超, 等. 珠江江段赤眼鳊早期发育形态及其补充群体状况 [J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(5): 609-613.
- [5] 陆奎贤. 珠江水系渔业资源 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1990: 122-223.
- [6] 李捷, 李新辉, 谭细畅, 等. 广东肇庆西江珍稀鱼类省级自然保护区鱼类多样性 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 556-562.
- [7] MILDENBERGER T K, TAYLOR M H, WOLFF M. TropFishR: an R package for fisheries analysis with length-frequency data [J]. Methods Ecol Evol, 2017, 8(11): 1520-1527.
- [8] COSTELLO C, OVANDO D, HILBORN R, et al. Status and solutions for the world's unassessed fisheries [J]. Science, 2012, 338(6106): 517-520.
- [9] SKERN-MAURITZEN M, GEIR O, OLAV H N, et al. Ecosystem processes are rarely included in tactical fisheries management [J]. Fish Fish, 2016, 17(1): 165-175.
- [10] 王雪辉, 邱永松, 杜飞雁. 南海北部金线鱼生长、死亡和最适开捕体长研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2004, 34(2): 224-230.
- [11] RICHARD K D, GAO C X, DAI X J, et al. Population dynamic parameters for *Cyprinus carpio* in Dianshan Lake [J]. Thalassas, 2018, 34: 279-288.
- [12] 耿平, 张魁, 陈作志, 等. 北部湾蓝圆鲹生物学特征及开发状态的年际变化 [J]. 南方水产科学, 2018, 14(6): 1-9.
- [13] HERRÓN P, MILDENBERGER T K, DÍAZ J M, et al. Assessment of the stock status of small-scale and multi-gear fisheries resources in the tropical Eastern Pacific region [J]. Reg Stud Mar Sci, 2018, 24: 311-323.
- [14] DANIEL P. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks [J]. J Cons, 1980, 39(2): 175-192.
- [15] 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.

- [16] 耿玉玲, 张崇良, 韩东燕, 等. 基于科学调查与渔业生产数据的山东近海口虾蛄生长参数估算 [J]. 中国水产科学, 2019, 26(4): 756-764.
- [17] PAULY D. On improving operation and use of the elefan programs. Part 2, improving the estimation of L[J]. Fishbyte, 1986, 4(1): 18-20.
- [18] TAYLOR M H, MILDENBERGER T K. Extending electronic length frequency analysis in R[J]. Fish Manag Ecol, 2017, 24(4): 330-338.
- [19] THEN A Y, HOENIG J M, HALL N G, et al. Evaluating the predictive performance of empirical estimators of natural mortality rate using information on over 200 fish species[J]. ICES J Mar Sci, 2015, 72(1): 82-92.
- [20] 詹秉义. 渔业资源评估 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 121-166.
- [21] 刘群, 王艳君. 对渔业实际种群分析 (VPA) 中调谐方法的初步研究 [J]. 南方水产, 2007, 3(1): 1-6.
- [22] 王迎宾, 刘群. 不同误差结构对运用股分析 (CA) 模型求算鱼类自然死亡率影响的初步研究 [J]. 南方水产, 2006, 2(3): 7-15.
- [23] 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.
- [24] XIANG Y, GUBIAN S, SUOMELA B, et al. Generalized simulated annealing for global optimization: the GenSA Package[J]. R J, 2013, 5(1): 13-29.
- [25] 朱书礼, 李新辉, 李跃飞, 等. 西江广东肇庆段赤眼鳟的年龄鉴定及生长研究 [J]. 南方水产科学, 2013, 9(2): 27-31.
- [26] NELSON G A. Fishmethods: fishery science methods and models in R[DB/OL].[2019-11-01]. <https://CRAN.R-project.org/package=fishmethods>.
- [27] OGLE D, WHEELER P, DINNO A. FSA: simple fisheries stock assessment methods[DB/OL].[2019-11-01]. <https://CRAN.R-project.org/package=FSA>.
- [28] KELL L T, MOSQUEIRA I, GROSJEAN P, et al. FLR: an open-source framework for the evaluation and development of management strategies[J]. ICES J Mar Sci, 2007, 64(4): 640-646.
- [29] 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.
- [30] 张魁, 陈作志, 邱永松. 北部湾二长棘犁齿鲷生长、死亡和性成熟参数的年际变化 [J]. 南方水产科学, 2016, 12(6): 9-16.
- [31] GAYANILO Jr F C, SPARRE P, PAULY D, et al. FAO-ICLARM stock assessment tools II (FiSAT II). Revised version. User's guide[Z]. FAO Computerized Information Series (Fisheries), 2005: 1-168.
- [32] 陈新军. 渔业资源与渔场学 [M]. 2版. 北京: 海洋出版社, 2014: 68-73.
- [33] 费鸿年, 张诗全. 水产资源学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 336-485.
- [34] BEVERTON R J H, HOLT S J. Chapter 10: a review of the lifespans and mortality rates of fish in nature and their relation to growth and other physiological characteristics[J]. Ciba Foundation Symposium-The Lifespan of Animals (Colloquia on Ageing), 2008, 1(5): 142-180.
- [35] 珠江水系渔业资源调查编委会. 珠江水系渔业资源调查报告 第1分册 江河 [R]. 1985: 21-441.
- [36] GRABOWSKI R, YONG C. Incorporating uncertainty into the estimation of the biological reference points $F_{0.1}$ and F_{max} for the maine green sea urchin (*Strongylocentrotus droebachiensis*) fishery[J]. Fish Res, 2004, 68(1): 367-371.
- [37] 曹少鹏, 刘群. 把不确定性引入生物学参考点 $F_{0.1}$ 和 F_{max} 的估计以评估东海带鱼渔业资源 [J]. 南方水产, 2007, 3(2): 42-48.
- [38] 田辉伍, 岳兴建, 陈大庆, 等. 怒江东方墨头鱼资源量和死亡参数的估算 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(1): 235-240.