

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18184

基于单位补充量模型的西江赤眼鳟种群资源利用现状评价

李策^{1,2}, 李新辉^{1,3}, 李跃飞^{1,3}, 陈蔚涛^{1,3}, 杨计平^{1,3}, 夏雨果^{1,3}

1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广东 广州 510380;
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
3. 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: 赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculus*)是珠江中下游最重要的经济鱼类之一, 本研究利用 2009—2014 年西江肇庆江段渔业捕捞调查监测数据, 分析了其生长和死亡参数历史变化, 利用单位补充量渔获量(yield per recruitment, YPR)模型、单位补充量产卵群体生物量(spawning biomass per recruitment, SBR)和生物学参考点评估了赤眼鳟资源利用状况。结果表明, 赤眼鳟体长(L)和体重(W)关系为 $W=2\times 10^{-5}L^{2.9527}$ ($R^2=0.9595$, $n=2346$), 生长方程为 $L_t=725.802[1-e^{-0.110(t+0.613)}]$ 。目前西江的捕捞强度($F=0.96/a$)和开发状况($E=0.86$)远超种群可持续发展水平, 赤眼鳟种群处于生长型捕捞过度状态。根据实际情况, 建议将西江赤眼鳟开捕年龄提高至 3 龄(或开捕体长增大至 238 mm), 则预计单位补充量渔获量可增加 175%, 在珠江禁渔期制度的协同保护下, 种群实际保护效果可能更好。

关键词: 赤眼鳟; 单位补充量渔获量; 单位补充量产卵群体生物量; 资源利用; 生物学参考点

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)01-0151-10

珠江是中国南方最大的河流, 历史上渔业资源十分丰富。但是由于水利梯级开发、过度捕捞、环境污染等原因, 江河渔产量衰退严重, 亟待开展渔业资源利用状况评估工作, 为珠江渔业资源养护提供科学指导。赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculus*)属鲤科(Cyprinidae), 雅罗鱼亚科(Leuciscinae), 赤眼鳟属, 广泛分布于除青藏高原外我国各大水系^[1]。赤眼鳟适应能力强, 种群数量大, 是珠江中下游最主要的经济鱼类之一^[2-6]。赤眼鳟是典型的产漂流性卵鱼类, 虽然其对产卵场环境的要求不像四大家鱼那么严苛, 但是产卵繁殖仍需洪水的刺激等条件, 产出的卵苗随水漂流发育, 扩散至下游各个江段育肥生长。在水利梯级开发、栖息地占用、水环境污染等多重人类活动干扰下, 江河渔业资源衰退, 渔获物个体呈现低龄化、小型

化趋势, 相关研究已有大量报道^[7-9]。

西江是指桂江口至广东三水思贤窖河段, 为珠江干流下游江段, 区间集水面积 43860 km², 长 208 km, 河道平均比降 0.09‰^[8]。西江水质状况良好, 多年维持在 II~III 类水标准^[10]。该江段由于落差小, 暂时水坝工程阻隔, 距离最近的水利枢纽为梧州长洲水利枢纽, 距封开县城约 30 km^[11]。流域属亚热带季风气候区, 气候温和, 雨量充沛, 渔业资源十分丰富。根据广东省海洋与渔业局(2014 年)统计, 西江肇庆和云浮两市共有机动渔船 2072 艘, 淡水捕捞产量约 7300 t, 捕捞种类以广东鲂(*Megalobrama terminalis*)、赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)和鲮(*Cirrhinus molitorella*)等为主。西江是

收稿日期: 2018-05-26; 修订日期: 2018-09-09.

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2016A030313147); 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(2017HY-ZD0103).

作者简介: 李策(1993-), 男, 硕士研究生, 从事渔业资源研究. E-mail: lice930811@aliyun.com

通信作者: 李新辉(1961-), 男, 研究员, 从事渔业资源研究. E-mail: lxhui01@aliyun.com

赤眼鳟重要的产卵和育肥栖息地,为保护西江赤眼鳟的种质资源,2008 年在云浮罗定江下游至西江干流德庆江段建立了“西江赤眼鳟、海南红鲷国家级水产种质资源保护区”^[12]。2011 年起实施的珠江禁渔期制度也对赤眼鳟的保护起到了重要作用。

为了科学评估珠江渔业种群资源利用现状,2009 年开始对西江渔业捕捞状况进行跟踪调查监测。本研究利用 2009—2014 年在西江肇庆江段捕捞调查采集的赤眼鳟种群数据,对其生长与死亡参数进行了估计,利用单位补充量渔获量(yield per recruitment, YPR)模型^[13-17]、单位补充量产卵群体生物量(spawning biomass per recruitment, SBR)模型^[17-23]和生物学参考点^[24-28]评估了其种群动态与开发利用状况,以期为西江赤眼鳟的种质资源保护与渔业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

赤眼鳟是目前珠江中下游最主要的经济鱼类,占渔获总生物量的 7.7%,尤其以梧州以下西江江段为最高,平均达 13.8%(农业部珠江中下游渔业资源环境科学观测实验站 2015—2017 年监测结果)。而珠江上游红水河及支流柳江江段赤眼鳟比例相对较低。其产卵场主要分布于黔江、浔江和西江封开至德庆江段,西江及珠江三角洲河网是其重要的育肥场所。赤眼鳟生物学数据来源于 2009 年 5 月至 2014 年 9 月西江渔业资源调查与监测。调查共设置了高要(S1)、德庆(S2)和封开(S3) 3 个采样江段(图 1)。2011 年珠江禁渔期制度实施以来,除禁渔期(4 月 1 日至 6 月 1 日)内未采样外,其他月份每月采样 1 次,每次随机抽取 3 船次,渔具主要为流刺网、抛网和鱼笼。

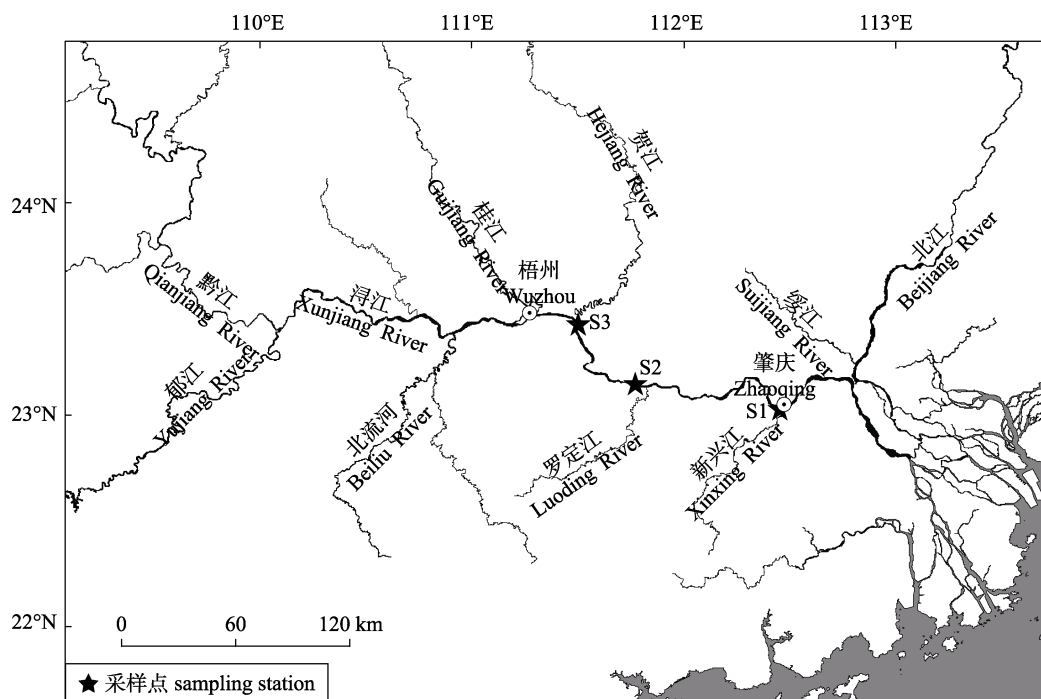


图 1 西江赤眼鳟种群资源调查采样站位图

Fig. 1 Sampling sites of *Squaliobarbus curriculus* stock in Zhaoqing section of Xijiang River

1.2 参数估算

赤眼鳟体长和体重关系,依据公式 $W=aL^b$ 进行拟合,式中 W 为体重(g), L 为体长(mm), a 为生长条件因子, b 为幂指数系数。

取背鳍下测线上鳞片用于赤眼鳟的年龄鉴定,鳞片用 1%的氢氧化钠(NaOH)浸泡去除表面的黏液,再用清水冲洗,放入解剖镜下观察并测量鳞径及轮径^[2]。采用 von Bertalanffy 生长方程(VBGF)、

Logistic 生长方程和 Gompertz 生长方程拟合赤眼鳟的年龄与体长关系, 利用最大似然法估算各生长方程参数^[29-31], 3 种生长方程分别为^[13]:

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

$$\text{Logistic GF: } L_t = L_\infty / [1 + e^{-k(t-t_0)}]$$

$$\text{Gompertz GF: } L_t = L_\infty [e^{-e^{-k(t-t_0)}}]$$

式中, L_∞ 为渐近体长, k 为生长系数, L_t 为 t 龄鱼体长, t_0 为理论生长起点年龄。

利用赤池信息准则(AIC)检验最适生长模型^[30, 32]。AIC 公式为:

$$\text{AIC} = -2\ln L(p_1, \dots, p_m, \sigma^2) + 2m$$

式中, m 为模型参数; $\ln L(p_1, \dots, p_m, \sigma^2)$ 为残差平方和; AIC 值最小者为最适模型。

利用长度转换渔获曲线法估算总死亡系数(Z)^[33], 自然死亡系数(M)用 Pauly 的经验公式^[34]:

$$\ln M = -0.0152 - 0.279 \ln L_\infty + 0.6543 \ln k + 0.463 \ln T$$

式中, T 为该鱼种栖息水域平均水温, 2009—2014 年肇庆江段的年平均水温范围为 22.4~23.1℃。

捕捞死亡系数(F)由总死亡系数(Z)减去自然死亡系数(M)求得。

开发率(E)指捕捞死亡系数占总死亡系数(Z)的比例^[14], 即 $E = (Z - M) / Z$

1.3 单位补充量模型分析

利用单位补充量模型来评价西江赤眼鳟的种群动态, 计算不同捕捞死亡系数 $F(0.0 \sim 2.0)$ 的 YPR 和 SBR。同时, 计算赤眼鳟在不同捕捞死亡系数和开捕年龄时的渔获量, 绘制等渔获量曲线。将模型中的时间间隔设定为 1 个月。

SBR 计算公式如下:

$$\text{SBR} = \frac{\text{SB}}{R} = \sum_{t=0}^{t_{\max}} \exp\{-(F S_t A_t - M)t\} a(L_t)^b$$

式中, SB 为总产卵群体生物量; R 为补充量, 取值为 1; F 、 M 分别为捕捞死亡系数和自然死亡系数; a 和 b 是体长体重关系常数; L_t 为 VB 生长方程运算的 t 月龄时的平均体长; $t_{\max}$ 为样本中观测到的最大年龄。根据资料记载本研究中赤眼鳟的最大年龄确定为 20 龄^[3]。

YPR 单位补充量渔获尾数计算公式如下:

$$\text{YPR} = \frac{\text{YP}}{R} = \sum_{t=0}^{t_{\max}} \frac{F S_t A_t}{F S_t A_t + M} \exp\{[-(F S_t A_t - M)t\} \times [1 - \exp[-(F S_t A_t - M)]]$$

YPR 单位补充量渔获量计算公式如下:

$$\text{YPR}_{\text{mass}} = \sum_{t=0}^{t_{\max}} \text{YPR}_t a(L_t)^b$$

本研究采用 4 个生物参考点: $F_{0.1}$ 、 $F_{\max}$ 、 $F_{20\%}$ 、 $F_{40\%}$ 对赤眼鳟当前资源状况进行评价。当固定 t_c 时, 求得 YPR 与 F 的关系曲线。 $F_{\max}$ 为该曲线外切线斜率为 0 时所对应的 F , 当该曲线外切线斜率为 $F=0$, 即外切线斜率的 10% 时, 其对应的 F 为 $F_{0.1}$ ^[35]。 $F_{20\%}$ 和 $F_{40\%}$ 分别指使得 SBR 下降到相当于未开发状态下 SBR 的 20% 和 40% 时的捕捞死亡系数。其中, $F_{20\%}$ 为临界下限参考点, $F_{20\%}$ 和 $F_{0.1}$ 为目标参考点。模型拟合分析和生物参考点的计算采用统计软件 Origin 9.0 和 R 完成。

2 结果与分析

2.1 赤眼鳟的生长与死亡特征

2009—2014 年在西江肇庆江段共采集赤眼鳟 2346 尾, 体长分布频率如图 2 所示。体长范围为 98.0~440.0 mm, 平均为 (236±53) mm。优势体长组为 200.0~260.0 mm, 占总数的 50.67%。赤眼鳟体长与体重呈幂函数关系, 经回归分析可得:

$$W = 2 \times 10^{-5} L^{2.9527} (R^2 = 0.9595, n = 2346)$$

依据 AIC 对赤眼鳟进行最适生长方程模型选择, 结果表明, von Bertalanffy 生长方程的 AIC 值最小(表 1), 为赤眼鳟的最适生长方程。赤眼鳟的 von Bertalanffy 生长方程为:

$$L_t = 725.802 [1 - e^{-0.110(t+0.613)}]$$

运用长度转换渔获物曲线法估算得出西江赤眼鳟 2009—2014 年的总死亡系数 Z (表 2)。根据 Pauly 经验公式估算自然死亡系数 M 均接近 0.16/a, 捕捞死亡系数 F 在 0.54/a~1.21/a, 均值为 0.96/a; 开发率 E 在 0.77~0.88, 均值 0.86, 表明西江赤眼鳟种群资源处于过度开发状态。

2.2 模型分析

利用单位补充量模型评价赤眼鳟的种群动态, SBR 和 YPR 模型计算所用参数值如表 3 所示。

保持开捕年龄 t_c 不变, SBR 随捕捞死亡系数 F 的增大而快速减小(图 3), 相对于未开发状态(100%), 除 2014 年 SBR (19.11%) 低于 SBR 最低警戒线 20%, 2009—2013 年各年 SBR 均高于最低警戒线。2009—

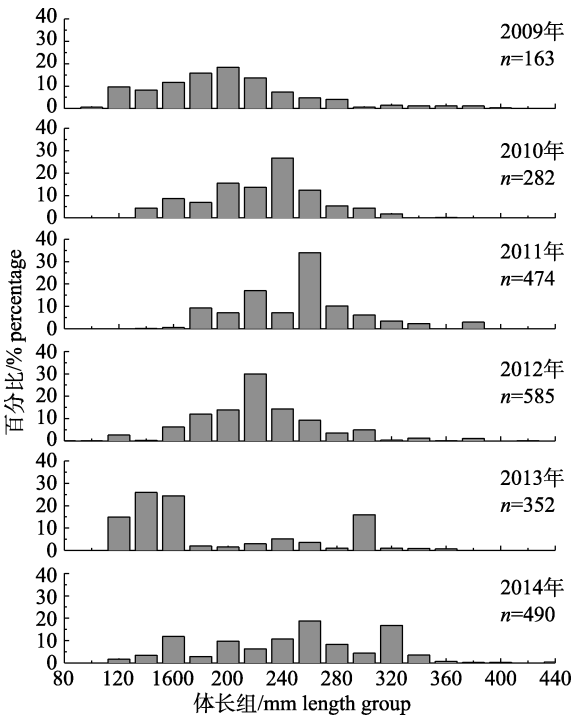


图 2 2009—2014 年西江赤眼鲮体长分布
Fig. 2 Standard length distribution of *Squaliobarbus curriculus* between 2009 and 2014 in Xijiang River

2014 年平均捕捞死亡系数 F_{ave} 为 0.96/a, 对应的 SBR_{ave} 为 26.42%, 也高于最低警戒线 20%。由此说明目前西江肇庆江段赤眼鲮产卵种群未处于补充型捕捞过度的状态。

保持捕捞死亡系数 F 不变, 随着开捕年龄 t_c 的变化, YPR 的变化曲线(图 4a)表明, YPR 随着开捕年龄 t_c 的增加先增大后减少, 当 t_c 达到 8.68 龄时, YPR 取得最大值 449.1 g。但如果捕捞死亡系数 F 逐渐增加, 若要获得最大的单位补充量渔获量 YPR, 就必须提高开捕年龄 t_c (图 4b)。

保持开捕年龄 t_c 不变, 随着捕捞死亡系数 F 的逐渐增加, YPR 先增大后减少(图 5a)。当 $F=0.12/a$ 时, YPR 取得最大值 263.3 g。2009—2014 年捕捞死亡系数 F 均大于 0.12/a, 对应的 YPR 值处于曲线右侧, 均小于 YPR_{max} , 说明目前赤眼鲮处于生长型过度捕捞状态。现有捕捞压强度下, 如果增大开捕年龄 t_c , 则 YPR 也相应地增加; 当开捕年龄 t_c 达到 6 以上时, 继续增加捕捞压力, YPR 保持基本稳定(图 5b)。

表 1 西江赤眼鲮 3 种生长方程的拟合参数
Tab. 1 Estimated parameters of three different growth functions for *Squaliobarbus curriculus* in Xijiang River

参数 parameter	逻辑斯谛生长方程 Logistic growth function	Gompertz 生长方程 Gompertz growth function	von Bertalanffy 生长方程 VB growth function
生长系数 growth coefficient	0.537	0.324	0.110
理论生长起点年龄/a zero length age of year	2.593	1.984	-0.613
渐近体长/mm asymptotic length	425.605	485.939	725.802
赤池信息准则 Akaike's information criterion	7358.159	5289.460	447.435

表 2 西江赤眼鲮 2009—2014 年死亡参数和开发率
Tab. 2 The annual mortality parameters and exploitation rates for *Squaliobarbus curriculus* between 2009 and 2014 in Xijiang River

年份 year	总死亡系数/(/a) total mortality coefficient	水温/℃ water temperature	自然死亡系数/(/a) natural mortality coefficient, M	捕捞死亡系数/(/a) fishing mortality coefficient, F	开发率 exploitation rate
2009	1.11	23.1	0.16	0.95	0.86
2010	0.70	22.5	0.16	0.54	0.77
2011	1.10	22.4	0.16	0.94	0.86
2012	1.15	22.1	0.16	0.99	0.86
2013	1.27	23.0	0.16	1.11	0.88
2014	1.37	*	0.16	1.21	0.88
总体 total	1.12	22.6	0.16	0.96	0.86

注: *表示 2014 年平均水温数据参考 2009—2013 年的年平均水温。
Note: * is the average water temperature of 2014 referring to the annual average during 2009 and 2013.

表 3 单位补充量模型分析使用的参数值
Tab. 3 The values of parameters used in the per recruitment models

参数 parameter	数值 value	参数 parameter	数值 value
生长条件因子 growth factor	2.0×10^{-5}	自然死亡系数/(/a) natural mortality coefficient	0.16
幂指数系数 power exponent coefficient	2.9527	捕捞死亡系数/(/a) fishing mortality coefficient	0.96
渐近体长/mm asymptotic length	725.8	开捕年龄/a the first catch age of year	1.0
理论生长起点年龄/a zero length age of year	-0.613	生长系数 growth coefficient	0.110

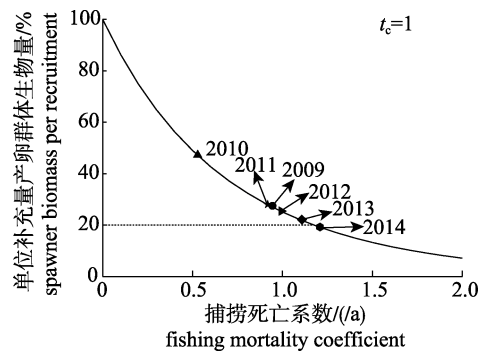


图 3 西江赤眼鲮单位补充量产卵群体生物量 SBR 随捕捞死亡系数的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of spawner biomass per recruitment to fishing mortality coefficients for *Squaliobarbus curriculus* in Xijiang River

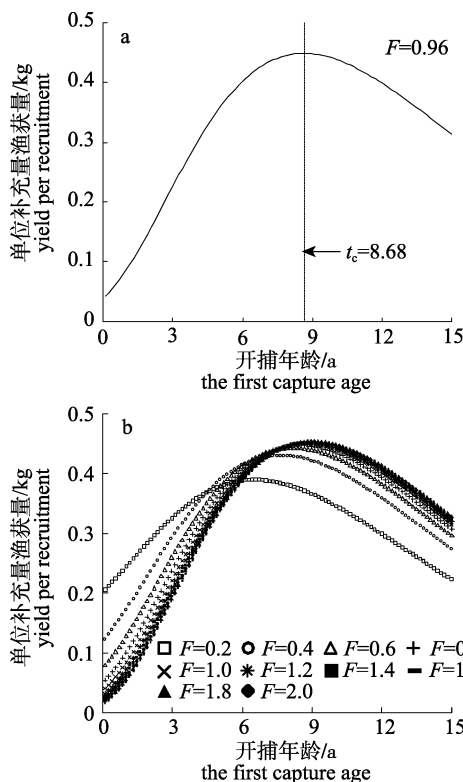


图 4 西江赤眼鲮单位补充量渔获量 YPR 随开捕体长 t_c 的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of yield per recruitment to the first capture age for *Squaliobarbus curriculus* in Xijiang River

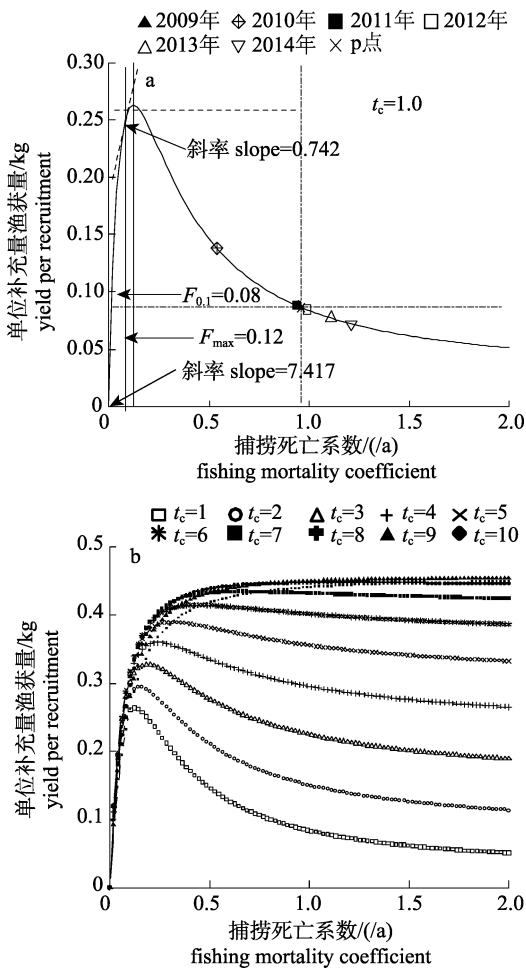


图 5 西江赤眼鲮单位补充量渔获量 YPR 随捕捞死亡系数 F 的变化曲线

Fig. 5 Changing curves of yield per recruitment to fishing mortality coefficients for *Squaliobarbus curriculus* in Xijiang River

采用 4 个生物学参考点 $F_{0.1}$ 、 F_{max} 、 $F_{20\%}$ 、 $F_{40\%}$ ，来评估当前赤眼鲮的资源利用状况。在 $M=0.16/a$ 时，当前捕捞死亡系数 $F_{cur}(0.96/a)$ 高于目标参考点 $F_{0.1}(0.08/a)$ 和 $F_{40\%}(0.66/a)$ (表 4)，而 $YPR_{cur}(86.4\text{ g})$ 却低于 $YPR_{0.1}(249.2\text{ g})$ 和 $YPR_{40\%}(117.5\text{ g})$ ，说明目前西江肇庆江段赤眼鲮种群处于生长型捕捞过度的状态。

表 4 当前捕捞死亡系数下西江赤眼鳟的生物参考点和单位补充量渔获量(YPR)
Tab. 4 The biological reference points and yield per recruitment (YPR) in current fishing mortality coefficient of *Squaliobarbus curriculus* in Xijiang River

生物学参考点 biological reference point	数值 value	生物学参考点对应的单位补充量渔获量 yield per recruitment at biological reference point	数值/g value
$F_{0.1}$	0.08	$YPR_{0.1}$	249.2
F_{max}	0.12	YPR_{max}	263.3
$F_{20\%}$	1.19	$YPR_{20\%}$	72.9
$F_{40\%}$	0.66	$YPR_{40\%}$	117.5

以捕捞死亡系数 F 为 X 轴, 开捕年龄 t_c 为 Y 轴, 通过空间插值方法绘制单位补充量渔获量等直线图(图 6); 固定开捕年龄 t_c , 计算获得最大单位补充量渔获量时的捕捞死亡系数 F , 并绘制最佳 F 点连线(A); 固定捕捞死亡系数 F , 计算获得最大单位补充量渔获量时的开捕年龄 t_c , 并绘制最佳 t_c 点连线(B)。虚线 A 和 B 之间的区域为最适产量区。

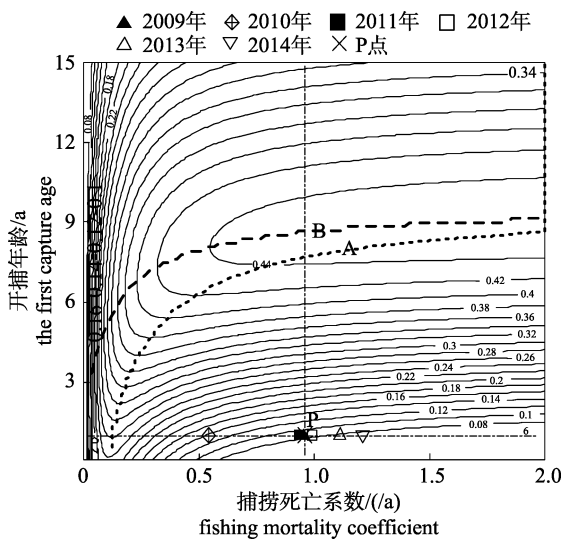


图 6 赤眼鳟的等渔获量曲线
Fig. 6 Curve of equal catch for *Squaliobarbus curriculus*

结合 2009—2014 年渔业现行状况分析可知, 当前赤眼鳟资源的利用处于过度开发的状态, 若保持开捕年龄 t_c 不变, 减少捕捞努力量, 虽也能达到最适量产, 但单位补充量渔获量相对较低 (263.3 g); 若保持当前的捕捞强度, 提高开捕年龄 t_c 使得达到最适量产, 则能获得相对更高的单位补充量渔获量。

3 讨论

3.1 赤眼鳟生长与死亡参数比较

生长和死亡参数是进行渔业资源评估至关重要的参数, 将直接影响评估模型的可靠性。本研究赤眼鳟的体长与体重关系幂指数 b 接近于 3, 说明其近似匀速生长, von Bertalanffy 生长方程可以准确地反映赤眼鳟的体长随年龄变化的过程。渐近体长 L_{∞} 、生长系数 K 与拐点年龄 t_{tp} 是显示鱼类群体结构变化趋势与生长快慢的主要指标。本研究结果与历史资料对比表明(表 5), 本次调查与 2006—2008 年调查的渐近体长 L_{∞} 和拐点年龄远小于 1981—1982 年的对应值, 生长系数 K 却相反, 近期调查结果远大于 1981—1982 年。这可能是由于鱼类种群在过度捕捞时, 种群密度变

表 5 不同年代西江赤眼鳟生长参数比较
Tab. 5 The growth parameters comparison of *Squaliobarbus curriculus* in Xijiang River during different years

生长参数 growth parameter	年代 year		
	1981—1982 ^[3]	2006—2008 ^[2]	2009—2014
生长条件因子 growing conditions factor	1.0809×10^{-5}	9.00×10^{-6}	2.00×10^{-5}
幂指数系数 the power factor	3.1012	3.136	2.9527
生长系数 growth coefficient	0.0533	0.1359	0.110
理论生长起点年龄/a zero length age of year	-0.8512	-0.3961	-0.0613
自然死亡系数/(/a) natural mortality coefficient	0.0858	0.1936	0.16
拐点年龄/a age at inflection point	19.8	8.0	9.37
渐近体长/mm asymptotic length	1183.6	616.34	724.802
渐近体重/g asymptotic weight	36676.3	5048	5856.27

小, 生存竞争减小, 因此呈现出更快的个体生长速度, 即 K 值升高。而渐进体长 L_{∞} 与拐点年龄的减小, 则是赤眼鳟遭受了较大的捕捞压力或环境胁迫的反映。

自然死亡系数与鱼体大小、栖息地环境质量密切相关, 对比显示: 本次调查与 2006—2008 年调查自然死亡系数远大于 1981—1982 年的自然死亡系数, 这可能与西江及珠江三角洲水质污染状况日益加重有关。目前西江赤眼鳟的捕捞压力和开发状况, 远超种群可持续发展水平, 种群面临严重威胁。

3.2 赤眼鳟资源利用现状和物种保护

生物学参考点可以为渔业资源养护管理和控制捕捞强度提供一种更保守和预防性的参考基准, 在全球渔业资源状况衰退的背景下, 该理论引起了国内外学者的广泛关注^[37-40]。随着开捕年龄的变化, $F_{0.1}$ 的变化量较小, 而 $F_{\max}$ 的变化量则较大。本研究赤眼鳟 YPR 值随着开捕体长的变化, $F_{0.1}$ 和 $F_{\max}$ 的变化情况如图 7 所示。由于 $F_{\max}$ 可能会考虑极高的捕捞死亡率水平, 这可能会使该种群的产卵补充潜力降至零。而 $F_{0.1}$ 远小于无穷大, 它能够提高补充群体的存活率, 减小赤眼鳟种群发生生长型过度捕捞的概率, 从而为鱼类种

群的繁衍提供保证, 故 $F_{0.1}$ 显然比 $F_{\max}$ 更适合作为渔业管理和种群保护的参考点。

根据 SBR 与捕捞死亡系数的分析结果表明, 西江肇庆江段赤眼鳟种群未处于补充型过度捕捞状态, SBR 值高于最低警戒线 20%。这可能是目前渔获物中低龄鱼或小规格个体较多的缘故。而实际上 2009—2014 年西江赤眼鳟的捕捞死亡系数均大于 $F_{40\%}$ 和 $F_{0.1}$, 其对应的 $YPR_{ave} < YPR_{40\%} < YPR_{0.1}$, 说明西江肇庆江段赤眼鳟种群实际上是处于生长型捕捞过度状态。且根据等渔获量曲线分析结果, 2009—2014 年的捕捞状况均处于最适产量区之外, 与单位补充量模型和生物参考点分析结果相同。

根据捕捞死亡系数、开捕年龄和 YPR 的关系分析可知, 提高开捕年龄或降低捕捞强度均可达到最适量产。但是通过降低捕捞强度达到最适量产时, 其 YPR 值为 263.3 g; 而通过提高开捕体长使其达到最适量产区, 则可获得更高 YPR 值 (449.1 g), 对于赤眼鳟种群保护可能效果更好。但是其需要将赤眼鳟的开捕年龄提高至 8 龄以上, 目前状况下几乎不可能实现。考虑到西江赤眼鳟在 3⁺ 龄才能全部达到性成熟^[3], 若维持目前的捕捞强度不变, 增加开捕年龄至性成熟年龄 3 龄 (开捕体长 238 mm), 则相应的单位补充量渔获量 YPR 可提高至 220.0 g, 与现状相比 YPR 可增长 175%。这将对赤眼鳟的保护起到关键作用。另外, 目前珠江每年自 3 月 1 日至 6 月 30 日实施禁渔期制度, 这也将通过减少捕捞时间的方式降低捕捞强度, 进一步促进增加开捕体长对鱼类资源的保护效果。但是, 由于中国目前的渔业捕捞方式是多鱼种作业, 要通过限制捕捞规格的方式进行渔业资源养护, 仅针对特定鱼类限制捕捞规格的管理难度较大, 因此应综合考虑保护对象所在江段其他渔业资源的生物学特性, 设定综合多种保护对象的最小网目尺寸才更为切实可行, 也更利于渔业管理部门的监管。

当然, 除了渔业捕捞外, 水利工程建设、水质污染和外来物种入侵等因素也是影响西江赤眼鳟资源量变动重要原因。虽然赤眼鳟对产卵场环境要求不像四大家鱼那么苛刻, 但是由于其是产漂

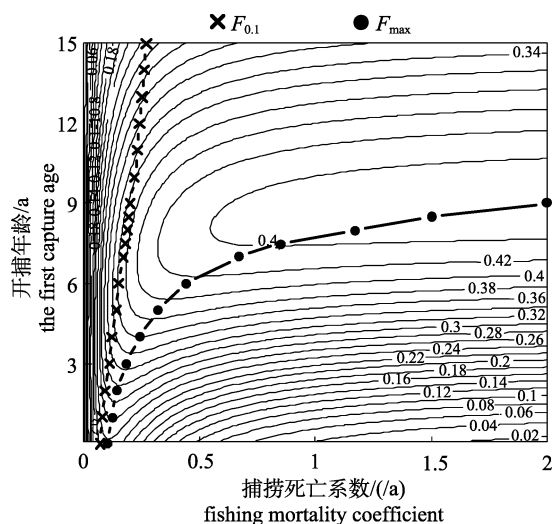


图 7 西江肇庆江段 2009—2014 年赤眼鳟单位补充量渔获量(YPR)、生物参考点 $F_{0.1}$ 和 $F_{\max}$ 的变化曲线

Fig. 7 Changing curves of yield per recruitment (YPR), $F_{0.1}$ and $F_{\max}$ for *Squaliobarbus curriculus* in Zhaoqing section of the Xijiang River between 2009 and 2014

流性卵鱼类,在产卵季节同样需要洄游产卵完成繁殖,但长洲水利枢纽的建设阻隔了西江下游赤眼鳟的洄游迁徙,导致目前梧州以下江段赤眼鳟的数量呈现高于坝上江段的特征。另外,上游产出的赤眼鳟漂流性仔鱼又受到水坝的阻挡,不能顺利地対下游种群进行补充。从水利梯级开发较密集的红水河和柳江赤眼鳟种群资源状况来推测,长洲水利枢纽对西江下游赤眼鳟种群的影响不能忽视,需进一步加强跟踪监测。西江水质状况良好,多年维持在Ⅱ~Ⅲ类水质标准,应该不是影响赤眼鳟的生长与死亡的主要原因。但是珠江三角洲河网也是赤眼鳟育肥的重要场所,西江段赤眼鳟的繁殖群体需要来自三角洲河网种群的补充,而三角洲Ⅳ类、Ⅴ类甚至劣Ⅴ类的水质,肯定不利于赤眼鳟幼鱼的生长和补充。因此从赤眼鳟种群整体保护的角度考虑,还应当改善珠江三角洲的水生生态环境状况,从生态系统修复的角度来为种质资源保护提供保障。外来水生生物入侵也会対本地土著鱼类资源造成损害。罗非鱼是目前西江及珠江三角洲生物入侵较为严重的外来鱼类,其必将会同赤眼鳟竞争争夺生存空间生态位,进而对赤眼鳟种群造成影响。

综上所述,渔业资源的衰退不是单纯的捕捞过度造成的,种群资源的保护也并非仅仅通过扩大网目、降低捕捞强度就可以达到,应当统筹农业、水利、环保等各方面的力量,制定完善的资源保护、恢复的整套方案和措施,通过降低捕捞强度、开展水文生态调度、恢复河流连通、减少栖息地占用、治理河流污染和修复水生生态环境等多种手段并举的方法,才能达到资源增殖的目标。

参考文献:

- [1] Pan J H. The Freshwater Fishes of Guangdong Province[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1991: 84-85. [潘炯华. 广东淡水鱼类志[M]. 广州: 广东科技出版社, 1991: 84-85.]
- [2] Zhu S L, Li X H, Li Y F, et al. Age and growth of *Spualio-barbus curriculus* from Zhaoqing Guangdong section of Xijiang River[J]. South China Fisheries Science, 2013, 9(2): 27-31. [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.]
- [3] Lu K X. Pearl River Water System of Fishery Resources[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1988: 139-143. [陆奎贤. 珠江水系渔业资源[M]. 广州: 广东科技出版社, 1988: 139-143.]
- [4] Guo L L, Yan Y Z, Xi Y L. Age and growth of *Squaliobarbus curriculus* (Richiardoson) in Wuhu reach of Yangtze River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(1): 130-135. [郭丽丽, 严云志, 席贻龙. 长江芜湖段赤眼鳟的年龄与生长[J]. 水生生物学报, 2009, 33(1): 130-135.]
- [5] Liu Q L, Xiao T Y, Liu M, et al. Reserach progress of biology in *Spualio-barbus curriculus*[J]. Fisheries Science, 2012, 31(11): 687-691. [刘巧林, 肖调义, 刘敏, 等. 赤眼鳟生物学研究进展[J]. 水产科学, 2012, 31(11): 687-691.]
- [6] Long G H, Lin G, Hu D S, et al. The reproductive biology of barble chub[J]. Chinese Journal of Zoology, 2005, 40(5): 28-36. [龙光华, 林岗, 胡大胜, 等. 赤眼鳟的繁殖生物学[J]. 动物学杂志, 2005, 40(5): 28-36.]
- [7] Li J, Li X H, Jia X P, et al. Evolvment and diversity of fish community in Xijiang River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(2): 298-311. [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.]
- [8] Li Y F, Li X H, Tan X C, et al. Fishery resources status and changes in Zhaoqing section of Xijiang River[J]. Reservoir Fisheries, 2008, 28(2): 80-83. [李跃飞, 李新辉, 谭细畅, 等. 西江肇庆江段渔业资源现状及其变化[J]. 水利渔业, 2008, 28(2): 80-83.]
- [9] Chen F C. Study on diversity of *Spualio-barbus curriculus* populations in the Xijiang River[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [陈方灿. 西江赤眼鳟群体多样性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [10] Ye Y. Water quality actuality of the Xijiang River basin and change tendency in 2005-2014[J]. Guangdong Water Resources And Hydropower, 2016(8): 18-22. [叶雅. 西江流域水质现状及 2005-2014 年水质变化趋势分析[J]. 广东水利水电, 2016(8): 18-22.]
- [11] Li Y F, Li X H, Yang J P, et al. Status of *Elopichthys bambusa* recruitment stock after the impoundment of Changzhou hydro-junction in Pearl River[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 917-924. [李跃飞, 李新辉, 杨计平, 等. 珠江干流长洲水利枢纽蓄水后珠江鳊鱼(*Elopichthys bambusa*)早期资源现状[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 917-924.]
- [12] Li J, Li X H, Tan X C, et al. Species diversity of fish community of provincial Xijiang River rare fishes natural reserve in Zhaoqing City, Guangdong Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(4): 556-562. [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.]
- [13] Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 121-166. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 121-166.]

- [14] Beverton R J H, Holt S J. On the Dynamics of Exploited Fish Populations[M]. London: Springer Science and Business Media, 1957.
- [15] Baelde P. Growth, mortality and yield-per-recruit of deep-water royal red prawns (*Haliporoides sibogae*) off eastern Australia, using the length-based MULTIFAN method[J]. Marine Biology, 1994, 118(4): 617-625.
- [16] Die D J, Caddy J F. Sustainable yield indicators from biomass: are there appropriate reference points for use in tropical fisheries?[J]. Fisheries Research, 2015, 32(1): 69-79.
- [17] Sun C L, Wang S P, Porch C E, et al. Sex-specific yield per recruit and spawning stock biomass per recruit for the Swordfish, *Xiphias gladius*, in the waters around Taiwan[J]. Fisheries Research, 2005, 71(1): 61-69.
- [18] Ottersen G, Sundby S. Effects of temperature, wind and spawning stock biomass on recruitment of Arcto-Norwegian cod[J]. Fisheries Oceanography, 2010, 4(4): 278-292.
- [19] Sakuramoto K. Case study: A simulation model of the spawning stock biomass of *Pacific bluefin tuna* and evaluation of fisheries regulations[J]. American Journal of Climate Change, 2016, 5(2): Article ID 67721.
- [20] Boreman J. Sensitivity of North American sturgeons and paddlefish to fishing mortality[J]. Environmental Biology of Fishes, 1997, 48(1-4): 399-405.
- [21] Dippold D A, Leaf R T, Peterson M S. Evaluating management regimes using per-recruit models and relative stock density for mississippi's spotted seatrout[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2016, 36(5): 1178-1189.
- [22] Liu K, Jing L, Chen Y J, et al. Growth and mortality of top-mouth gudgeon *Pseudorasbora parva* and evaluation on resource utilization in Taihu Lake[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2016, 31(4): 368-373. [刘凯, 景丽, 陈永进, 等. 太湖麦穗鱼生长、死亡和利用状况评估[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(4): 368-373.]
- [23] Goodyear C P. Spawning Stock Biomass per Recruit in Fisheries Management: Foundation and Current Use[M]. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003, 120: 67-81.
- [24] Deriso R B. Optimal $F_{0.1}$ criteria and their relationship to maximum sustainable yield[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1987, 44(2): 339-348.
- [25] Saila S B. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty[J]. Quarterly Review of Biology, 1992, 2(2): 177-178.
- [26] Tong Y H, Chen X J, Tian S Q, et al. Theory and application of biological reference points in fisheries management[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(7): 1040-1050. [童玉和, 陈新军, 田思泉, 等. 渔业管理中生物学参考点的理论及其应用[J]. 水产学报, 2010, 34(7): 1040-1050.]
- [27] Xu H L, Chen X J, Chen Y, et al. Impacts of mortality factors and uncertainty on the population and biological reference points in stock Chinese shrimp fishery[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(5): 721-730. [徐海龙, 陈新军, 陈勇, 等. 死亡因素对放流明对虾群体资源变动及生物学参考点影响的量化评估[J]. 水产学报, 2016, 40(5): 721-730.]
- [28] Cao S P. Estimations of biological reference points and the application of them in the stock assessment of the hairtail (*Trichiurus haumela*) fishery in the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. [曹少鹏. 渔业生物学参考点的估算及其在东海带鱼(*Trichiurus haumela*)资源评估中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.]
- [29] Luo Y, Du H W, Xuan Y B, et al. Spatial registration of different sensors using maximum likelihood method[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(5): 78-80, 85. [罗艺, 杜海文, 轩永波, 等. 基于极大似然法的异类传感器配准方法研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(5): 78-80, 85.]
- [30] Wang Y, Liu Q. Comparison of akaike information criterion (AIC) and bayesian information criterion (BIC) in selection of stock-recruitment relationships[J]. Fisheries Research, 2006, 77(2): 220-225.
- [31] Hou G, Zhu L X, Lu H S. Growth, mortality and population composition of crimson sea bream, *Paragyrops edita* Tanaka in Beibu Gulf[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2008, 28(3): 50-55. [侯刚, 朱立新, 卢伙胜. 北部湾二长棘鲷生长、死亡及其群体组成[J]. 广东海洋大学学报, 2008, 28(3): 50-55.]
- [32] Bozdogan H. Model selection and akaike's information criterion (AIC): the general theory and its analytical extensions[J]. Psychometrika, 1987, 52(3): 345-370.
- [33] Fei H N, Zhang S Q. Aquatic Resources[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1990: 303-305. [费鸿年, 张诗全, 水产资源学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 303-305.]
- [34] 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.
- [35] Jiao Y, Chen Y, Wroblewski J. An application of the composite risk assessment method in assessing fisheries stock status[J]. Fisheries Research, 2005, 72(2): 173-183.
- [36] Chen Z Z, Kong X L, Xu S N, et al. Dynamic changes of population parameters of *Nemipterus bathybius* in the Beibu Gulf[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(4): 584-591. [陈作志, 孔啸兰, 徐姗楠, 等. 北部湾深水金线鱼种群参数的动态变化[J]. 水产学报, 2012, 36(4): 584-591.]
- [37] Grabowski R, Chen Y. 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]. Fisheries Research, 2004, 68(1-3): 367-371.
- [38] Cao S P, Liu Q. Stock assessment of the hairtail (*Trichiurus haumela*) fishery in the East China Sea by incorporating un-

- certainty into the estimation of the biological reference points $F_{0.1}$ and F_{max} [J]. South China Fisheries Science, 2007, 3(2): 42-48. [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]. 南方水产科学, 2007, 3(2): 42-48.]
- [39] Zhu L X, Li L F, Liang Z L. A simulation study of impacts of uncertainty on the assessment of the crimson sea bream (*Paragyrops edita*) fishery in Beibu Gulf[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2009, 29(1): 36-43. [朱立新, 李丽芳, 梁振林. 不确定性对北部湾二长棘鲷渔业资源评估影响的模拟研究[J]. 广东海洋大学学报, 2009, 29(1): 36-43.]
- [40] Gao X, Tan D Q, Liu H Z, et al. Exploitation status and conservation of a population of *Megalobrama pellegrini* in Longxi River in the upper Yangtze River basin[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2009, 28(3): 329-333. [高欣, 谭德清, 刘焕章, 等. 长江上游龙溪河厚颌鲂种群资源的利用现状和保护[J]. 四川动物, 2009, 28(3): 329-333.]

Exploitation status of *Squaliobarbus curriculus* in the Xijiang River based on the analysis of the yield per recruit and spawning biomass per recruit models

LI Ce^{1,2}, LI Xinhui^{1,3}, LI Yuefei^{1,3}, CHEN Weitao^{1,3}, YANG Jiping^{1,3}, XIA Yuguo^{1,3}

1. Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China;
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. 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: The Pearl River, the largest river in southern China, historically harbors abundant fishery resources. However, the fishery resources have severely declined in recent decades owing to dam cascade development, overfishing, water pollution, and so on. Therefore, it is necessary to evaluate fishery resource utilization and exploitation, which provides scientific guidance for fishery resource conservation in the Pearl River. Generally, the per recruitment model has been widely applied to the dynamics of single fish populations. The per recruitment models mainly consist of the yield per recruitment model (YPR) and the spawning biomass per recruitment models (SBR). The YPR model prevents overgrowth overfishing and is usually used to determine the fishery management parameters (e.g. mesh size and catch rate). This model could provide management guidance for the development and utilization of fish stocks. The spawning biomass per recruitment model prevents supplemental overfishing. This model is utilized to assess whether parental biological residues and spawning stock are sufficient to maintain the stock of larvae supplementation, and then it estimates the status of resource utilization. The barbel chub (*Squaliobarbus curriculus*) is an important economic fish inhabiting the middle and lower reaches of the Pearl River. An assessment of the current status of *S. curriculus* utilization is important for reasonable resource exploitation and maintenance. The data of the present study were collected in the Zhaoqing section of the Xijiang River (an important stem of the Pearl River) between 2009 and 2014. We analyzed the growth and mortality characteristic parameters and evaluated the resource exploitation status by the YPR model, SBR model, and biological reference points. The relationship between standard length and weight was expressed as: $W=2\times 10^{-5}L^{2.9527}$ ($R^2=0.9595$, $n=2346$). The von Bertalanffy growth equation was selected as the optimal growth model and was expressed as $L_t=725.802[1-e^{-0.110(t+0.613)}]$. The present fishing intensity ($F_{ave}=0.96/a$) and exploitation rate ($E=0.86$) have far exceeded the level of sustainable population development. The stock of *S. curriculus* was overfished in its vegetative form. We suggest to increase the catch age to 3 years old (or to a standard length of 238 mm) for the stock conservation of *S. curriculus* in the Xijiang River; the yield per recruitment could thus be increased by 175%. The protective efficacy could increase with a fishing moratorium in the Pearl River, and relevant fishery management measurements should be improved at the same time.

Key words: *Squaliobarbus curriculus*; yield per recruitment; spawning biomass per recruitment; resource utilization; biological reference point

Corresponding author: LI Xinhui. E-mail: lxhui01@aliyun.com