

田志盼, 田思泉, 戴黎斌, 等. 基于贝叶斯状态空间产量模型的大西洋黄鳍金枪鱼资源评估[J]. 海洋学报, 2021, 43(2): 67–77, doi:10.12284/hyxb2021002

Tian Zhipan, Tian Siqun, Dai Libin, et al. Stock assessment for Atlantic yellowfin tuna based on Bayesian state-space production model[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(2): 67–77, doi:10.12284/hyxb2021002

基于贝叶斯状态空间产量模型的大西洋黄鳍金枪鱼资源评估

田志盼¹, 田思泉^{1,2,3}, 戴黎斌¹, 麻秋云^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 是全球远洋渔业的重要目标鱼种, 要实现有效的管理, 对其进行科学的资源评估是必不可少的。本文以大西洋黄鳍金枪鱼为研究对象, 根据国际大西洋金枪鱼养护委员会的渔获量和单位捕捞努力量渔获量数据, 使用贝叶斯状态空间模型进行资源评估, 并探讨不同剩余产量函数和单位捕捞努力量渔获量数据对评估的影响。结果表明, 使用美国、委内瑞拉、日本和中国台北 4 个船队的单位捕捞努力量渔获量数据及 Fox 剩余产量函数时模型拟合效果最佳。关键参数环境容纳量和内禀增长率的估计中值和 95% 置信区间分别为 $178 (140, 229) \times 10^4$ t 和 0.210 (0.159, 0.274); 当前资源量为 72.5×10^4 t, 最大可持续产量为 13.7×10^4 t 时, 种群既没有遭受资源型过度捕捞, 也没有捕捞型过度捕捞发生。敏感性分析表明, 当渔获量数据存在误报率 (70%、80%、90%、110%、120% 和 130%) 时, 生物量的评估结果偏高, 而捕捞死亡率的结果偏低, 但种群均处于健康状态; 预测分析显示, 当总允许可捕量设为 11×10^4 t 时, 资源在 2024 年前仍基本保持健康状态。本研究与国际大西洋金枪鱼养护委员会现有的评估结果基本一致, 且模型较稳健, 可以为管理决策提供建议。根据模型结果, 建议总允许可捕量为 11×10^4 t 或更低, 以使资源达到可持续开发水平。

关键词: 大西洋; 黄鳍金枪鱼; 资源评估; 剩余产量模型; 敏感性分析

中图分类号: P714⁺.5; S931.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)02-0067-11

1 引言

黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 是高度洄游类的鱼种, 广泛分布于三大洋的热带和亚热带海域, 资源量相对丰富且价值较高, 是金枪鱼渔业中重要的经济鱼种。随着人类需求的逐渐上升, 其受到的捕捞威胁也不断增加, 因此进行科学的资源评估进而制定合理的养护管理措施, 是实现渔业可持续发展的基础。

目前, 国际上对公海金枪鱼实施管辖的是各类区

域性渔业管理组织 (Regional Fisheries Management Organizations, RFMOs), 大西洋黄鳍金枪鱼由国际大西洋金枪鱼养护委员会 (International Commission for Conservation of Atlantic Tunas, ICCAT) 进行管理。ICCAT 在对黄鳍金枪鱼的资源评估中, 主要使用的评估模型有非平衡剩余产量模型 (A Stock Production Model Incorporating Covariates, ASPIC)^[1]、年龄结构产量模型 (Age-Structured Production Model, ASPM)^[2]、实际种群分析 (Virtual Population Analysis, VPA)^[3] 和资源综合

收稿日期: 2019-12-11; 修订日期: 2020-05-09。

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”项目 (2019YFD0901404); 中国博士后科学基金面上项目 (2019M651475); 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室开放基金 (2019301101)。

作者简介: 田志盼 (1996—), 男, 安徽省无为市人, 主要研究方向为渔业资源评估。E-mail: tianzhipanwuwei@163.com

* **通信作者:** 麻秋云, 女, 讲师, 研究方向为种群动力学和渔业资源评估。E-mail: qyma@shou.edu.cn

模型(Stock Synthesis III, SS3)^[4]等,每个模型评估的资源状态不尽相同,ICCAT综合各模型认为,当前资源处于资源型过度捕捞而无捕捞型过度捕捞状态。其中,剩余产量模型,相较于其他模型来说,对渔业数据需求较低(仅需渔获量和种群丰度指数),且能得到最大可持续产量(Maximum Sustainable Yield, MSY)等参考点信息,故是各类渔业资源评估中使用最广泛的模型之一^[5]。

除了观测误差,渔业资源种群动态中还存在环境变化等因素产生的过程误差,而ICCAT当前使用的ASPIC等产量模型无法估计过程误差,由该类误差产生的不确定性难以被考虑在内。JABBA(Just Another Bayesian Biomass Assessment)是一种基于贝叶斯方法的状态空间产量模型^[6],其中贝叶斯框架可以通过合理的先验信息来降低模型中的不确定性^[7-8],状态空间建模则可以同时估计过程误差和观测误差^[9-11]。为此,本文尝试采用JABBA模型来评估大西洋黄鳍金枪鱼的资源状况,研究状态空间建模对该资源进行评估的适用性,以期为该重要鱼种的科学研究和渔业管理提供更多基础资料和参考信息。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本文利用的1950–2017年渔获量数据来自ICCAT数据库,渔获量在1990年达到最高的 19.36×10^4 t,2017年为 13.53×10^4 t(图1)。单位捕捞努力量渔获量(Catch Per Unit Effort, CPUE)数据来自ICCAT黄鳍金枪鱼资源评估会议报告和CPUE标准化研究报告^[12-16],共计8个延绳钓船队的标准化CPUE数据(表1)。虽然各船队根据各自渔业和数据情况采用了不同的CPUE标准化方法(日本、委内瑞拉和美国为广义线性模型,而乌拉圭1、乌拉圭2、巴西、中国台北1和中国台北2则为广义线性混合模型),但应ICCAT相关工作组的建议,本文资源评估模型在建模时纳入了所有8个CPUE数据。

2.2 JABBA模型

JABBA(版本为v1.1^[6])中运行的Pella-Tomlinson剩余产量函数形式如下:

$$SP = \frac{r}{m-1} B \left[1 - \left(\frac{B}{K} \right)^{m-1} \right], \quad (1)$$

式中, SP 为剩余产量; r 为种群的内在增长率; K 为平衡状态时的未开发资源生物量(即环境容纳量); B 为资源量; m 为形状参数。

获得MSY时的生物量 B_{MSY} 和捕捞死亡率 F_{MSY} 分别为

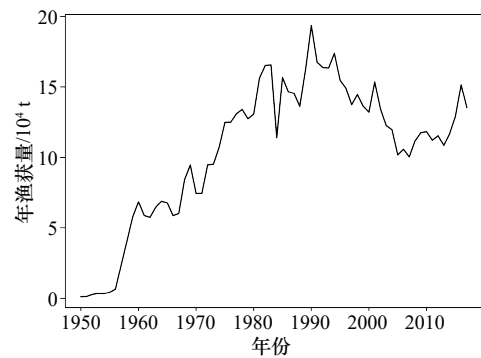


图1 大西洋黄鳍金枪鱼1950–2017年的年渔获量
Fig. 1 The annual catch of Atlantic yellowfin tuna from 1950 to 2017

表1 大西洋黄鳍金枪鱼各延绳钓船队标准化CPUE数据
Table 1 Standardized CPUE for each longline fleet of Atlantic yellowfin tuna

船队	缩写	时间跨度
日本	JAP	1971–2014年
乌拉圭1	URU1	1982–1991年
乌拉圭2	URU2	1992–2010年
巴西	BR	1978–2012年
委内瑞拉	VEN	1991–2014年
美国	US	1987–2014年
中国台北1	TAI1	1970–1992年
中国台北2	TAI2	1993–2014年

$$B_{MSY} = Km^{\frac{1}{m-1}}, \quad (2)$$

$$F_{MSY} = \frac{r}{m}. \quad (3)$$

捕捞死亡率 F 定义为

$$F = \frac{C}{B}. \quad (4)$$

MSY定义为

$$MSY = F_{MSY} B_{MSY}. \quad (5)$$

$B/B_{MSY} < 1$ 表示当前种群已发生资源型过度捕捞, $F/F_{MSY} > 1$ 表示种群正遭受捕捞型过度捕捞。如果 $m=2$,则 SP 函数为Scheafer形式;如果 m 趋近于1,则为Fox形式。在JABBA中,采用默认设置值 $B_{MSY}/K=0.4$,由此得出 $m=1.2$ 。

过程方程定义如下:

$$P_y = \begin{cases} \varphi e^{ry}, & y = 1 \\ \left[P_{y-1} + \frac{r}{m-1} P_{y-1} (1 - P_{y-1}^{m-1}) - \frac{\sum_f C_{f,y-1}}{K} \right] e^{ry}, & y = 2, 3, 4, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

式中, y 为年份, P_y 为 y 年 B 与 K 的比值; η_y 为过程误差, 且 $\eta_y \sim N(0, \sigma_\eta^2)$, σ_η^2 为过程方差, 服从逆伽马分布 (inverse-gamma (4, 0.01)); $C_{f,y}$ 为 y 年船队 f 的渔获量。

JABBA 中观测方程定义如下:

$$I_{i,y} = q_i B_i e^{\varepsilon_{y,i}}, \quad y = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

式中, q_i 为丰度指数 i 的可捕性系数; $\varepsilon_{y,i}$ 为观测误差, 且 $\varepsilon_{y,i} \sim N(0, \sigma_{\varepsilon,y,i}^2)$ 。 $\sigma_{\varepsilon,y,i}^2$ 为观测方差, 包含固定项和预测项 ($\sigma_{\text{fix}}^2 + \sigma_{\text{est},i}^2$), 预测项 $\sigma_{\text{est},i}^2$ 服从无信息的逆伽马分布 (inverse-gamma(0.001, 0.001))。

本研究中各参数的先验分布设置如下: $B_{\text{MSY}}/K=0.4$; $\sigma_{\text{fix}}=0.2$; 初始资源消耗率 B_{1950}/K 服从对数正态分布, 其中值和变异系数分别为 1.0 和 0.1; r 和 K 的先验信息参考 Matsumoto 等^[1] 的研究结果: 假设 r 服从 0.14~0.34 的均匀分布, K 服从 $139.2 \times 10^4 \sim 265.8 \times 10^4$ 的均匀分布; 可捕性系数 q 为无信息均匀分布。

因 Schaefer 的对称形式不符合黄鳍金枪鱼种群动态变化情况^[17], 本文只考虑选择 Fox 和 Pella-Tomlinson 函数。根据不同的 CPUE 数据和剩余产量函数, 预实验共设置了 S1-S8 共 8 种方案进行分析 (表 2)。当均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 或偏差信息准则 (Deviation Information Criteria, DIC) 较小时, 说明模型拟合效果较好^[18]。

当选择所有 CPUE 数据并使用 Pella-Tomlinson 函数时, 得到 S1; 在 S1 预实验基础上, 去掉拟合效果差的 CPUE 数据得到了 S2; 在 S2 基础上, 考虑到 ICCAT 在 CPUE 数据方面的建议^[12]——因 CPUE 标准化当中未考虑目标鱼种的变化, 认为日本延绳钓标准化 CPUE 数据应该从 1976 年开始, 舍弃之前的数据得到 S3;

表 2 大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 模型 S1-S8 方案设置
Table 2 Different scenarios (S1-S8) of Atlantic yellowfin tuna in JABBA

方案	产量函数	CPUE数据
S1	Pella-Tomlinson	JAP, URU1, URU2, BR, VEN, US, TAI1, TAI2
S2	Pella-Tomlinson	JAP, VEN, US, TAI1
S3	Pella-Tomlinson	JAP_RE, VEN, US, TAI1
S4	Fox	JAP_RE, VEN, US, TAI1
S5	Fox	VEN, US, TAI1
S6	Fox	JAP_RE, US, TAI1
S7	Fox	JAP_RE, VEN, TAI1
S8	Fox	JAP_RE, VEN, US

注: JAP_RE代表JAP去掉1976年之前的数据, 即1976-2014年的数据。

S3 的 CPUE 数据不变, 剩余产量函数选择 Fox 得到 S4; 在 S4 基础上, 考虑对 CPUE 数据的敏感性, 依次去掉 1 条 CPUE 数据后得到 S5-S8 共 4 种方案。

2.3 回溯性分析

随着渔业数据逐年增加到资源评估中, 模型估算结果可能因为出现系统性偏差而导致持续高估或低估的问题称为回溯性问题 (Retrospective Problem, RP)。RP 误差的强度主要由 Mohn^[19] 定义的 ρ 来衡量:

$$\rho = \sum_y \frac{X_{(y_1:y),y} - X_{(y_1:y_2),y}}{X_{(y_1:y),y}}, \quad (8)$$

式中, y_1 、 y_2 分别为整个数据的起始年和结束年, $y_1:y$ 表示利用 y_1 到 y 年的数据进行模型估计; X 为某一估计的模型参数 (如资源生物量或捕捞努力量等)。

如果 ρ 趋于 0, 则表明不存在 RP; ρ 大于 0, 则存在正 RP, 即同一年某参数短时间序列的估计值大于整个时间序列的估计值, 反之则为负 RP^[20]。

2.4 敏感性分析

本文通过敏感性分析, 研究了种群关键参数 K 和 r 的先验分布以及渔获量数据的误报比例对评估结果的影响, 进而探讨模型的稳健性。本文分别研究 K 和 r 无信息的先验分布和有信息的先验分布 (表 3)。20 世纪 90 年代中后期 ICCAT 数据收集上报过程才更加规范^[21-22], 这段时间前后数据的可信度存在差异。鉴于此, 本文假设 1950-1994 年间渔获量数据存在不同程度的误报问题, 即上报渔获量占实际渔获量的比例分别设为 70%、80%、90%、110%、120% 和 130% 共 6 种情况。

2.5 预测分析

ICCAT 在 2016 年大西洋黄鳍金枪鱼资源评估会议中, 预测分析显示, 渔获量低于 12×10^4 t 时能使种群到 2024 年一直保持健康状态, 所以将其总允许可捕量 (Total Allowable Catch, TAC) 设定为 11×10^4 t^[22]。因此本研究以 11×10^4 t 为基础, 设置 8.80×10^4 t (80%)、 9.35×10^4 t (85%)、 9.90×10^4 t (90%)、 10.45×10^4 t (95%)、 11.00×10^4 t (100%)、 12.10×10^4 t (110%) 和 13.20×10^4 t (120%) 共 7 个 TAC 指标, 假设 2018 年渔获量为 2015-2017 年的平均值, 并以 2019 年为起始年, 预测 2019-2027 年的种群动态变化, 并以生物量 $B > B_{\text{MSY}}$ 及种群处于健康状态等的概率评价 TAC 指标的管理效果。

3 结果

3.1 模型结果

各方案下得到了 JABBA 模型的 CPUE 指数趋势 (图 2) 和拟合优度 (表 4)。在 S1 方案下, URU1、

表 3 大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 模型中 K 和 r 有信息和无信息的先验分布设定以及后验分布Table 3 The informative and non-informative prior and posterior distributions for K and r in the JABBA for Atlantic yellowfin tuna

情况	先验分布		后验分布	
	$K/10^4$ t	r	$K/10^4$ t	r
S4(K 和 r 均为有信息先验)	$U[139.2, 265.8]$	$U[0.14, 0.34]$	177(140, 227)	0.211(0.162, 0.273)
K 为无信息先验, r 为有信息先验	$U[20, 3\ 000]$	$U[0.14, 0.34]$	161(114, 232)	0.231(0.159, 0.331)
K 为有信息先验, r 为无信息先验	$U[139.2, 265.8]$	$U[0.01, 2]$	180(136, 242)	0.207(0.144, 0.285)

注:后验分布中, K 和 r 的数值分别为其中值和95%置信区间。

URU2、BR 和 TAI2 的拟合效果非常差(图 2a),存在许多异常值且 RMSE 极高(表 4),而去除异常值后,拟合效果有较大改善, RMSE 大幅降低(图 2b)。S3 使用 JAP_RE 后,拟合效果略有改善, S4 改用 Fox 函数后 RMSE 基本不变但 DIC 降低。S5、S6、S8 下的拟合效果稍有提升, S7 则变差(表 4)。综上所述,且鉴于 S4 方案涵盖了更多船队的 CPUE 信息,本文将 S4 方案作为基础模型来提供资源评估结果。

基础模型所有参数后验分布均左右对称且在合理的范围内,说明模型收敛并得到了可靠的结果(图 3)。本文求得大西洋黄鳍金枪鱼的 MSY 为 13.7×10^4 t, B_{MSY} 为 65.2×10^4 t, B_{2017} 略高于 B_{MSY} , F_{2017} 略低于 F_{MSY} (表 5)。

3.2 资源状态

随着渔业开发程度的增加,种群由初始(1950 年)的健康状态逐渐进入资源捕捞过度的状态(1997 年前后),随后逐渐恢复,2017 年资源有 65% 的概率既没有处于资源型过度捕捞状态,也没有处于捕捞型过度捕捞状态,资源状态健康(图 4)。20 世纪 90 年代和 21 世纪初期,种群处于过度捕捞状态(相对捕捞死亡率 $F/F_{MSY} > 1$, 而相对生物量 $B/B_{MSY} < 1$ (图 5))。

以 2019 年为起始年,在 7 个不同的 TAC 目标下,预测分析显示,2019–2027 年资源量均保持增长的趋势(图 6)。当 TAC 为 8.8×10^4 t 时,生物量增长最快,随着 TAC 变大,资源量增长速度放缓。风险分析结果显示(表 6 至表 8),TAC 为 11×10^4 t 时,2024 年 $B > B_{MSY}$ 和资源健康的概率均为 84.6%, $F > F_{MSY}$ 的概率为 6.2%; 当 TAC 为 13.2×10^4 t 时,2024 年 $B > B_{MSY}$ 的概率降低到了 69.2%(表 6),但 $F > F_{MSY}$ 的概率明显增大(28.9%,表 7)。

敏感性分析结果表明,当 K 为无信息先验时, K 的估计值略有减小, r 估计值略有增大; 当 r 为无信息先验时, K 的估计值略有增大, r 的估计值略有减小(表 3)。 F_{2017} 随渔获量少报程度增大而减小, B_{2017} 则与之相反; F_{2017} 随多报程度增大而减小, B_{2017} 则与之

相反(表 9)。但不同误报率情况下, B_{2017}/B_{MSY} 都大于 1, F_{2017}/F_{MSY} 都小于 1, 且资源处于健康状态的概率变化较小。回溯性分析结果表明,当数据逐年减少至 2012 年, B/B_{MSY} 估计值略有减小, F/F_{MSY} 估计值略有增大,但差别极小(图 7)。计算得到 B/B_{MSY} 、 F/F_{MSY} 的 ρ 值分别为 -0.360 、 0.448 、 -0.183 、 0.296 。

4 讨论

本文通过贝叶斯状态空间的剩余产量模型,在 JABBA 中评估了 1950–2017 年大西洋黄鳍金枪鱼的资源状况。当前种群处于没有过度捕捞的健康状态,在 ICCAT 当前的 TAC 养护管理措施下,2024 年能够达成其保持种群健康状态的养护管理目标。研究结果表明,当使用美国、委内瑞拉、日本(去除 1976 年以前)、中国台北 1993–2014 年 4 个 CPUE 数据及 Fox 函数时, JABBA 模型的拟合效果最佳,评估结果对参数 K 、 r 的先验分布和 1950–1994 年间的渔获量误报不太敏感,且模型不存在明显的回溯性误差。

1994 年 ICCAT 成立工作组对大西洋黄鳍金枪鱼进行评估^[22],之后分别在 2000 年、2003 年、2008 年、2011 年和 2016 年都进行了资源评估。在 2016 年的资源评估中, ASPIC 模型评估认为 2014 年大西洋黄鳍金枪鱼处于资源型过度捕捞状态,但没有遭受捕捞型过度捕捞^[1]; SS3 和 VPA 模型认为其处于上述两种过度捕捞状态^[4, 12]; 而 ASPM 模型则表明其均不处于过度捕捞状态^[2]。综合上述模型, ICCAT 认为种群处于资源型过度捕捞而未遭受捕捞型过度捕捞的状态^[12]。本研究与之产生差异的原因可能是由状态空间建模与上述几种模型的结构差异及使用的先验信息不同所导致的。本研究得到大西洋黄鳍金枪鱼的环境容纳量 K 为 178×10^4 t, 内禀增长率 r 为 0.210, 与同样基于剩余产量理论构建的 ASPIC 模型的结果相似^[1], 说明评估结果较为可信; 与 ASPIC 模型相比, 评估的种

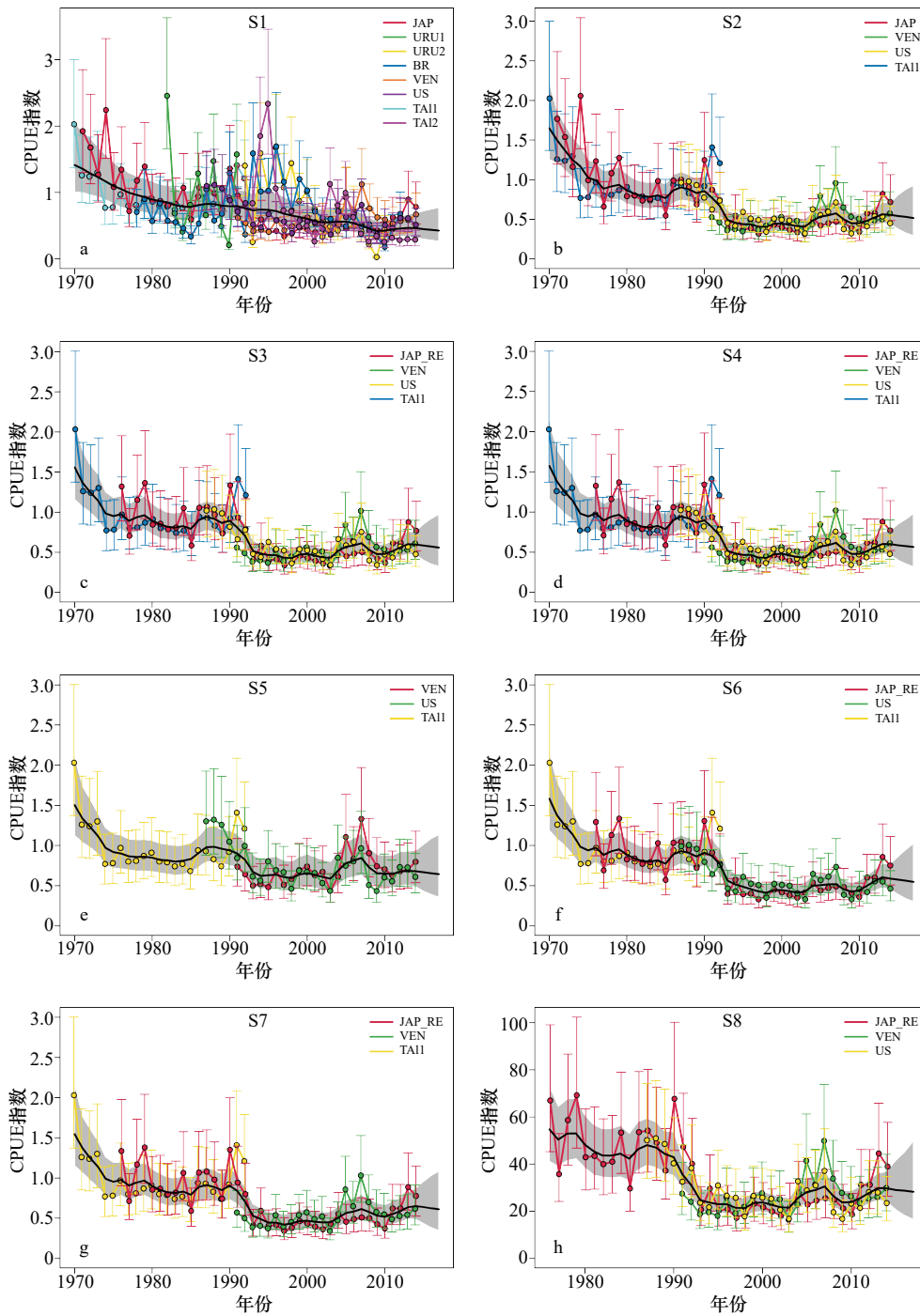


图2 大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 模型 S1-S8 方案的 CPUE 指数趋势

Fig. 2 Time-series of input CPUE of Atlantic yellowfin tuna and predicted CPUE of S1-S8 scenarios in JABBA

黑色实线为模型预测的 CPUE 结果, 阴影区域为其 95% 置信区间。彩色线段为各船队的 CPUE 数据

The solid black line represents the CPUE predicted by JABBA, and the shaded area is its 95% confidence interval. The colored lines are the CPUE data of each fleet

表4 大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 模型 S1-S8 方案的拟合效果

Table 4 Goodness of fitting of S1-S8 scenarios in JABBA for Atlantic yellowfin tuna

拟合指标	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
RMSE	49.8	23.7	23.1	23.0	22.9	22.2	24.8	22.4
DIC	885.7	397.2	346.1	345.3	68.4	254.5	43.2	330.5

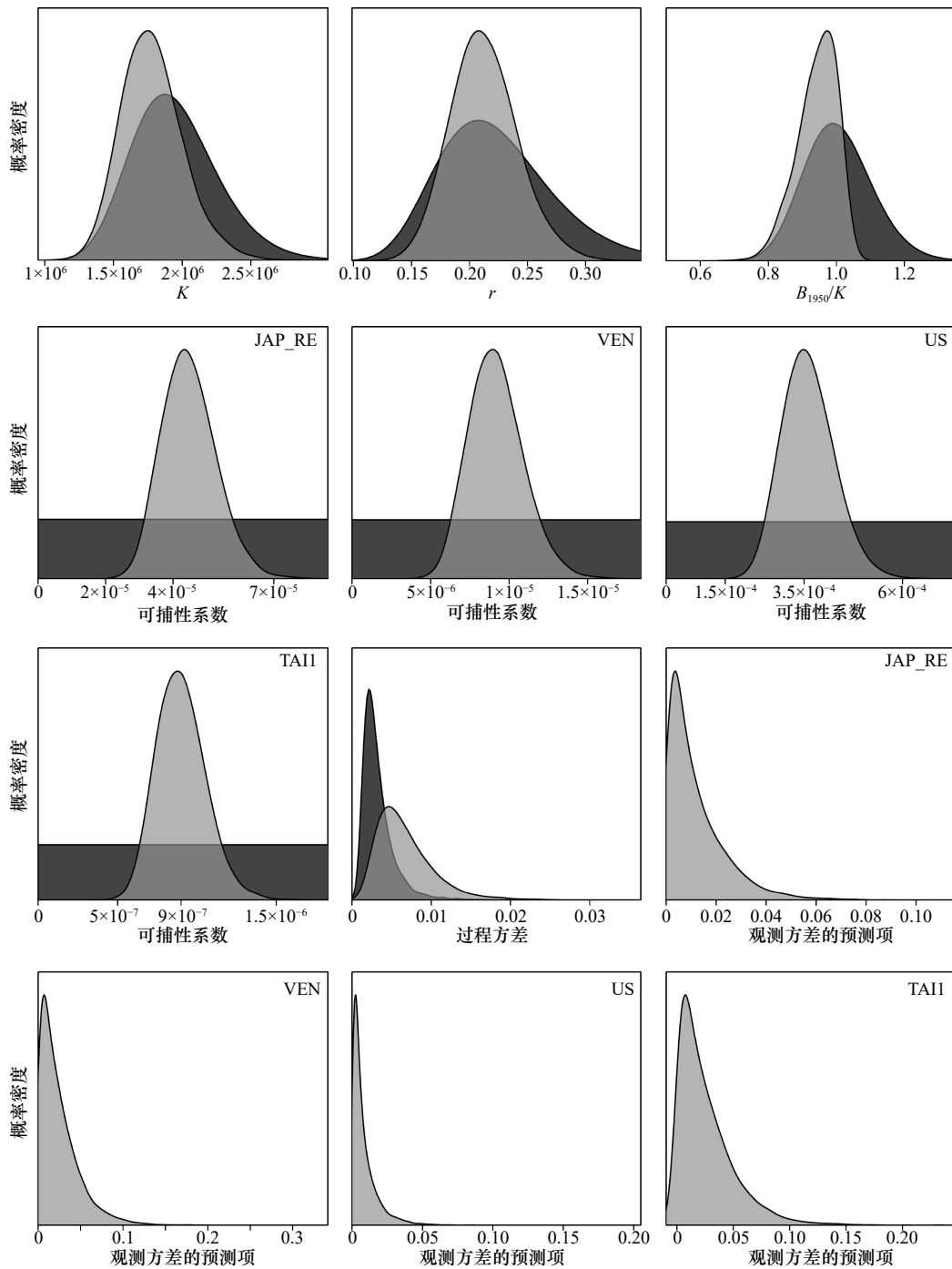


图3 大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 基础模型参数先验分布(深色)和后验分布(浅色)

Fig. 3 Priors (dark) and posteriors (light) of parameters of base case in JABBA for Atlantic yellowfin tuna

群状态脱离了资源型过度捕捞,这可能是因为近两年捕捞死亡率的下降,使黄鳍金枪鱼资源有机会得到部分恢复。

相对 ICCAT 当前的资源评估模型而言, JABBA 作为剩余产量模型的一种,其结果可靠性较高但无法充分利用鱼类的生物学数据,与 ICCAT 使用的其他剩余产量模型如 ASPIC 等相比, JABBA 可以估计过程误差,对形状参数的估计更自由,但 JABBA 的基本

假设为渔获量不存在误差,这一点有待改进。此外,在 v1.1 版本的 JABBA 中,在选择 Pella-Tomlinson 产量函数时,模型无法将 m 作为未知参数直接估算,必须通过假定 B_{MSY} 与 K 的关系得到,因此下一步我们将探寻 JABBA 的更高版本,以研究 m 的估算问题。JABBA 模型参数设定自由,拟合快速,当前已有其评估大西洋剑鱼(*Xiphias gladius*)^[23]、大西洋大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)^[24]、大西洋蓝枪鱼(*Makaira nigric-*

表 5 大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 基础模型参数后验估计值及其 95% 置信区间

Table 5 Posterior estimates and 95% confidence intervals of parameter of base case in JABBA for Atlantic yellowfin tuna

参数	中值	2.5%	97.5%
$K/10^4$ t	178	140	229
r	0.210	0.159	0.274
B_{1950}/K	0.949	0.809	1.035
F_{MSY}	0.210	0.159	0.274
$B_{MSY}/10^4$ t	65.4	51.3	84.3
$MSY/10^4$ t	13.7	12.0	16.0
B_{2017}/B_{MSY}	1.109	0.723	1.624
F_{2017}/F_{MSY}	0.893	0.565	1.432

ans)^[25] 等的研究, 相信其在 RFMOs 的资源评估中将发挥越来越重要的作用。

近年来大西洋黄鳍金枪鱼的渔获量为 13×10^4 t 左右, 预测分析结果表明, 当前 TAC (11×10^4 t) 管理措施对其种群的养护是有效的, 可以实现 ICCAT 的管理目标, 而在当前的渔获量水平下, 种群生物量仍能保持一定的速度增长。近年来, 我国的渔获量仅为 0.05×10^4 t 左右^[26], 占总渔获量比例较小, 且都来自于延绳钓渔业的兼捕渔获, 因此我国的大西洋黄鳍金枪鱼渔业仍有一定的开发空间。

大西洋黄鳍金枪鱼渔业主要有围网、延绳钓和饵钓 3 种, 其中围网渔业占总渔获量的 70% 左右, 且围网渔业主要在东部大西洋作业^[26]。而黄鳍金枪鱼的生长分为两个阶段^[27-28], 幼鱼阶段生长较为缓慢, 成

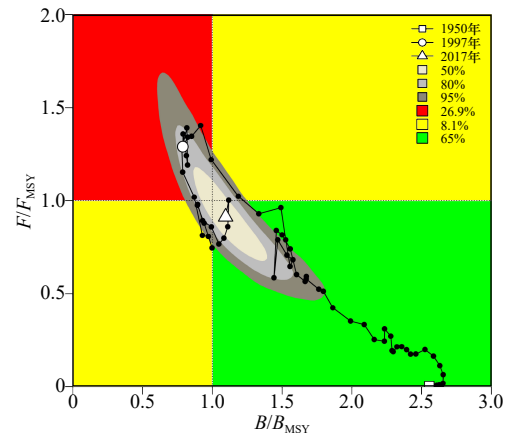


图 4 1950-2017 年大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 模型基础模型资源开发状态变化图

Fig. 4 Kobe phase plot showing estimated trajectories (1950-2017) of B/B_{MSY} and F/F_{MSY} of Atlantic yellowfin tuna of base case in JABBA

黑色点线展示了 B/B_{MSY} 和 F/F_{MSY} 在 1950-2017 年的变化, 3 个深浅不同的灰色区域分别代表 2017 年资源状态的置信区间, 2017 年资源状态落在红色、黄色和绿色象限的概率分别为 26.9%、8.1% 和 65%

The black dotted line shows the interannual variation of B/B_{MSY} and F/F_{MSY} between 1950 and 2017, three different shades of gray area represent the confidence intervals of the stock status in 2017. The probabilities of the stock falling in the red, yellow and green quadrants are 26.9%, 8.1% and 65%, respectively, in 2017

鱼阶段生长快速, 且黄鳍金枪鱼幼鱼主要在大西洋东部完成早期生活史^[29]。当前围网渔业渔获量上升^[26], 造成的黄鳍金枪鱼幼鱼死亡率偏高^[12], 可能导致补充量不足, 种群内禀增长率降低, 致使剩余产量减少, 可以考虑适当限制围网渔业的捕捞投入, 以更好地养护大西洋黄鳍金枪鱼资源。

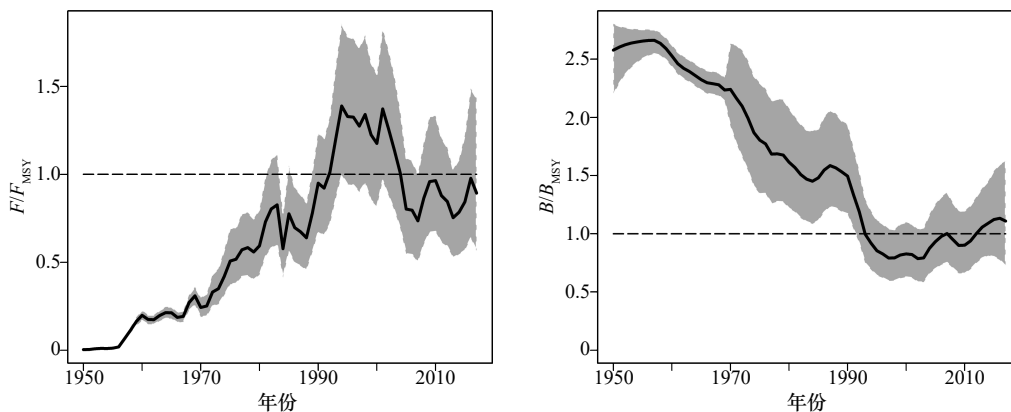


图 5 大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 基础模型 1950-2017 年 F/F_{MSY} 和 B/B_{MSY} 趋势

Fig. 5 F/F_{MSY} and B/B_{MSY} of Atlantic yellowfin tuna from 1950 to 2017 of base case in JABBA

阴影区域为 95% 置信区间

The shaded area is its 95% confidence interval

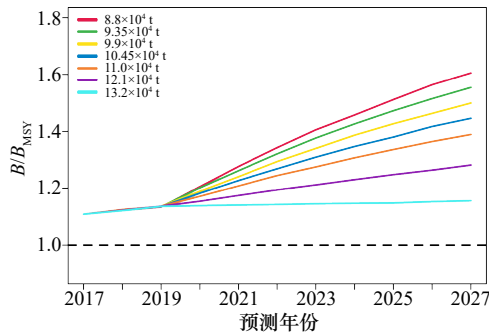


图6 不同TAC目标下的大西洋黄鳍金枪鱼

JABBA模型基础模型 B/B_{MSY} 预测(2019–2027年)

Fig. 6 Future projection (2019–2027) of B/B_{MSY} of Atlantic yellowfin tuna of base case in JABBA under different TACs

剩余产量模型将种群所有个体生命史的动态变化过程进行了高度综合,模型具有参数少、所需数据相对简单的特点,而形状参数较难准确估计且容易导致资源评估的失败^[30],因此在模型拟合结果相差不大时,本研究最终选择了较简单的Fox而放弃形状参数不易估计的Pella-Tomlinson产量函数形式。贝叶斯方法把经验判断、前人的研究结果与现有数据相结

合^[8,31],后验概率分布由先验概率分布和模型数据共同决定,但如果所用的数据不包含足够的信息,那么后验概率分布可能完全由先验概率主导和控制^[32]。因此在使用贝叶斯资源评估方法时,对后验概率分布与先验概率分布进行比较分析显得尤为重要^[33–34]。本研究中的敏感性分析显示, K 、 r 的后验分布对先验分布是否有信息并不敏感,说明数据为模型的贝叶斯方法提供了足够的信息。

回溯性误差在渔业资源评估中比较普遍,误差过大可能导致渔业管理的失败^[35]。对基础模型的回溯性分析中,对生物量的估计过低而对捕捞死亡率估计过高,这可能是由近年来黄鳍金枪鱼渔获量下降导致。4个参数的 ρ 值均趋近于0,结合图形绘制结果可以表明不存在明显的回溯性误差,这可能是由于状态空间建模不仅给出了传统模型的点估计值,同时能量化观测误差和过程误差的不确定性,从而避免了一定的回溯性问题^[20,36]。

本研究表明,早期渔获量数据误报率会对资源量和捕捞死亡率的结果产生一定影响,而种群状态并没

表6 不同TAC目标下大西洋黄鳍金枪鱼2019–2027年 $B > B_{MSY}$ 的概率

Table 6 The probability that $B > B_{MSY}$ of Atlantic yellowfin tuna under different TAC targets in 2019–2027

TAC/ 10^4 t	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
8.8	0.712	0.793	0.852	0.892	0.921	0.941	0.956	0.966	0.974
9.35	0.717	0.784	0.836	0.873	0.901	0.924	0.940	0.950	0.957
9.9	0.718	0.778	0.824	0.856	0.882	0.904	0.922	0.934	0.944
10.45	0.720	0.766	0.806	0.835	0.857	0.880	0.894	0.908	0.919
11.0	0.714	0.751	0.785	0.808	0.831	0.846	0.864	0.876	0.887
12.1	0.715	0.733	0.749	0.762	0.772	0.783	0.790	0.798	0.806
13.2	0.718	0.711	0.705	0.701	0.695	0.692	0.686	0.685	0.680

表7 不同TAC目标下大西洋黄鳍金枪鱼2019–2027年 $F > F_{MSY}$ 的概率

Table 7 The probability that $F > F_{MSY}$ of Atlantic yellowfin tuna under different TAC targets in 2019–2027

TAC/ 10^4 t	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
8.8	0.022	0.016	0.012	0.01	0.008	0.006	0.005	0.004	0.004
9.35	0.035	0.028	0.022	0.017	0.015	0.013	0.011	0.011	0.008
9.9	0.050	0.042	0.034	0.028	0.023	0.02	0.018	0.016	0.016
10.45	0.071	0.062	0.053	0.048	0.041	0.036	0.033	0.030	0.027
11.0	0.101	0.091	0.083	0.074	0.068	0.062	0.058	0.053	0.051
12.1	0.166	0.163	0.159	0.151	0.150	0.144	0.145	0.140	0.139
13.2	0.258	0.266	0.276	0.279	0.286	0.289	0.294	0.298	0.303

表 8 不同 TAC 目标下大西洋黄鳍金枪鱼 2019–2027 年处于健康状态的概率

Table 8 The probability that the Atlantic yellowfin tuna is in healthy status under different TAC targets in 2019–2027

TAC/10 ⁴ t	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
8.8	0.712	0.793	0.852	0.892	0.921	0.941	0.956	0.966	0.974
9.35	0.717	0.784	0.836	0.873	0.901	0.924	0.940	0.950	0.957
9.9	0.718	0.778	0.824	0.856	0.882	0.904	0.922	0.934	0.944
10.45	0.720	0.766	0.806	0.835	0.857	0.880	0.894	0.908	0.919
11.0	0.714	0.751	0.785	0.808	0.831	0.846	0.863	0.876	0.887
12.1	0.715	0.732	0.747	0.761	0.772	0.782	0.789	0.797	0.805
13.2	0.700	0.693	0.687	0.684	0.678	0.677	0.672	0.671	0.668

表 9 不同渔获量误报比例下大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 基础模型评估资源状态

Table 9 Stock status of Atlantic yellowfin tuna in different mis-reported rates of catches of base case in JABBA

报告渔获量占实际渔获量的比例/%	$B_{2017}/10^4$ t	B_{2017}/B_{MSY}	F_{2017}	F_{2017}/F_{MSY}	资源健康/%
70	77.7	1.227	0.175	0.854	70.1
80	73.9	1.165	0.185	0.896	65.6
90	70.9	1.119	0.191	0.914	63.1
100	72.5	1.109	0.187	0.893	65.0
110	72.7	1.081	0.186	0.886	64.3
120	77.4	1.094	0.175	0.845	67.1
130	80.4	1.078	0.169	0.824	64.5

注: 资源健康(%)指2017年资源未遭受资源型过度捕捞和捕捞型过度捕捞的概率。

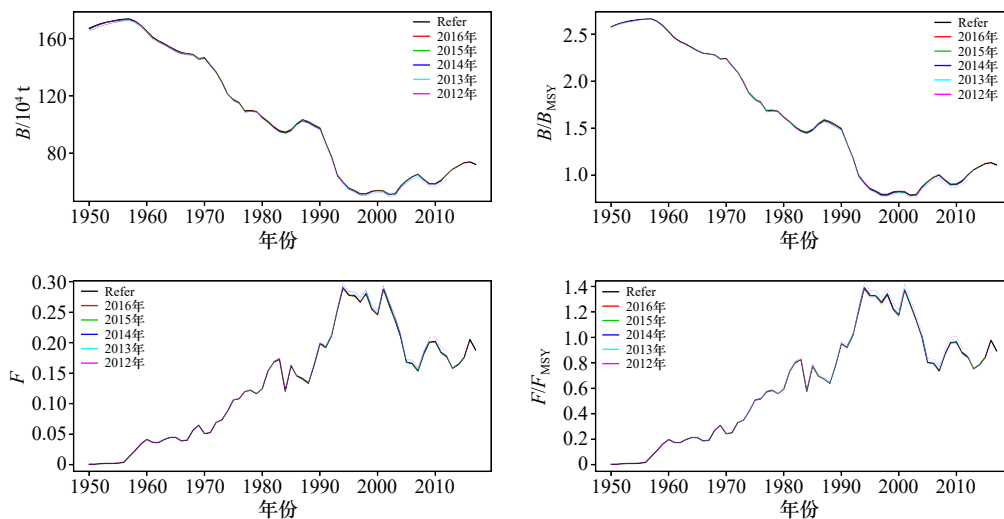


图 7 大西洋黄鳍金枪鱼 JABBA 基础模型 B 、 B/B_{MSY} 、 F 、 F/F_{MSY} 的回顾性分析

Fig. 7 Retrospective analysis of B , B/B_{MSY} , F , F/F_{MSY} of base case in JABBA of Atlantic yellowfin tuna

Refer 和 2016–2012 年表示输入数据序列的末年分别为 2017 年和 2016–2012 年

Refer and 2016–2012 indicate that the last year of input data are 2017 and 2016–2012

有明显改变, 不会影响对种群健康状态的判断。一般来说渔获量数据以少报居多, 本研究表明此时资源评

估的结果将更加乐观。但本研究未考虑其他时间段内渔获量数据失真问题, 而近期渔获量数据对当前资

源状态的判断有更大影响,此外,下一步的研究还应考虑近期数据的随机误差等情况^[37]。

致谢: 感谢渔业资源和生态系统量化评估与管理研究室赵蓬蓬等师兄在论文修改方面的帮助。

参考文献:

- [1] Matsumoto T, Satoh K. Stock assessment for Atlantic yellowfin tuna using a non-equilibrium production model[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2017, 73(2): 451–474.
- [2] Satoh K, Yokoi H, Nishida T, et al. Stock assessment for Atlantic yellowfin tuna using age structured production model[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2017, 73(2): 577–631.
- [3] Tropical Species Group. Alternative virtual population analyses of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), 1970–2010[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2012, 68(3): 1044–1059.
- [4] Walter J, Sharma R. Atlantic ocean yellowfin tuna stock assessment 1950–2014 using stock synthesis[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2017, 73(2): 510–576.
- [5] 官文江, 田思泉, 朱江峰, 等. 渔业资源评估模型的研究现状与展望[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1112–1120.
Guan Wenjiang, Tian Siqun, Zhu Jiangfeng, et al. A review of fisheries stock assessment models[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(5): 1112–1120.
- [6] Winker H, Carvalho F, Kapur M. JABBA: Just another bayesian biomass assessment[J]. *Fisheries Research*, 2018, 204: 275–288.
- [7] Mcallister M, Pikitch E K, Babcock E A. Using demographic methods to construct Bayesian priors for the intrinsic rate of increase in the Schaefer model and implications for stock rebuilding[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(9): 1871–1890.
- [8] Punt A E, Hilborn R. Fisheries stock assessment and decision analysis: The Bayesian approach[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1997, 7(1): 35–63.
- [9] Meyer R, Millar R B. BUGS in Bayesian stock assessments[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, 56(6): 1078–1087.
- [10] Buckland S T, Newman K B, Thomas L, et al. State-space models for the dynamics of wild animal populations[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 171(1/2): 157–175.
- [11] De Bruyn P, Murua H, Aranda M. The Precautionary approach to fisheries management: How this is taken into account by tuna regional fisheries management organisations (RFMOs)[J]. *Marine Policy*, 2013, 38: 397–406.
- [12] International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT). Report of the 2016 ICCAT yellowfin tuna stock assessment meeting[R]. San Sebastian, Spain: ICCAT, 2016.
- [13] Satoh K, Matsumoto T. Japanese longline CPUE for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Atlantic Ocean standardized using GLM up to 2014[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2017, 73(1): 270–289.
- [14] Huang J H W. Standardized catch rate index for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) from the Taiwanese longline fishery in the Atlantic Ocean, 1970–2014[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2017, 73(1): 404–422.
- [15] Satoh K, Matsumoto T. Exploration of historical changes of target species for Japanese longline in the Atlantic Ocean and application to standardization of CPUE of yellowfin[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2017, 73(1): 290–317.
- [16] Walter J. Standardized catch rate in number and weight of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) from the United States pelagic longline fishery 1987–2015[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2017, 73(1): 323–368.
- [17] Indian Ocean Tuna Commission (IOTC). Report of the fifth session of the IOTC working party on temperate tunas. (IOTC-2014-WPT-mT05-R[E])[R]. Busan: 5th Working Party on Temperate Tunas, Indian Ocean Tuna Commission, 2014.
- [18] Chen Jiahua, Chen Zehua. Extended Bayesian information criteria for model selection with large model spaces[J]. *Biometrika*, 2008, 95(3): 759–771.
- [19] Mohn R. The retrospective problem in sequential population analysis: An investigation using cod fishery and simulated data[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1999, 56(4): 473–488.
- [20] 官文江, 高峰, 雷林, 等. 渔业资源评估中的回顾性问题[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(5): 841–847.
Guan Wenjiang, Gao Feng, Lei Lin, et al. Retrospective problem in fishery stock assessment[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(5): 841–847.
- [21] 吕翔. 大西洋金枪鱼资源开发与保护现状分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016
Lü Xiang. Analysis of status with utilization and conservation of the tuna resources in the Atlantic Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [22] International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT). Report of the working group to evaluate Atlantic yellowfin tuna[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 1994, 42(2): 1–116.
- [23] International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT). Report of the 2017 ICCAT Atlantic swordfish stock assessment session[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2017, 74: 841–967.
- [24] Winker H, Kerwath S, Merino G, et al. Bayesian state-space surplus production model JABBA assessment of Atlantic bigeye tuna (*Thunnus obesus*) stock[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2019, 75(7): 2129–2168.
- [25] Mourato B L, Winker H, Carvalho F, et al. Stock assessment of Atlantic blue marlin (*Makaira nigricans*) using a Bayesian state-space surplus production model JABBA[J]. ICCAT's Collective Volume of Scientific Papers, 2018, 75(5): 1003–1025.
- [26] International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT). Report of the Standing Committee on Research and Statistics (SCRS)[R]. Madrid, Spain: International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, 2018.

- [27] Dortel E, Sardenne F, Bousquet N, et al. An integrated Bayesian modeling approach for the growth of Indian Ocean yellowfin tuna[J]. *Fisheries Research*, 2014, 163: 69–84.
- [28] Eveson J P, Million J, Sardenne F, et al. Estimating growth of tropical tunas in the Indian Ocean using tag-recapture data and otolith-based age estimates[J]. *Fisheries Research*, 2015, 163: 58–68.
- [29] Zagaglia C R, Lorenzetti J A, Stech J L. Remote sensing data and longline catches of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 267–281.
- [30] 官文江, 吴佳文. 剩余产量模型形状参数对印度洋黄鳍金枪鱼资源评估的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(2): 298–304.
Guan Wenjiang, Wu Jiawen. Impacts of shape parameter of surplus production model on stock assessment of Indian Ocean yellowfin tuna[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(2): 298–304.
- [31] Punt A E, Hilborn R. BAYES-SA-Bayesian stock assessment methods in fisheries. User's manual[M]. Rome: FAO, 2001.
- [32] Chen Y, Breen P A, Andrew N L. Impacts of outliers and mis-specification of priors on Bayesian fisheries-stock assessment[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(11): 2293–2305.
- [33] 李纲, 陈新军, 官文江. 基于贝叶斯方法的东、黄海鲈资源评估及管理策略风险分析[J]. *水产学报*, 2010, 34(5): 740–750.
Li Gang, Chen Xinjun, Guan Wenjiang. Stock assessment and risk analysis of management strategies for *Scomber japonicus* in the East China Sea and Yellow Sea using a Bayesian approach[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(5): 740–750.
- [34] Mcallister M K, Kirkwood G P. Bayesian stock assessment: a review and example application using the logistic model[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1998, 55(6): 1031–1060.
- [35] Myers R A, Hutchings J A, Barrowman N J. Why do fish stocks collapse? The example of cod in Atlantic Canada[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(1): 91–106.
- [36] 张魁, 陈作志. 应用贝叶斯状态空间建模对东海带鱼的资源评估[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(5): 1015–1026.
Zhang Kui, Chen Zuozhi. Using Bayesian state-space modelling to assess *Trichiurus japonicus* stock in the East China Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(5): 1015–1026.
- [37] 张魁, 刘群, 廖宝超, 等. 渔业数据失真对两种非平衡剩余产量模型评估结果的影响比较[J]. *水产学报*, 2018, 42(9): 1378–1389.
Zhang Kui, Liu Qun, Liao Baochao, et al. Comparative effects of distorted fishery data on assessment results of two non-equilibrium surplus production models[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(9): 1378–1389.

Stock assessment for Atlantic yellowfin tuna based on Bayesian state-space production model

Tian Zhipan¹, Tian Siquan^{1,2,3}, Dai Libin¹, Ma Qiuyun^{1,2,3}

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

Abstract: Yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) is an important fishing target for offshore fisheries worldwide. Stock assessment is essential for its fishery management of sustainable exploitation. According to catch and catch per unit effort (CPUE) data from the International Commission for Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT), the Bayesian state space model was conducted to make stock assessment in an open environment (Just Another Bayesian Biomass Assessment) and to compare the effects of different surplus production forms and CPUE data on the assessment. The results showed that the model performed best with the Fox surplus production form and CPUE data of four fleets (United States, Venezuela, Japan and Chinese Taipei). The median and 95% confidence intervals for carrying capacity, intrinsic growth rate were $178 (140, 229) \times 10^4$ t and 0.210 (0.159, 0.274), respectively. The current stock was not overfished ($B/B_{MSY}=1.109$) and was not subject to overfishing ($F/F_{MSY}=0.893$). Sensitivity analysis revealed that when the rates of reported catch divided by the actual catch were 70%, 80%, 90%, 110%, 120%, and 130%, the current biomass assessment results were higher with lower fishing rate, but the stock was still in a healthy status. When the total allowable catch (TAC) was set at 11×10^4 t, the stock would remain basically healthy until 2024. The results from this stock assessment is generally consistent with ICCAT's current stock assessment results, so it is recommended to set a TAC of 11×10^4 t to keep the stock status healthy and sustainable exploitation of this important fishery.

Key words: Atlantic Ocean; yellowfin tuna; stock assessment; surplus production model; sensitivity analysis