DOI: 10.12264/JFSC2022-0320

# 星康吉鳗单位补充量渔获量模型的不确定性评估

杨仕诚1,2,张崇良1,2

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003

摘要:为研究资源评估模型的不确定性及其对管理参考点的影响,以东、黄海星康吉鳗(Conger myriaster)为研究对象,对单位补充量渔获量(YPR)模型各参数进行敏感性分析,探究影响单位补充量渔获量和生物学参考点估算的关键参数,并利用蒙特卡洛方法模拟 YPR 模型中的参数不确定性,评估不确定性存在下星康吉鳗种群的资源现状及可能产生的风险。研究结果表明,当前东、黄海星康吉鳗的捕捞死亡系数  $F_{cur}$  远高于  $F_{0.1}$  的估计值,接近  $F_{max}$  。自然死亡系数  $F_{cur}$  证高于  $F_{0.1}$  的估计值,接近  $F_{max}$  。自然死亡系数  $F_{cur}$  证高于  $F_{0.1}$  的估计值,接近  $F_{max}$  。是估算生物学参考点  $F_{max}$  和  $F_{0.1}$  的敏感性参数,而幂指数系数  $F_{cur}$  为东、黄海星康吉鳗渔业状况产生误判的概率,即  $F_{cur}$  为。种  $F_{cur}$  为。 本参数不确定性的影响下,对东、黄海星康吉鳗渔业状况产生误判的概率,即  $F_{cur}$  为。 为  $F_{cur}$  为

关键词:星康吉鳗;单位补充量渔获量;资源评估;不确定性;敏感性分析

中图分类号: S931 文献标志码: A 文章编号: 1005-8737-(2023)02-0226-10

星康吉鳗(Conger myriaster)俗名星鳗,属鳗鲡目(Anguilliformes)、康吉鳗科(Congridae)、康吉鳗属(Conger),广泛分布于我国东海、黄海海域及日本本州和朝鲜半岛沿岸[1-2]。星康吉鳗具有较高的经济价值,是我国渔业重要的捕捞对象之一<sup>[3]</sup>。近年来,由于受到气候变化、环境污染及过度捕捞等因素的影响,中国近海许多经济鱼类的产量和资源量均明显下降,但我国渔业统计年鉴中未对星康吉鳗的渔获量进行单独统计,相关数据资料较为缺乏<sup>[4]</sup>,其资源可持续状况尚不明确。因此亟需开展渔业资源评估研究,为星康吉鳗渔业的可持续发展提供科学支撑。

由于研究数据的局限, 许多渔业资源评估方法并不适用于我国星康吉鳗渔业。单位补充量渔获量(yield per recruitment, YPR)模型将鱼类的生

长、死亡和补充相结合,仅需生长、死亡和体长-体重关系等鱼类生活史参数,就可以估算生物学参考点(biological reference point)<sup>[5]</sup>,适合于数据有限的资源评估与管理。通过与当前捕捞死亡系数(current fishing mortality rate,  $F_{cur}$ )的比较,该模型可以判断种群资源状态,评估鱼类的生长型过度捕捞<sup>[6]</sup>,为渔业管理者的决策提供支持。但同时该模型结构简单,没有拟合和校准过程,因此受到参数误差的显著影响,评估结果具有一定的不确定性,这在相关研究中往往被忽视。如麻秋云等<sup>[7]</sup>利用 2011 年、2016—2017 年星康吉鳗年龄、体长等数据,估算了星康吉鳗的生长参数和死亡参数,并使用 YPR 模型对其资源状况进行了评估,但并未充分考虑资源评估过程中可能出现的不确定性因素,结果的可靠性有待进一步检验。

收稿日期: 2022-09-08; 修订日期: 2022-10-24.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900906, 2018YFD0900904).

作者简介: 杨仕诚(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为种群动力学. E-mail: yangsc0729@163.com

通信作者: 张崇良, 副教授, 研究方向为渔业资源评估. E-mail: zhangclg@ouc.edu.cn

渔业资源评估的不确定性来源于多个方面,如种群的自然波动、动态信息缺乏、模型假设以及参数估计方法等<sup>[8-9]</sup>,导致了测量误差、过程误差、模型误差、操作误差<sup>[10]</sup>等不确定性因素,直接影响了对资源量、渔获量以及生物学参考点的估算,可能导致对种群资源现状产生错误的判断。本研究针对于星康吉鳗生活史参数的不确定性,首先利用敏感性分析确定影响 YPR、F<sub>0.1</sub>、F<sub>max</sub>估算的关键参数,以识别主要不确定性的来源。此外,利用蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simulation)方法在模型各参数中引入不同水平的不确定性,评估在不确定性条件下种群资源状况的误判风险。本研究旨在科学判断东、黄海星康吉鳗种群状态,为渔业资源的可持续管理提供科学依据。

# 1 材料与方法

# 1.1 单位补充量渔获量模型

本研究使用基于 Beverton-Holt 动态综合模型 的单位补充量渔获量(yield per recruitment, YPR) 模型[11]进行星康吉鳗资源评估,公式如下: Y/R=

$$aL_{\infty}^{\ \ b}F\mathrm{e}^{-M(t_{\rm c}-t_{\rm r})}\sum_{n=0}^{3}\frac{Q_{n}\mathrm{e}^{-nK(t_{\rm c}-t_{\rm 0})}}{F+M+nK}[1-\mathrm{e}^{-(F+M+nK)(t_{\lambda}-t_{\rm r})}](1)$$

式中, Y是渔获量, R 是补充量;  $L_{\infty}$ 、K、 $t_0$ 为鱼类的生长参数,分别代表渐近体长、生长系数和理论体长体重为 0 时的年龄; a、b 是体长-体重关系系数,分别代表生长的条件因子和幂指数系数; F 和 M 分别为捕捞死亡系数和自然死亡系数;  $t_r$ 、 $t_c$ 、 $t_\lambda$ 分别为补充年龄、开捕年龄和最大年龄。 $Q_n$ 为求和项的系数,在 n 为 0 到 3 时分别取值 1, -3, 3, -1。

该模型估算了两个重要的生物学参考点,  $F_{0.1}$ 和  $F_{\text{max}}$ 。其中,  $F_{0.1}$ 为 YPR 曲线斜率最大值(F=0 处)的 1/10 时对应的捕捞死亡系数;  $F_{\text{max}}$ 为 YPR 最大时的捕捞死亡系数。二者的计算公式分别如下[10]:

$$\frac{d(Y/R)}{dF}\Big|_{F=F_{0,1}} = 0.1 \frac{d(Y/R)}{dF}\Big|_{F=0}$$
 (2)

$$\frac{\mathrm{d}(Y/R)}{\mathrm{d}F} = 0\tag{3}$$

#### 1.2 数据来源与模型参数

星康吉鳗的生物学数据来源于 2016—2017

年东、黄海底拖网调查数据及 2011、2013—2020 年海州湾底拖网调查数据(图 1)。站位设计采用分层随机采样的方法,每个航次设置 18 个站位,共采得星康吉鳗样品 1548 尾。根据前期研究<sup>[4,7,12]</sup>,分别获取了星康吉鳗的生长参数、自然与捕捞死亡系数、选择性曲线和体长体重关系,其估计值如表 1 所示。此外根据相关文献,在 YPR 模型中将星康吉鳗的最大年龄  $t_{\lambda}$  设为 8 龄<sup>[13]</sup>,根据渔获物中被大量捕获的星康吉鳗全长<sup>[14]</sup>,估算得星康吉鳗的补充年龄  $t_{r}$ =0.668。根据选择性曲线求得参数开捕体长  $t_{c}$ ,经 von Bertalanffy 生长方程的换算即可求得所需参数,即开捕年龄  $t_{c}$ ,换算公式如下:

$$t_{c} = t_{0} - (1/K)\ln(1 - L_{c}/L_{\infty})$$
 (4)

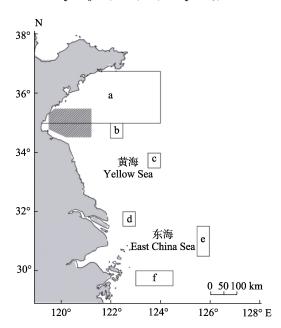


图 1 东、黄海星康吉鳗样品采样区域示意图 a-f 代表 2016、2017 年东、黄海采样区域。阴影部分 代表 2011、2013-2020 年海州湾采样区域。

Fig. 1 Survey map of *Conger myriaster* in the Yellow Sea and the East China Sea esent the sampling areas of the Yellow Sea and the

a-f represent the sampling areas of the Yellow Sea and the East China Sea in 2016 and 2017. Shade area represents the sampling area of Haizhou Bay in 2011 and 2013–2020.

# 1.3 参数敏感性及模型不确定性分析

单位补充量渔获量模型中具不确定性的参数 主要包括鱼类的生长参数  $L_{\infty}$ 、K、 $t_0$ ,体长-体重 关系系数 a、b,自然死亡系数 M 和开捕年龄  $t_c$ 。 在使用 YPR 模型进行资源评估时,应识别影响模型

#### 表 1 东黄海星康吉鳗的生活史参数

Tab. 1 Life history parameters of *Conger myriaster* of in the Yellow Sea and the East China Sea

生活史参数 life history parameter	表达式 expression	参考文献 references
VBGF 生长方程 Von Bertalanffy growth equation	$L_t = 102.6[1 - e^{-0.226(t+0.0315)}]$	[4]
体长-体重关系 weight-length relation	$W=1.74\times10^{-7}L^{3.35}$	[4]
自然死亡系数 natural mortality	M=0.33/年	[7]
捕捞死亡系数 fishing mortality	$F_{\text{cur}} = 0.42/$ 年	[12]
选择性曲线 Logistic selectivity curve	$S_L = \frac{1}{1 + e^{-0.5(L - 30)}}$	[7]

的敏感性参数, 以控制关键参数引起的不确定性<sup>[15]</sup>。本研究根据文献资料中的参数值, 利用敏感性分析的方法设置参数的变化范围(表 2), 在相同的变化幅度下(按比例变化)<sup>[16]</sup>分析不同参数对 YPR、 $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$  估算的影响程度, 识别敏感性参数。

此外,由于在参数不确定性下生物学参考点的估算存在一定误差,因此与当前捕捞死亡系数 $F_{cur}$ 相比较,判断种群资源状态时也可能发生误判,造成一定风险。本研究采用蒙特卡洛模拟方法,分析参数不确定性对种群过度捕捞状态(即

表 2 模型参数敏感性分析的数值设置

Tab. 2 Model parameters settings in sensitivity analysis

Tab. 2 Model para	imeters settings in ser	isitivity ai	1419 515
模型参数	取值范围	均值	参考文献
model parameter	range	mean	reference
渐近体长/m asymptotic length, $L_{\infty}$	820.8-1231.2	1026	[4]
生长系数 growth rate, K	0.1808-0.2712	0.226	[4]
体长体重为零时年龄 the hypothetical age at zero length and weight, $t_0$	-0.03780.0252	-0.0315	[4]
生长的条件因子 condition factor, a	1.39×10 <sup>-7</sup> -2.09×10 <sup>-7</sup>	1.74×10 <sup>-7</sup>	[4]
幂指数系数 the exponent of weight-length relation, b	2.68-4.02	3.35	[4]
自然死亡系数/年 natural mortality, M	0.264-0.396	0.33	[7]
开捕年龄 age at first capture, tc	1.2-1.8	1.5	[7]

 $F_{\text{cur}} > F_{0.1}$  或  $F_{\text{max}}$ )的影响<sup>[17-18]</sup>,其流程包括:

- (1) 根据 YPR 模型参数的估算值(表 1), 生成年龄-体长、体长-体重等数据;
- (2) 在生成数据中引入随机误差,产生一系列的"观测值",以模拟渔业活动中观测和过程误差:
- (3) 基于"观测值", 利用非线性参数估计方 法对参数进行重新估计;
- (4) 将得到的参数重新带入 YPR 模型中, 估算当前 YPR 的值和  $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$ 的大小;
- (5) 重复步骤(3)和(4), 获得一系列 YPR、 $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$  的值并绘制其概率密度分布。

其中步骤(2)在"观测值"中引入随机误差的方法如下:

$$L_t = L_{\infty} [1 - e^{-K(t - t_0)}] + \varepsilon_1, \varepsilon_1 \sim N(0, \sigma_1)$$
 (5)

$$W = aL^b e^{\varepsilon_2}, \varepsilon_2 \sim N\left(-\frac{{\sigma_2}^2}{2}, \sigma_2\right)$$
 (6)

$$M = \overline{M}e^{\varepsilon_3}, \varepsilon_3 \sim N\left(-\frac{{\sigma_3}^2}{2}, \sigma_3\right)$$
 (7)

$$S_{t} = \frac{1}{1 + e^{-q(L - L_{c}) + \varepsilon_{4}}}, \varepsilon_{4} \sim N(0, \sigma_{4})$$
 (8)

根据相关研究,假设体长数据具有加性的误差结构,体长-体重数据具有乘性的误差结构 $^{[19]}$ 。其中,误差项 $\varepsilon_1$ 服从于均值为 0,标准差为 $\sigma_1$ 的正态分布,即 $\varepsilon_1 \in N(0,\sigma_1^2)$ ; $\varepsilon_2$ 服从于均值为 $-\frac{\sigma_2^2}{2}$ ,标准差为 $\sigma_2$ 的正态分布, $\varepsilon_2 \in N\left(\frac{-\sigma_2^2}{2},\sigma_2^2\right)$ 。对于自然死亡系数,许多研究认为其服从于对数型正态分布 $^{[20]}$ ,因此假设自然死亡系数的误差项 $\varepsilon_3$ 服从于均值为 $-\frac{\sigma_3^2}{2}$ ,标准差为 $\sigma_3$ 的正态分布,即 $\varepsilon_3 \in N\left(\frac{-\sigma_2^2}{2},\sigma_2^2\right)$ 。假设渔具选择性服从逻辑斯蒂型曲线,其分母自然常数 e 的指数项具有相加的误差结构 $^{[21]}$ ,其误差项 $\varepsilon_4$ 服从于均值为 0,标

本研究设置了 5 个模拟场景, 以探究生长参

准差为  $\sigma_4$  的正态分布,即  $\varepsilon_4 \in N(0, \sigma_4^2)$ 。

数、体长体重关系系数、自然死亡系数和开捕年龄这 4类参数的不确定性对 YPR 模型可能产生的影响(表 3)。其中,情形 1 到情形 4 中均只考虑一类参数的不确定性,其余参数无不确定性;而情形 5 中 4 类参数均存在不确定性,不确定性水平(即标准差  $\sigma_{1,2,3,4}$ )的范围设置为  $0\sim0.9$ ,步长为 0.1。对于每种情形中的各个不确定性水平,分别模拟 1000 组数据进行 YPR 模型估算,分析在不同不确定性水平下  $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$  的分布及变化,并将其与  $F_{cur}$  进行比较,以估算东、黄海星康吉鳗渔业被判断为过度捕捞的概率。

表 3 YPR 模型参数不确定性的模拟场景
Tab. 3 Simulation scenarios of the parameter uncertai

Tab. 3 Simulation scenarios of the parameter uncertainty in yield per recruitment (YPR) model

情景 scenario	生长参数 $L_{\infty}, K, t_0$ growth parameter $\sigma_1$	体长体重美 系系数 $a, b$ parameters of weight-length relation $\sigma_2$	自然死亡系 $ y M $ natural mortality $ \sigma_3 $	开捕年龄 $t_c$ age at first capture $\sigma_4$
1	0-0.9	0	0	0
2	0	0-0.9	0	0
3	0	0	0-0.9	0
4	0	0	0	0-0.9
5	0-0.9	0-0.9	0-0.9	0-0.9

本研究中所涉及的敏感性分析及不确定性分析均通过 R 软件实现, 相关代码由自己编写; 文中图片均使用 ggplot2 软件包进行绘制。

#### 2 结果与分析

# 2.1 单位补充量渔获量

单位补充量渔获量随捕捞死亡系数的增加而快速增加,在达到最大值后开始下降,最终趋于稳定(图 2)。由公式(2)和(3)计算东、黄海星康吉鳗的生物学参考点,其中  $F_{0.1}$  的估计值为 0.282/年,对应的单位补充量渔获量  $YPR_{0.1}$  为 98.92;  $F_{max}$  的估计值为 0.428/年,  $YPR_{max}$  为 104.01。当前东、黄海星康吉鳗的捕捞死亡系数  $F_{cur}$  为 0.42/年,由其与自然死亡系数可求得星康吉鳗的总死亡系数 Z 为 0.75/年,开发率 E 为 56%。维持当前捕捞强度所能获得的单位补充量渔获量  $YPR_{cur}$  为 104,接近最大渔获量  $YPR_{max}$ 。 $F_{cur}$  接近于  $F_{max}$ ,比  $F_{0.1}$ 

约高 50%, 但目前的单位补充量渔获量仅比 YPR<sub>0.1</sub>高 5%。若据此来判断东、黄海星康吉鳗种群的资源现状, 表明当前资源处于高度开发的状态, 资源利用不合理, 需对其捕捞强度进行合理的管控以实现可持续发展。

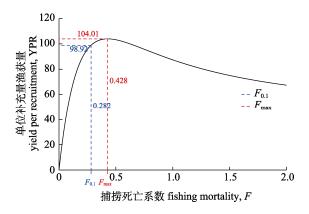


图 2 单位补充量渔获量随捕捞死亡 系数的变化曲线

Fig. 2 Curve of yield per recruitment (YPR) with fishing mortality (F) for Conger myriaster

# 2.2 参数的敏感性分析

对 YPR 模型各参数进行敏感性分析表明,在相同的变化幅度下,单位补充量渔获量对幂指数 b 的反应极为灵敏,远大于其他参数,其次为渐近体长  $L_{\infty}$ 、生长参数 K 和自然死亡系数  $M_{\circ}$  此外,生长的条件因子 a 对 YPR 有一定影响但较为有限,而 YPR 对开捕年龄  $t_{\circ}$  和体长体重为 0 时的年龄  $t_{0}$  则反应不灵敏(图 3)。

 $F_{0.1}$  和  $F_{\text{max}}$  的结果与单位补充量渔获量的表现不一致。 $F_{0.1}$  对开捕年龄  $t_{\text{c}}$  变化的响应幅度最大,其次是自然死亡系数 M 和生长系数 K; 对 $F_{\text{max}}$  的敏感性参数为自然死亡系数 M、生长系数 K 和开捕年龄  $t_{\text{c}}$ 。此外, $F_{0.1}$ 、 $F_{\text{max}}$  对其他参数变化的响应幅度极小,变化较为平缓。相比于  $F_{0.1}$ , $F_{\text{max}}$  的偏差变化范围更大,更易受到不确定性因素的影响。综上所述,使用 YPR 模型对星康吉鳗进行资源评估时,自然死亡系数 M、生长系数 K 和开捕年龄  $t_{\text{c}}$  是估算生物学参考点的敏感性参数,幂指数系数 b、渐近体长  $L_{\infty}$ 、生长系数 K 和自然死亡系数 M则是计算单位补充量渔获量的敏感性参数。

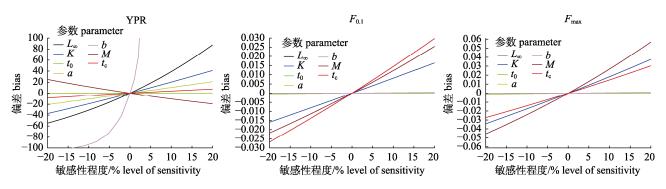


图 3 YPR、 $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$  随 YPR 参数变化的敏感性分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of YPR,  $F_{0.1}$  and  $F_{\text{max}}$  with the changes of key parameters in YPR

# 2.3 不确定性下的开发现状评估

当 YPR 模型参数具有较低不确定水平  $(\sigma=0.1)$  和中等不确定水平  $(\sigma=0.5)$  时, $F_{0.1}$  和  $F_{max}$  在情形 1、2、4 时均表现出相似的结果,分布较为集中;而情形 3 和情形 5 结果相似,其误差范围较大(图 4)。随不确定性水平的升高,估算的  $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$  中离群点的数量显著增加,其分布更加离散。因此,使用 YPR 模型估算生物学参考点时,自然死亡系数的不确定性将显著影响估算结果,

而生长参数、体长-体重关系系数和开捕年龄的不确定性对其估算结果的影响较为有限。

将  $F_{0.1}$ 、 $F_{\text{max}}$  的分布与当前捕捞死亡系数  $F_{\text{cur}}$ 相比较,计算  $F_{\text{cur}}$ 大于  $F_{\text{BRP}}$  的概率,即种群过度捕捞风险。P ( $F_{\text{cur}}$ > $F_{0.1}$ )随着不确定水平的升高而减小,而 P ( $F_{\text{cur}}$ > $F_{\text{max}}$ )则随不确定水平的升高而增大(图 5)。其中,自然死亡系数的高不确定性将显著影响  $F_{\text{cur}}$ 大于  $F_{\text{BRP}}$  的概率。当自然死亡系数的不确定水平从 0 升高到 0.9 时, $F_{\text{cur}}$ 大于  $F_{0.1}$  的

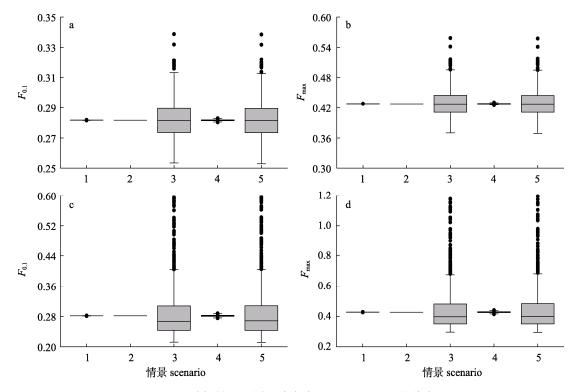


图 4 5 种场景、不同不确定水平下  $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$  的分布

a、b 分别表示较低不确定水平下( $\sigma$ =0.1)  $F_{0.1}$  和  $F_{max}$  的分布; c、d 则分别表示中等不确定水平下( $\sigma$ =0.5)  $F_{0.1}$  和  $F_{max}$  的分布. Fig. 4 Distribution of  $F_{0.1}$  and  $F_{max}$  in five scenarios under different levels of uncertainty

a, b represent the distribution of  $F_{0.1}$  and  $F_{\text{max}}$  at a lower level of uncertainty ( $\sigma$ =0.1), respectively; c, d represent the distribution of  $F_{0.1}$  and  $F_{\text{max}}$  at a higher level of uncertainty ( $\sigma$ =0.5), respectively.

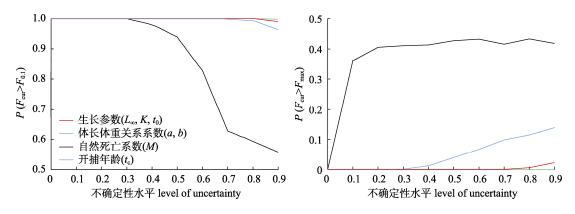


图 5 不同不确定水平下  $F_{cur} > F_{BRP}$  的概率

不同参数的不确定性用不同颜色的实线表示; 左图为  $F_{cur} > F_{0.1}$ 的概率, 右图为  $F_{cur} > F_{max}$ 的概率.

Fig. 5 The probability of  $F_{\text{cur}} > F_{\text{BRP}}$  under different levels of uncertainty Solid lines with different colors denote different parameters. The left figure shows the probability of  $F_{\text{cur}} > F_{0.1}$ , and the right figure shows the probability of  $F_{\text{cur}} > F_{\text{max}}$ .

概率从 1 降低到 0.558,  $F_{cur}$ 大于  $F_{max}$ 的概率则从 0 升高到 0.418。 $P(F_{cur}>F_{BRP})$ 随生长参数、体长体重关系系数和开捕年龄的不确定水平的变化不明显(图 5)。

现阶段捕捞死亡系数  $F_{\text{cur}}$ 介于  $F_{0.1}$ 和  $F_{\text{max}}$ 之间,但并未处于过度捕捞状态。但随自然死亡系数的不确定性水平升高,东、黄海星康吉鳗渔业被判断为合理开发或过度捕捞的概率均有所增加,可能对其资源现状产生错误的判断。当不确定性水平较低时, $P(F_{\text{cur}}>F_{\text{max}})$ 更易受到不确定性的影响;当不确定水平较高时,无论是以  $F_{0.1}$  或  $F_{\text{max}}$ 为生物学参考点,出现两种误判的概率相当。

#### 3 讨论

本研究通过敏感性分析方法,探究了影响星康吉鳗单位补充量渔获量模型的关键参数,并分析各参数对模型结果不确定性的贡献。研究表明,星康吉鳗单位补充量渔获量模型的敏感性参数为幂指数系数b、渐近体长 $L_{\infty}$ 、生长参数K和自然死亡系数M; 而在估算生物学参考点时,敏感性参数为自然死亡系数M、生长系数K和开捕年龄 $t_{co}$  因此在使用YPR模型对星康吉鳗资源状况进行评估时,应针对这些敏感性参数,将其不确定性水平减小到最低。尤其是自然死亡系数M,对星康吉鳗的YPR、 $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$ 均有显著影响。由于其估算较为复杂,在数据不足时往往使用基于生

活史参数的经验公式进行粗略的估算,准确性较差,如刘逸文等<sup>[5]</sup>对山东近海口虾蛄使用 8 种方法,发现 M 的估算值为 0.75~1.27,这对 YPR 模型的合理应用产生重要限制。本研究强调了在应用 YPR 时,应首先需要了解模型的敏感性参数并提高参数估计的准确性,对于难以获得准确值的参数可使用多种估算方法求取平均值,同时要深化对现有估算方法的研究,克服模型本身的局限性。

参数敏感性分析有助于了解参数的不确定性 对YPR模型的影响机制。本研究利用蒙特卡洛模 拟的方法分析 YPR 模型的不确定性, 发现所估算 的FBRP的不确定性随参数不确定水平的增加而增 加, 但仅自然死亡系数M的不确定性对 $F_{BRP}$ 对有 显著影响。这与 Chen 等[18]对缅因湾美国龙虾的 研究结果是一致的, 但与敏感性分析结果有所不 同。这是由于本研究在进行不确定分析时,将渐 近体长、生长系数与体长体重为 0 时年龄归为一 类进行模拟, 为鱼类的 VBGF 生长方程中添加标 准误差, 重新进行参数估计以反映各参数的不确 定性。该过程与敏感性分析不同, 淡化了单独参 数对模型的影响, 反映了过程误差和观测误差的 综合作用。而自然死亡系数则是由经验公式估算, 认为是一个独立的参数, 其敏感性梯度的变化也 能反映其对于模型不确定性的影响。需要说明的 是,影响YPR模型不确定性的关键因素是因种而 异的, 如朱立新等[19]认为对于北部湾二长棘鲷, 其生长参数和体长-体重关系系数是引起  $F_{BRP}$  估计中不确定性的主导因素,而非自然死亡系数。因此对于鱼类 YPR 模型不确定性的研究仍需要进行详细的分析验证。

本研究探讨了在不确定性因素存在下使用 YPR 模型进行资源评估时所产生的风险。其中  $F_{0.1}$  和  $F_{\text{max}}$  作为渔业管理的主要目标参考点, 通 常用于预防鱼类的生长型过度捕捞 $^{[22]}$ 。其中,  $F_{0.1}$ 因在能够保持最适产量的同时, 避免种群资源的 崩溃,成为了现如今应用最广泛的目标参考点之 一[20]。本研究在分析不确定性因素对生物学参考 点估算的影响时发现,  $F_{\text{max}}$  的变化量较为剧烈, 相比于 $F_{\text{max}}$ , $F_{0.1}$ 表现得更为稳健。这与之前许多 学者的研究结果是一致的[9,18-19,23]。因此, 从预防 性的渔业管理角度来说, 当环境条件变化较大时,  $F_{01}$ 可以保持相对的稳定, 更适合作为东、黄海星 康吉鳗渔业管理目标参考点。同时, 现阶段捕捞 死亡系数  $F_{\text{cur}}$  远大于  $F_{0.1}$ , 略低于  $F_{\text{max}}$ , 表明东、 黄海星康吉鳗渔业存在高强度开发, 具有明显的 过度捕捞风险。但由于参数不确定性因素的影响, 评估中可能会发生两种情况的误判: (1)  $F_{cur} < F_{0.1}$ , 即星康吉鳗种群状况被判断为合理开发; (2) Fcur>  $F_{\text{max}}$ , 即星康吉鳗种群状况被判断为严重的过度 捕捞。本研究表明, 生长参数、体长-体重关系系 数和开捕年龄的不确定性对  $F_{BRP}$  的影响较小, 误 判的可能性几乎不会随不确定性的增加而增加, 而自然死亡系数的不确定性则会导致发生两种误 判的概率大幅增加。此外, P (Fcur>FBRP)不仅随不 确定性水平发生变化, 还会随着管理决策者采用 的置信水平的增加而降低, 并在置信水平接近 100%时急剧减小[17-18]。由于不确定性因素的存在, 采用较低的置信水平会使结果不具备可靠性, 而 采用较高的置信水平就有可能对种群现状产生过 度乐观的估计。因此在不确定性因素下使用 YPR 模型进行资源评估时需充分考虑, 选择适当的置 信水平以较好反映种群真实的资源状况。

本研究对星康吉鳗单位补充量渔获量模型主要参数的不确定性进行了评估,但考虑到渔业数据中潜在的不确定性来源,所设置的一系列场景

可能难以反映东、黄海星康吉鳗种群的真实不确 定性水平。星康吉鳗是能进行季节性长距离洄游 的鱼类, 日本、韩国海域的星康吉鳗于每年秋季 进行洄游, 从东北到西南途经黄海海域直至到达 舟山渔场[24]。在洄游过程中, 由于各个海域的水 温、盐度、含氧量、饵料状况等不同, 星康吉鳗 个体间可能会存在明显的年际生长差异[25], 如尹 洁等[26]发现青岛海域和舟山海域星康吉鳗肛长、 头宽等可量特征间存在显著差异。此外, 星康吉 鳗的生活史参数,如自然死亡系数M也存在年际 变化, 如麻秋云等[7]曾根据海州湾年底层平均水 温的变化估算 M 的范围为 0.24~0.40。自然死亡系 数的不确定性显著影响着  $F_{BRP}$  的估算, 进而对星 康吉鳗渔业的评估结果产生干扰。此外, 考虑到 样本的代表性,采样方法、采样过程等因素也可 能对估算捕捞死亡系数 F 产生较大的不确定性, 如本研究使用底拖网数据估算东、黄海星康吉鳗 当前的捕捞死亡系数, 未包括鳗鱼笼等捕捞网具, 由拖网、定置网等捕获的星康吉鳗往往是作为兼 捕物而出现[27], 其年龄组和体长组均较小, 不能很 好地包含星康吉鳗各年龄组的个体。因此, 今后 在对东、黄海星康吉鳗资源状况进行评估时,要 充分考虑捕捞死亡系数 F 可能存在的不确定性, 与 F<sub>BRP</sub> 进行比较, 更加谨慎地判断出现误判风险 的概率。

本研究表明,利用 YPR 模型评估星康吉鳗资源状态时应充分考虑不确定性因素的影响。在当前捕捞死亡系数  $F_{cur}$ 一定时,YPR 模型中各参数,尤其是自然死亡系数中的不确定性水平越高,所估算的  $F_{0.1}$ 、 $F_{max}$  中不确定性越高,从而会大大增加对种群状态误判的风险。当前东、黄海星康吉鳗的捕捞死亡系数远超  $F_{0.1}$ ,接近  $F_{max}$ ,其资源具有过度捕捞的风险,开发利用仍不合理。因此从预防性管理的角度来说,应制定并采取相应的管理策略,如减少捕捞努力量、控制网目尺寸、限制开捕体长等措施,以保证东、黄海星康吉鳗能可持续地进行开发和利用。此外,考虑到种群的动态变化过程中潜在的不确定性,今后在应用YPR 模型对鱼类种群资源进行评估时应当慎重考

虑,分析不确定性的来源并量化模型各参数的不确定性,以获取更为准确的评估结果。

# 参考文献:

- [1] Chen D G. Fishery ecology in the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1991. [陈大刚. 黄渤海渔业 生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.]
- [2] Zhang C G. Fauna Sinica: Osteichthys Anguillifomes Notacanthiformes[M]. Beijing: China Science Press, 2010: 199-203. [张春光. 中国动物志: 硬骨鱼纲·鳗鲡目·背棘鱼目[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 199-203.]
- [3] Tang Y L, Sun G W, Zhao T Y, et al. Mesh size selectivity of Conger myriaster pot[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(1): 136-142. [唐衍力, 孙国微, 赵同阳, 等. 星康吉鳗笼网目选择性研究[J]. 中国水产科学, 2010, 17(1): 136-142.]
- [4] Mu X X, Zhang C, Xue Y, et al. Fishery biology of whitespotted Conger *Conger myriaster* (brevoort, 1856) in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(6): 18-24.
- [5] 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.]
- [6] Katsukawa T. Evaluation of current and alternative fisheries management scenarios based on spawning-per-recruit (SPR), revenue-per-recruit (RPR), and yield-per-recruit (YPR) diagrams[J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(5): 841-846.
- [7] Ma Q Y, Mu X X, Ren Y P, et al. The growth, mortality and yield per recruitment of white-spotted Conger (*Conger myriaster*) 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.]
- [8] Cao S P, Liu Q. Stock assessment of the hairtail (*Trichiurus haumela*) fishery in the East China Sea by incorporating uncertainty into the estimation of the biological reference points F0.1 and Fmax[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 F0.1 和 Fmax 的估计以评估东海带鱼渔业资源[J]. 南方水产, 2007, 3(2): 42-48.]
- [9] Zhang M M, Liu Y, Xie T, et al. Growth, mortality and reasonable utilization of Sebastes schlegelii in the artificial reef area of Weihai, Shandong Province[J]. Journal of

- Fisheries of China, 2019, 43(9): 1925-1936. [张萌萌, 刘岳, 解涛, 等. 威海西霞口海洋牧场鱼礁区中许氏平鲉的生长、死亡及合理利用[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1925-1936.]
- [10] Jiao Y, Chen Y, Wroblewski J. An application of the composite risk assessment method in assessing fisheries stock status[J]. Fisheries Research, 2005, 72(2-3): 173-183.
- [11] Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 18-46, 124-130. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 农业出版社, 2005: 18-46, 124-130.]
- [12] Mu X X, Zhang C L, Xu B D, et al. Accounting for the fish condition in assessing the reproductivity of a marine eel to achieve fishery sustainability[J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108116.
- [13] Froese R, Pauly D. World Wide Web electronic publication[EB/OL]. FishBase, (2014-01-02)/[2022-05-12]. http://www.fishbase.se/search.php.
- [14] Wang X H, Qiu Y S, Du F Y. Estimation of growth and mortality parameters of Chinese herring (Ilisha elongata) in Zhujiang River Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(4): 42-48. [王雪辉, 邱永松, 杜飞雁. 珠江口水域鳓鱼生长和死亡参数估算[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(4): 42-48.]
- [15] Cui M Y, Tian S Q, Ma Q Y, et al. Assessment for Japanese Scad *Decapterus maruadsi* fishery in offshore waters of Southern Zhejiang based on per recruitment model[J]. Fisheries Science, 2022, 41(5): 727-737. [崔明远, 田思泉, 麻秋云等. 基于单位补充量模型的浙江南部海域蓝圆鲹资源评价[J]. 水产科学, 2022, 41(5): 727-737.]
- [16] Grüss A, Robinson J. Fish populations forming transient spawning aggregations: Should spawners always be the targets of spatial protection efforts?[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(2): 480-497.
- [17] Grabowski R, Chen Y. Incorporating uncertainty into the estimation of the biological reference points F0.1 and Fmax for the Maine green sea urchin (*Strongylocentrotus droebachiensis*) fishery[J]. Fisheries Research, 2004, 68(1-3): 367-371.
- [18] Chen Y, Wilson C. A simulation study to evaluate impacts of uncertainty on the assessment of American lobster fishery in the Gulf of Maine[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59(8): 1394-1403.
- [19] 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.]
- [20] Hilborn R, Walters C J. choice, dynamics, and uncertainty[M]. New York: Chapman and Hall, 1992
- [21] Lin Y J, Chang Y J, Sun C L, et al. Evaluation of the Japanese eel fishery in the lower reaches of the Kao-Ping River, southwestern Taiwan using a per-recruit analysis[J]. Fisheries Research, 2010, 106(3): 329–336.
- [22] 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.]
- [23] Wang J Q, Liu S D, Tang Y L, et al. Growth, mortality and resource evaluation of *Hexagrammos otakii* inhabiting the artificial reef area of lidao, Shandong Province[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(11): 51-59. [王佳琦, 刘淑德, 唐衍力, 等. 山东俚岛人工鱼礁区大泷六线鱼生长、死亡及资源评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(11): 51-59.]
- [24] Tian F. Fishing efficiency of white-spotted Conger longline

- fishing gear in Shandong coastal sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 4-5]. [田方. 山东近海星康吉鳗 (*Conger myriaster*)延绳钓渔具性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 4-5].]
- [25] Xu H L, Chen Y, Chen X J, et al. Impacts of uncertainty on estimated parameters in von bertalanffy growth function[J]. Fisheries Science, 2016, 35(2): 169-173. [徐海龙, 陈勇, 陈新军, 等. 引入不确定性对 Von Bertalanffy 生长方程关系参数估算的影响[J]. 水产科学, 2016, 35(2): 169-173.]
- [26] Yin J, Mu X X, Zhang C L, et al. Comparison of morphological and genetic characteristics of *Conger myriaster* populations in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(3): 358-367. [尹洁, 牟秀霞, 张崇良, 等. 我国近海星康吉鳗群体的形态学、遗传学比较研究[J]. 水产学报, 2020, 44(3): 358-367.]
- [27] Yang B Z. Study of fishing gear selectivity of trap for white-spotted Conger in the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011: 5-6]. [杨炳忠. 黄海区鳗鱼笼渔具选择性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 5-6.]

# Assessment of the uncertainty in yield per recruitment model of whitespotted conger, *Conger myriaster*

YANG Shicheng<sup>1, 2</sup>, ZHANG Chongliang<sup>1, 2</sup>

- 1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
- Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003,
   China

**Abstract:** Whitespotted conger (Conger myriaster) is a commercially important species in China fisheries. It is necessary to assess the biomass and stock status of this species to promote sustainable development. However, traditional methods for stock assessment usually require substantial fishery data, which are often unavailable in most coastal fisheries in China. The lack of data raises a high level of uncertainty in estimating life history parameters and creates a barrier for stock assessment when using stock assessment models. To investigate the uncertainty in fish stock assessment models and their impact on management reference points, sensitivity analysis was carried out for the yield per recruitment (YPR) model of C. myriaster in the East China Sea and the Yellow Sea. The same level of variability was set for the key parameters of YPR model, and the variations in YPR,  $F_{0.1}$ , and  $F_{\text{max}}$  were analyzed to identify the key parameters influencing the estimation of biological reference points. In addition, the Monte Carlo method was used to simulate the uncertainty in the application of YPR model by creating five scenarios to represent different levels of uncertainty in key parameters. In each scenario, we generated "observed" data sets by incorporating predicted data from yield per recruit (YPR) with random errors. Then we used nonlinear estimation methods to re-estimate parameters from "observed" data and applied them to calculate the biological reference points. The probability density distribution of  $F_{0.1}$  and  $F_{\text{max}}$  can be obtained from 1000 repetitions of the simulation process. Finally, the stock status and potential overfishing risks of C. myriaster were evaluated by comparing the distribution of  $F_{BRP}$  with  $F_{cur}$ . The results showed that the sensitive parameters for estimating biological reference points ( $F_{\text{max}}$  and  $F_{0.1}$ ) were natural mortality (M), growth coefficient (K), and age at first capture  $(t_c)$ , while the exponent of weight-length relation (b), asymptotic length  $(L_\infty)$ , growth rate (K), and natural mortality (M) were the sensitive parameters for calculating YPR. Due to parameter uncertainty, the risk of status misjudgment, i.e.,  $P(F_{cur} < F_{0.1})$  and  $P(F_{cur} > F_{max})$ , would rise with the increasing uncertainty when assessing C. myriaster stock in the East China Sea and Yellow Sea. Compared with  $F_{\rm max}$ ,  $F_{0.1}$  was more robust to the different levels of uncertainty and thus more suitable as a target reference point for the management of C. myriaster. In general, the stock of C. myriaster in the East China Sea and Yellow Sea is close to growthoverfishing at present. The exploitation level is unreasonable and it is necessary to conserve the resource to maintain sustainable development. This study demonstrated the influence of uncertainty on the assessment of the stock status of C. myriaster in the East China Sea and Yellow Sea, which could provide references for fishery managers to formulate and implement corresponding management strategies.

**Key words:** Conger myriaster; yield per recruitment; stock assessment; uncertainty; sensitivity analysis

Corresponding author: ZHANG Chongliang. E-mail: zhangclg@ouc.edu.cn