

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19338

应用贝叶斯状态空间剩余产量模型框架评估印度洋大眼金枪鱼的资源状况

赵蓬蓬¹, 田思泉^{1, 2, 3}, 麻秋云^{1, 2, 3}, 戴黎斌¹

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: 根据 1950—2016 年的渔获量数据及 1955—2016 年的单位捕捞努力量(Catch Per Unit Effort, CPUE)数据, 采用贝叶斯状态空间剩余产量模型框架 JABBA(Just Another Bayesian Biomass Assessment)对印度洋大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)的资源状况进行评估, 分析了渔船效应、CPUE 数据尺度对评估结果的影响。结果表明, 模型拟合效果对于不同时间跨度下 CPUE 数据的选择比较敏感。当选用时间跨度为 1979—2016 年的 CPUE 数据且考虑渔船效应时, 模型拟合效果最好。2016 年大眼金枪鱼的资源量为 812 kt, 最大可持续产量(Maximum Sustainable Yield, MSY)为 163 kt, 远高于同年渔获量 86.81 kt, 其资源量具有 82.50% 的概率处于“健康”状态。当总允许可捕量为 69.45~104.17 kt 时(2016 年渔获量的 80%~120%), 未来 10 年大眼金枪鱼的资源量仍高于 B_{MSY} (达到 MSY 所需的生物量)。回顾性分析结果表明, 该资源评估结果存在一定程度的回顾性问题, 捕捞死亡率和资源量分别存在被低估和高估的现象。将来需要在模型结构设定、CPUE 数据选择及模型参数的先验分布设置等方面进一步优化。

关键词: 远洋渔业; 大眼金枪鱼; 资源评估; 剩余产量模型; 敏感性分析

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)05-0579-10

渔业资源评估是渔业管理的主要手段^[1-2], 在远洋渔业中, 大部分的渔业种类都被区域性渔业管理组织进行管理和协调, 有多种资源评估模型被应用在渔业资源评估过程中, 如 SS3 模型 (Stock Synthesis 3)、ASPM 模型 (Age Structured Assessment Program)、ASPIC 模型 (A Stock-Production Model Incorporating Covariates) 等^[3-5]。然而大部分模型对数据量、参数数量等的要求都较高^[6]。研究表明, 全世界 80% 以上的渔业资源均存在数据缺乏问题^[7-8], 对于数据要求较高的评估模型具有一定的约束力^[9-11]。因此对数据要求较低的剩余产量模型得到了较为广泛的应

用^[12-15]。然而, 由于忽视了渔业资源种群结构的生活史信息及环境影响等影响因素, 剩余产量模型难以真实反映资源状态的变动情况而受到质疑^[16-19]。基于贝叶斯的剩余产量模型框架 JABBA^[20] (Just Another Bayesian Biomass Assessment, JABBA) 在传统剩余产量模型的基础上, 引入了过程误差和观测误差, 提高了模型的精确程度。近年来, JABBA 已陆续应用在渔业资源的评估和管理中, 如北太平洋大青鲨 (*Prionace glauca*)、南大西洋剑鱼 (*Xiphia gladius*) 及地中海长鳍金枪鱼 (*Thunnus alalunga*) 等^[20] 种类的资源评估。目前, 在国内尚未见到相关报道。

收稿日期: 2019-11-26; 修订日期: 2019-12-21.

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: 赵蓬蓬(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源评估. E-mail: 849836141@qq.com

通信作者: 麻秋云(1987-), 女, 博士后, 研究方向为种群动力学和渔业资源评估. E-mail: qyma@shou.edu.cn

大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)是延绳钓渔业中最具经济价值的热带金枪鱼之一,其资源评估结果一直都是区域性金枪鱼渔业管理组织关注的热点。大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)为高度洄游性的金枪鱼种类,也是中国在印度洋延绳钓渔业中的重要目标鱼种之一^[21-22]。近年来,随着远洋渔船数量的增加和捕捞技术的提高,捕捞压力大幅增加,使得大眼金枪鱼资源量不断下降。为制定新一轮的管理措施,印度洋金枪鱼国际管理组织 IOTC (Indian Ocean Tuna Commission)建议采用多种模型对大眼金枪鱼的资源状态进行对比分析^[22]。积极参与评估模型和管理措施的选择研究,有利于维护中国在印度洋大眼金枪鱼渔业的国家利益。因此,本研究选取了 JABBA 模型对印度洋大眼金枪鱼资源状况进行评估,分析其评估结果的稳健性,以期对印度洋大眼金枪鱼资源的可持续利用与管理提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 数据获取

渔业数据来自 IOTC 网站,包括印度洋海域大眼金枪鱼渔获量数据和标准化单位捕捞努力量渔获量数据(CPUE, N/1000 hooks)。渔获量数据涵盖整个印度洋海域,时间跨度为 1950—2016 年;CPUE 采用 20°S~15°N, 35°E~130°E 区域的联合标准化 CPUE 数据,涵盖印度洋东西两个区域(图 1),时间跨度为 1955—2016 年。

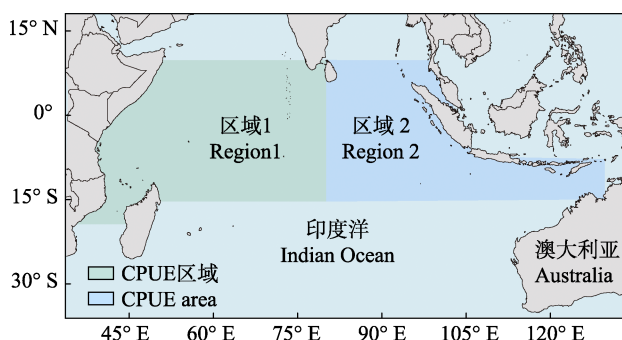


图 1 印度洋大眼金枪鱼的标准化 CPUE 区域

Fig. 1 Standardized CPUEs region of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

1.2 剩余产量模型

本研究采用 Pella-Tomlinson 形式的剩余产量

模型^[23],对印度洋大眼金枪鱼进行资源评估:

$$SP_{t+1} = \frac{r}{m-1} B_t \left[1 - \left(\frac{B_{t+1}}{K} \right)^{m-1} \right] \quad (1)$$

$$B_{t+1} = B_t + SP_{t+1} - C_t \quad (2)$$

式中, r 为种群内禀增长率; K 为环境容纳量; m 为形状参数; SP_{t+1} 为 $t+1$ 年的剩余产量; B_t 为 t 年的生物量。相关生物学参考点之间的关系如下:

$$B_{MSY} = K \left(\frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{m-1}} \quad (3)$$

$$F_{MSY} = \frac{r}{m} \quad (4)$$

$$MSY = Kmr^{\frac{m}{1-m}} \quad (5)$$

式中, B_{MSY} 为达到 MSY 水平所需要的生物量; F_{MSY} 为 MSY 状态下的捕捞死亡率。本研究中,设定 $B_{MSY}/K=0.4$, 即 $m=1.18$ 。通过绘制 Kobe 图,判断种群的资源状态。当 $F/F_{MSY}>1$, 表示该种群正在遭受过度捕捞, 而 $B/B_{MSY}<1$ 时, 表示种群已经捕捞过度^[24]。

剩余产量模型的求解在 JABBA 中实现, 通过贝叶斯状态空间的方法求解剩余产量模型。JABBA 中设定资源损耗量 $P_t = B_t/K$, 过程方程如下:

$$P_t = \begin{cases} P_1 e^{\eta_1} & \text{for } t=1 \\ \left[P_{t-1} + \frac{r}{m-1} P_{t-1} (1 - P_{t-1}^{m-1}) - \frac{C_{t-1}}{K} \right] e^{\eta_t} & \text{for } t=2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

式中, η_t 为过程误差, 服从正态分布, $\eta_t \sim N(0, \sigma_\eta^2)$, σ_η^2 服从逆伽马分布^[25], 即 $\text{inverse-}\gamma [4, 0.01]$; C_{t-1} 为 $t-1$ 年的渔获量, n 为总年份。

观测方程为:

$$I_{i,t} = q_i B_i e^{\varepsilon_{i,t}} \quad (7)$$

式中, $t=1, 2, 3, \dots, n$, n 为总年份; I 为种群丰度指数, 即标准化 CPUE; q 为可捕系数; $\varepsilon_{i,t}$ 为观测误差, 服从 $\varepsilon_{i,t} \sim N(0, \sigma_{\varepsilon,i}^2)$ 的正态分布, $\sigma_{\varepsilon,i}^2$ 由固定误差项 $\sigma_{\text{fix}}^2(0.09)$ 和估计误差项 $\sigma_{\text{est},i}^2$ 组成, $\sigma_{\text{est},i}^2$ 服从无信息的先验分布 $\text{inverse-}\gamma (0.001, 0.001)$ 。

本研究中 r 和 K 的先验信息参考 Gorka 等^[26]的研究结果, 假设 K 服从均值为 2100 kt, 变异系数为 0.15 的对数正态分布; r 服从均值和变异系数

分别为 0.30 与 0.09 的对数正态分布; 由于 1950 年大眼金枪鱼渔业开发程度极低, 其生物量较大, 与 K 较为相近, 因此 $\varphi(B_{1950}/K)$ 的先验分布呈均值为 0.80、变异系数为 0.12 的对数正态分布^[27]。设定可捕系数 q 服从无信息的均匀先验分布, $q \sim U[1 \times 10^{-20}, 100]$, 其中 q_1 和 q_2 分别为区域 R1 和 R2 的可捕系数。当 Welch-Heidelberger 统计量值小于 1 时, 则认为该模型收敛^[28], 即模型结果较可靠。

1.3 敏感性分析和回顾性分析

考虑到不同历史渔业数据收集阶段可能缺乏完善的管控措施^[29], 渔船效应对 CPUE 的量化方式也存在一定影响。本研究运用敏感性分析, 探讨不同时间跨度、标准化过程中是否考虑渔船效应的 CPUE 对于资源评估结果的影响(表 1)。

表 1 印度洋大眼金枪鱼资源评估中
不同模型策略的设定
Tab. 1 Different scenarios of the stock assessment for
Thunnus obesus in the Indian Ocean

模型策略 model scenario	时间跨度 time span	相对丰度指数 CPUE index
S1	1955–2016	R1_NoID_5516
		R2_NoID_5516
S2	1955–2016	R1_ID_5516
		R2_ID_5516
S3	1979–2016	R1_NoID_7916
		R2_NoID_7916
S4	1979–2016	R1_ID_7916
		R2_ID_7916

注: R1 表示印度洋西部海域; R2 表示印度洋东部海域; NoID 表示没有渔船影响; ID 表示有渔船影响; 5516 表示 1955—2016 年的时间跨度; 7916 表示 1979—2016 年的时间跨度。
Note: R1 denotes the western Indian Ocean; R2 denotes the eastern Indian Ocean; NoID denotes no vessel identification; ID denotes vessel identification; 5516 denotes the period from 1955 to 2016; 7916 denotes the period from 1979 to 2016.

采用 DIC 和均方根误差(root mean squared error, RMSE)比较不同模型的拟合效果, 即 DIC 和 RMSE 值越小, 模型拟合效果越好^[30]。

为评价该模型的预测效果, 本研究进行了回顾性分析^[1]。根据 Mohn^[31]提出的 ρ 值作为回顾性分析的度量指标, 其公式如下:

$$\rho = \sum_t \frac{[X_{(t_1:t),t} - X_{(t_1:t_2),t}]}{X_{(t_1:t),t}}$$

(8)

式中, t_1 和 t_2 分别为数据的初始和结束年份; $t_1:t$ 为模型利用 $[t_1, t]$ 区间进行参数估计的数据; X 为参数估计值。其中, 当 $\rho=0$ 时, 表明不存在回顾性问题, 即无系统性偏差估计; $\rho<0$ 时, 表明长时间跨度中的估计值高于短时间跨度估计值; $\rho>0$ 时, 则相反。

1.4 预测性分析

本研究中, 基于评估年份的末年渔获量值(即 2016 年的渔获量 86.81 kt), 设置不同水平的总可捕量值(total allowable catch, TAC), 即 69.45 kt (80%)、78.13 kt (90%)、86.81 kt (100%)、95.49 kt (110%)和 104.17 kt (120%), 用以预测 10 年内(即 2017—2026 年)大眼金枪鱼的资源动态变化。其中, 2017 年和 2018 年的渔获量数据为实际值(分别为 90.9 kt 和 93.5 kt), 选取 2014—2016 年数据的平均值(92.1 kt)作为 2019 年的渔获量。

所有资源评估模型求解通过 JABBA v1.1 beta^[20]进行, 使用相关 R 软件包进行数据分析和处理, 地图绘制在 ArcGIS10.3 中完成。

2 结果与分析

根据模型中 Welch-Heidelberger 统计量值均小于 1, 各参数后验分布左右对称, 模型具有较好的收敛效果(图 2)。对比模型结果发现, 使用不同时间跨度和渔船效应的数据结构, 直接影响 DIC 值和 RMSE 值的大小(表 2, 图 3)。而 R1_ID_7916 和 R2_ID_7916 数据的 S4 模型获得的 DIC 值和 RMSE 值均最小(图 4), 故本研究最终选择 S4 模型作为基础模型, 用于评估印度洋大眼金枪鱼的种群状态。

使用不同时间跨度和渔船效应的数据结构, 各模型参数的估计值和资源状态的结果存在一定差异。当使用时间跨度为 1955—2016 年的 CPUE 数据且不考虑渔船效应(S1)时, 求得 $F_{2016}/F_{MSY}>1$, $B_{2016}/B_{MSY}<1$; 而当使用时间跨度为 1979—2016 年的 CPUE 数据且考虑渔船效应(S4)时, 则求得 $F_{2016}/F_{MSY}<1$, $B_{2016}/B_{MSY}>1$ (表 3)。

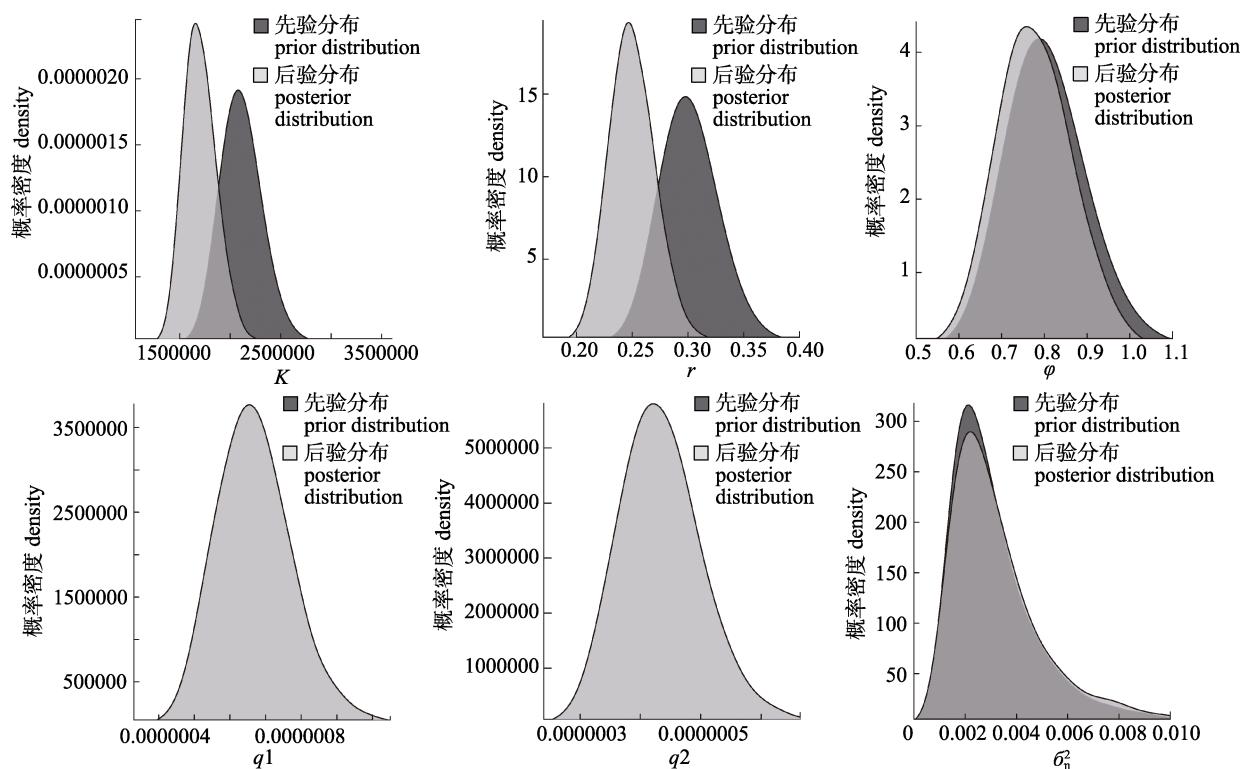


图 2 印度洋大眼金枪鱼中剩余产量模型参数的先验与后验分布(基础模型)

Fig. 2 Prior and posteriors distribution of parameters in the surplus production model for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean (base case)

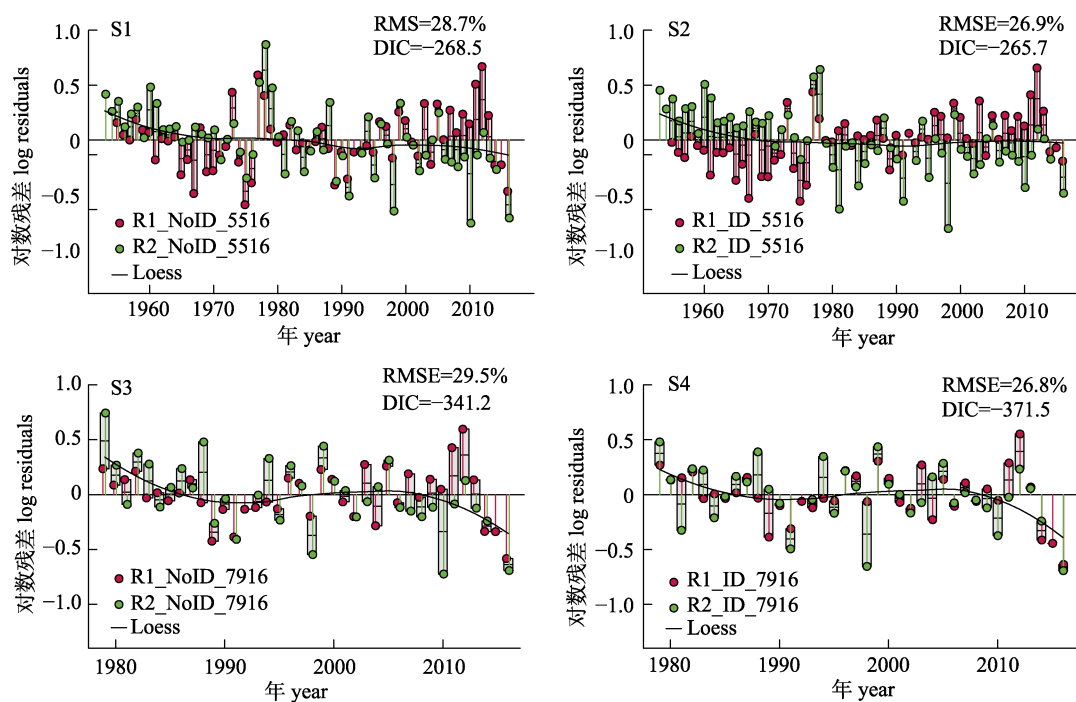


图 3 不同模型策略中印度洋大眼金枪鱼标准化 CPUE 残差诊断图

实线代表全部残差数据的拟合平滑曲线, 箱形图代表 CPUE 残差之间的相对大小。

Fig. 3 Residuals of standardized CPUEs of multiple model strategies for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean. The solid line means the loess smooth for all log-residuals CPUE series, and the boxplots illustrate the relative extend of conflicts among CPUE residuals.

表 2 印度洋大眼金枪鱼剩余产量模型拟合的统计量结果
Tab. 2 Result of surplus production model fit statistics for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

统计量 statistic	模型策略 1	模型策略 2	模型策略 3	模型策略 4
	model scenario 1	model scenario 2	model scenario 3	model scenario 4
	S1	S2	S3	S4
DIC	-268.50	-265.70	-341.20	-371.50
RMSE/%	28.70	26.90	29.50	26.80

1980 年之前, 不同模型策略中大眼金枪鱼的资源量变化趋势整体呈现较大差异, 之后均出现下降趋势; 而捕捞死亡率则相对一致, 之后均呈现整体下降状态, 2010 年左右出现最低值(图 4)。回顾性分析显示, 其捕捞死亡率(F)、资源量(B)、 F/F_{MSY} 和 B/B_{MSY} 的 Mohn ρ 值分别为-0.28、0.19、-0.33 和 0.20。从 2000 年以后开始, 4 个参数估计

值均存在一定程度的回顾性偏差(图 5): F 和 F/F_{MSY} 参数值被低估, 而 B 和 B/B_{MSY} 则存在被高估的可能性。

Kobe 图结果显示, 2016 年大眼金枪鱼有 82.50% 的概率落在绿色区域, 17.30% 的概率落在黄色区域(图 6), 表明大眼金枪鱼没有处于过度捕捞的状态。在不同 TAC 水平下, 2017—2026 年大眼金枪鱼的资源量都将呈不同程度的上升趋势。当 TAC 水平为 104.17 kt 时(即 2016 年渔获量的 120%), 2026 年的资源量值仍高于 B_{MSY} 值(图 7)。

3 讨论

剩余产量模型高度综合了渔业种群生活史的动态变化过程^[32-33], 相对于年龄或体长结构模型(如 SS3 等), 剩余产量模型对种群结构数据和参

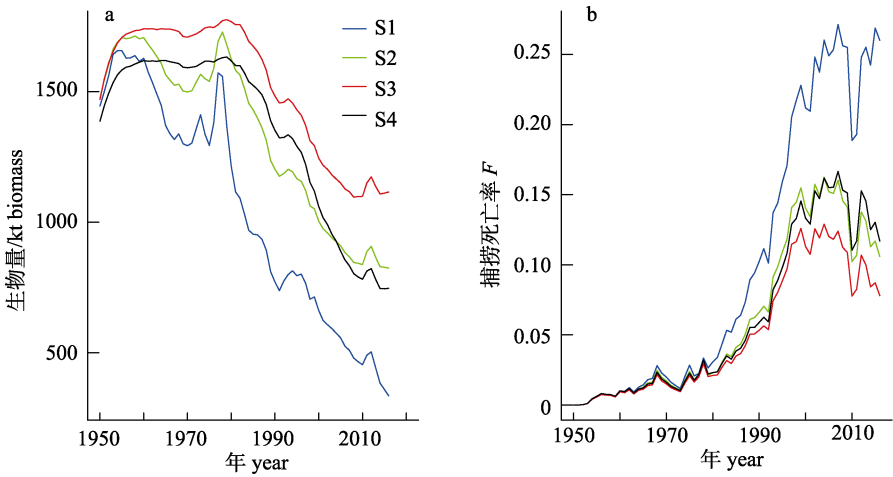


图 4 不同模型策略中印度洋大眼金枪鱼的资源量(a)和捕捞死亡率(b)的动态变化
Fig. 4 Dynamic variation of biomass (a) and fishing mortality (b) of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean in different model strategies

表 3 不同模型策略下印度洋大眼金枪鱼种群参数及参考点的估计值(95% CI)
Tab. 3 The parameter estimates and reference points from different model scenarios for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean (95% confidence interval)

估计值 estimate	模型策略 1	模型策略 2	模型策略 3	模型策略 4
	model scenario 1	model scenario 2	model scenario 3	model scenario 4
	S1	S2	S3	S4
K (10 kt)	1300(1050,1680)	1470(1190,1960)	1760(1300,2410)	1480(1110,2120)
r	0.29(0.23,0.36)	0.34(0.27,0.44)	0.41(0.31,0.56)	0.33(0.26,0.44)
F_{MSY}	0.25(0.20,0.30)	0.29(0.23,0.37)	0.35(0.26,0.47)	0.28(0.22,0.37)
B_{MSY} (10 kt)	518(419,670)	587(459,783)	703(522,962)	591(445,847)
MSY (10 kt)	126(108,162)	167(130,237)	242(163,384)	163(118,278)
B_{2016}/B_{MSY}	0.65(0.41,0.97)	1.37(0.96,1.79)	1.82(1.36,2.21)	1.23(0.79,1.74)
F_{2016}/F_{MSY}	1.05(0.67,1.70)	0.38(0.23,0.61)	0.20(0.11,0.36)	0.43(0.20,0.85)

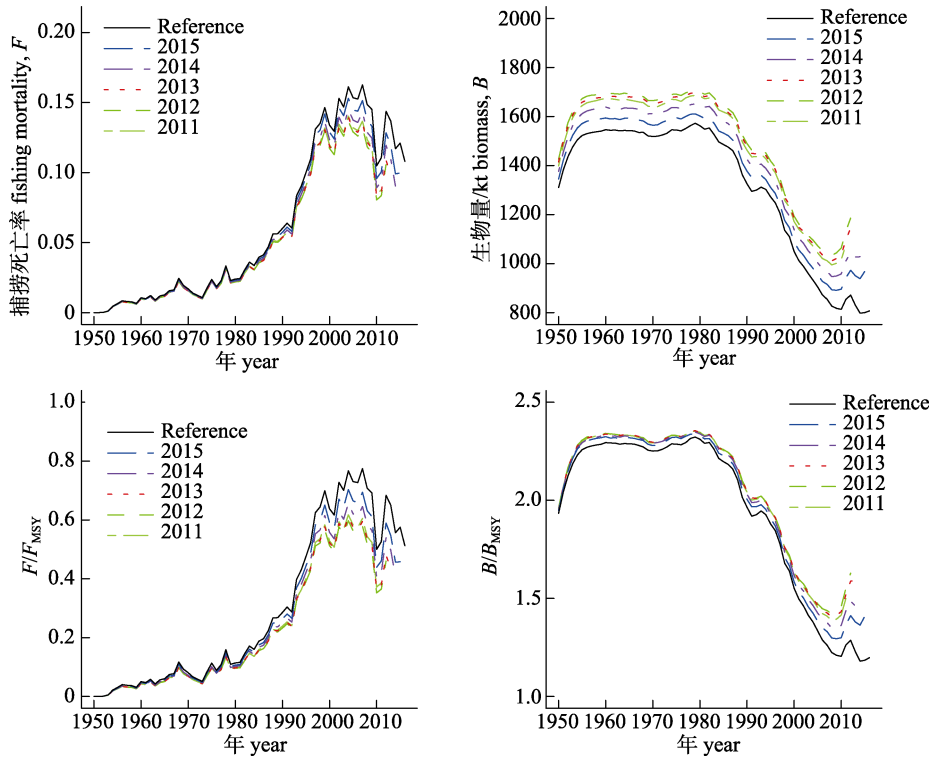


图 5 印度洋大眼金枪鱼的多个参数估计值的回顾性问题(基础模型)

图例中 Reference 代表模型拟合的数据时间跨度(1950—2016), 年份代表模型拟合的末年.

Fig. 5 The retrospective problem of multiple parameter values for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean (base case)
The label “Reference” indicates the model fitted to the entire data time series (1950–2016).
Years represent final years of the model fitting.

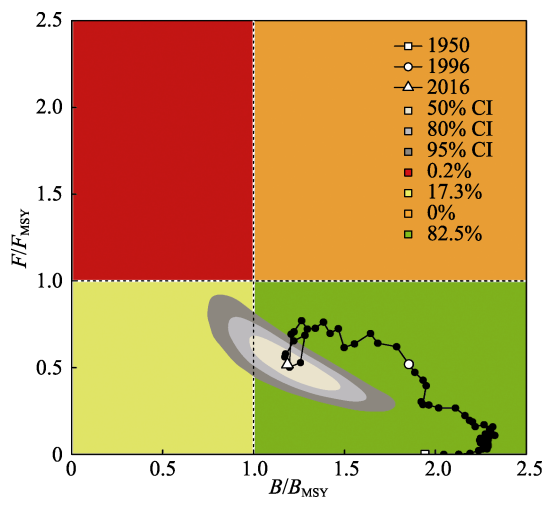


图 6 印度洋大眼金枪鱼资源状态判断的 Kobe 图(基础模型)

3 个由浅到深的灰色区域分别代表 50%、80% 和 95% 的置信区间.

Fig. 6 Kobe plot of the assessment of stock status for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean (base case)
The 3 gray shadow areas from shallow to deep denote the 50%, 80% and 95% confidence interval, respectively.

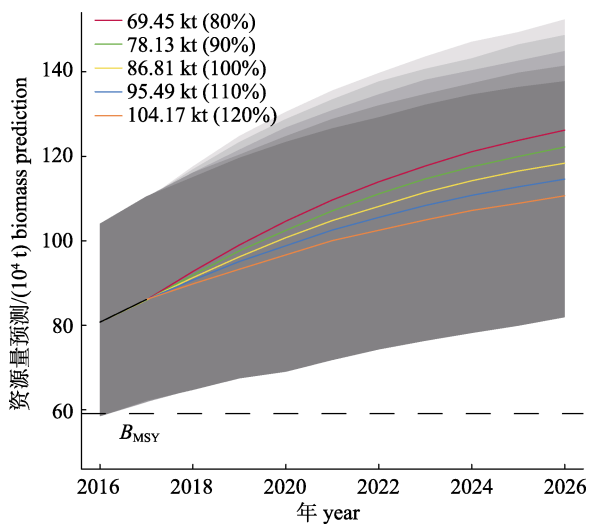


图 7 不同捕捞水平下印度洋大眼金枪鱼资源量的预测(基础模型)

灰色阴影区域代表 95% 的置信区间.

Fig. 7 Projections of the biomass depletion of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean for various levels of catch (base case)
Grey shaded areas denote the 95% confidence interval.

数设定的高度要求,在渔业资源评估中被广泛采用^[15, 34]。本研究基于剩余产量模型框架 JABBA,使用 Pella-Tomlinson 剩余产量方程对印度洋大眼金枪鱼进行了资源评估。结果显示,现阶段其资源量有所下降,但仍处于健康的可持续开发状态,其 MSY 估计值为 163 kt,高于近年的渔获量。且未来 10 年的预测表明,即使增加渔获量至 2016 年渔获量的 120%,种群仍然处于健康状态,这与 IOTC 采用 SS3 模型评估的种群状态一致^[4]。因此,根据 IOTC 对于大眼金枪鱼的养护管理措施要求,在渔获量低于 MSY 的情况下,可以暂时不采用严格的渔获量管控措施^[35]。即使评估结果存在一定的回溯性误差,但仍可以较为可靠地评估结果,为其渔业管理和可持续开发提供决策建议。

本研究的敏感性分析表明,大眼金枪鱼资源评估的结果对于不同种群丰度系数(CPUE)的使用比较敏感,即是否考虑早期(1955—1978)CPUE 以及 CPUE 标准化过程中是否考虑渔船效应。究其原因,可能由于早期捕捞技术(如渔船体型较小、渔具简单等)相对落后,数据收集困难较大,具有较高误报率^[35]。因此,本研究建议今后 CPUE 标准化和资源评估中,考虑渔船效应的影响,并使用 1979 年之后的渔业数据,以此减少结果的不确定性。

国际上对于印度洋大眼金枪鱼的资源评估有很多研究,如不同的模型结构、数据选用和参数设定等。IOTC 指出,2015 年 ASPIC 模型结果表明大眼金枪鱼种群没有被过度捕捞($F_{2015}/F_{MSY}=0.74$, $B_{2015}/B_{MSY}=1.30$)^[35]; ASAP 评估结果则显示,该资源可能存在过度捕捞的趋势($F_{2015}/F_{MSY}=1.00$, $B_{2015}/B_{MSY}=1.18$);而 SCAA 模型显示其资源状态可能已经处于一定的过度捕捞状态($F_{2015}/F_{MSY}=0.82$, $B_{2015}/B_{MSY}=0.95$)。因此,对于不同资源评估的诊断性分析、结果比较和选用,均需要更加慎重且全面的考虑,才能为渔业管理提供更加可靠的建议。

大眼金枪鱼渔业及其资源动态变化,受到全球的广泛关注,其种群分布遍布世界各热带和亚热带海域,而不同洋区的大眼金枪鱼种群状态和

渔业现状存在不同程度的差异。大西洋和太平洋渔业大规模开发远早于印度洋,自 20 世纪 60 年代末,大眼金枪鱼的渔获量就已达到 50 kt,之后持续增加;受海域面积的影响,太平洋的大眼金枪鱼渔获量远高于其他洋区。自 1991 年起,大西洋金枪鱼围网渔业中新型人工集鱼装置(Fish Aggregation Devices, FADs)的应用极大地提高了渔业效率,但渔获物中幼鱼混捕率的增高,不同程度地降低了种群补充量^[36]。ICCAT 评估结果显示,2017 年大西洋大眼金枪鱼的资源已有 85.5% 的概率处于过度捕捞状态^[37]。随着捕捞强度和捕捞效率的大幅提高,太平洋大眼金枪鱼在 2014 年已处于过度捕捞状态。通过一系列的养护管理措施之后, WCPFC 评估结果显示^[38], 2017 年太平洋大眼金枪鱼的资源状况有所改观。由于经济社会发展所限,印度洋周边国家捕捞能力略差,直至 20 世纪 80 年代初因日本、欧洲和中国台湾省远洋渔业船队的大量介入,印度洋的大眼金枪鱼渔获量才到达 50 kt。近年来,结合相关评估结果,印度洋大眼金枪鱼的 $F_{2016}/F_{MSY}<1$,表明其资源尚未遭受过度捕捞^[22, 32, 35],此结果与本研究一致。

尽管当前资源评估结果认为印度洋大眼金枪鱼的种群状态比较乐观,但模型存在一定程度的回溯性误差,预测能力受到影响。为确保该种群的可持续开发,本文不推荐大幅提高渔获量。由于形状参数 m 难以估计,本文中资源评估数据没有估计 m 值,也没有检测评估结果对其的敏感性;考虑到渔业数据准确性和 CPUE 标准化过程中的多项影响因素,评估结果仍旧存在未知的较大不确定性^[39]。因此,为提高评估结构的准确性,本文建议提高收集数据的质量,今后也将探讨数据校对方法、改进模型结构(如捕捞系数的动态变化和参数的先验分布等)、增加模型对多因子的敏感性分析、考虑个体生长和种群时空的异质性^[40-41]等方法,减少回顾性误差的影响;在未来渔业管理中,建议采取更加全面的管理策略评价,为印度洋大眼金枪鱼的资源养护及渔业管理提供理论依据。

致谢：诚挚感谢印度洋金枪鱼委员会(Indian Ocean Tuna Commission Secretariat)提供印度洋大眼金枪鱼资源评估所需的渔获量和 CPUE 数据，感谢上海海洋大学渔业资源和生态系统量化评估与管理研究室(FSA Lab)的 Kindong Richard 博士、田志盼在论文修改过程中给予的帮助。

参考文献：

- [1] Guan W J, Gao F, Lei L, et al. Retrospective problem in fishery stock assessment[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(5): 841-847. [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.]
- [2] Zhang K, Chen Z Z. 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. [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.]
- [3] Zhu J F. Stock assessment of big-eye tuna *Thunnus obesus* in eastern Pacific Ocean: A comparative study of the full and the simplified SS3 model[J]. Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(3): 12-21. [朱江峰. 运用 SS3 评估东太平洋大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)资源——复杂模型和简化模型比较[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(3): 12-21.]
- [4] Li Y N, Dai X J, Zhu J F, et al. Impact of catch uncertainty on the stock assessment of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(5): 1-9. [李亚楠, 戴小杰, 朱江峰, 等. 渔获量不确定性对印度洋大眼金枪鱼资源评估的影响[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(5): 1-9.]
- [5] Xu Y W, Zhang K, Chen Z Z. Stock assessment for the albacore fishery in the southern Atlantic ocean base on CEDA and ASPIC programs[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(3): 46-54. [许友伟, 张魁, 陈作志. 基于 CEDA 和 ASPIC 软件的南大西洋长鳍金枪鱼渔业资源评估研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015(3): 46-54.]
- [6] Feng B, Chen X J, Xi T Q. Stock assessment of *Thunnus albacares* in the Indian Ocean using age structured production mode[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(13): 3375-3384. [冯波, 陈新军, 西田勤. 应用年龄结构产量模型评估印度洋黄鳍金枪鱼资源[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3375-3384.]
- [7] Costello C, Ovando D, Hilborn R, et al. Status and solutions for the world's unassessed fisheries[J]. Science, 2012, 338(6106): 517-520.
- [8] Huang B. Resources status of main tuna species and their management in the world[J]. Modern Fisheries Information, 2008, 23(1): 22-25. [黄斌. 世界主要金枪鱼类资源状况与管理[J]. 现代渔业信息, 2008, 23(1): 22-25.]
- [9] Han Q P, Shan X J, Guan L S, et al. Application of SPiCT for data-limited stock assessment of short-lived *Illex argentinus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(1): 169-177. [韩青鹏, 单秀娟, 关丽莎, 等. 基于 SPiCT 模型对数据有限短生命周期阿根廷滑柔鱼的资源评估[J]. 中国水产科学, 2018, 25(1): 169-177.]
- [10] Chen Y. Quality of fisheries data and uncertainty in stock assessment[J]. Scientia Marina, 2003, 67(S1): 75-87.
- [11] Cadrin S X, Dickey-Collas M. Stock assessment methods for sustainable fisheries[J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 72(1): 1-6.
- [12] Punt A E. Extending production models to include process error in the population dynamics[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003, 60(10): 1217-1228.
- [13] Zhang Z N. Evaluation of logistic surplus production model through simulations[J]. Fisheries Research, 2013, 140: 36-45.
- [14] Ludwig D, Walters C J. Are age-structured models appropriate for catch-effort data?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1985, 42(6): 1066-1072.
- [15] Guan W J, Tian S Q, Zhu J F, et al. A review of fisheries stock assessment models[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(5): 1112-1120. [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.]
- [16] Pella J J, Tomlinson P K. A generalized stock production model[J]. Bulletin of the Inter-American Tropical Tuna Commission, 1969, 13(5): 421-458.
- [17] Wang S P, Maunder M N, Aires-Da-Silva A. Selectivity's distortion of the production function and its influence on management advice from surplus production models[J]. Fisheries Research, 2014, 158: 181-193.
- [18] Patterson K, Cook R, Darby C, et al. Estimating uncertainty in fish stock assessment and forecasting[J]. Fish and Fisheries, 2001, 2(2): 125-157.
- [19] Hilborn R, Walters C J. Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics & Uncertainty[M]. New York: Springer, 1992.
- [20] Winker H, Carvalho F, Kapur M. JABBA: Just another Bayesian biomass assessment[J]. Fisheries Research, 2018, 204: 275-288.
- [21] Wibawa T A, Lehodey P, Senina I. Standardization of a geo-referenced fishing data set for the Indian Ocean bigeye

- tuna, *Thunnus obesus* (1952–2014)[J]. Earth System Science Data, 2017, 9(1): 163-179.
- [22] IOTC. Presenting IOTC stock status advice from multiple models to the broader fisheries community[R]. (2011-10-01). IOTC Secretariat, Document 2011, IOTC-2011-WPM04-13.
- [23] Pella J J, Tomlinson P K. A generalized stock production model[J]. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin, 1969, 13(3): 421-458.
- [24] Zhu J F, Dai X J, Guan W J, et al. Stock assessment of albacore *Thunnus alalunga* in the Indian Ocean[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(1): 1-8. [朱江峰, 戴小杰, 官文江, 等. 印度洋长鳍金枪鱼资源评估[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(1): 1-8.]
- [25] Guan W J, Wu J W. 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. [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.]
- [26] IOTC. Assessment of Indian Ocean bigeye (*Thunnus obesus*) using a biomass dynamic model[R]. (2016-10-20). Gorka M, Hilario M, Laurence K, Document 2016, IOTC-2016-WPTT18-16.
- [27] Prager M. A suite of extensions to a nonequilibrium surplus production model[J]. Fishery Bulletin, 1994, 92: 374-389.
- [28] Heidelberger P, Welch P D. Simulation run length control in the presence of an initial transient[J]. Operations Research, 1983, 31(6): 1109-1144.
- [29] Guan W J, Zhu J F, Gao F. Analysis of influencing factors on stock assessment of the Indian Ocean albacore tuna (*Thunnus alalunga*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(5): 1102-1114. [官文江, 朱江峰, 高峰. 印度洋长鳍金枪鱼资源评估的影响因素分析[J]. 中国水产科学, 2018, 25(5): 1102-1114.]
- [30] Chai T, Draxler R R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature[J]. Geoscientific Model Development, 2014, 7(3): 1247-1250.
- [31] 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.
- [32] Zhang K, Chen Z Z, Huang Z R, et al. Comparison of delay difference model and surplus production model applied to albacore (*Thunnus alalunga*) in the South Atlantic Ocean[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(3): 1-6. [张魁, 陈作志, 黄梓荣, 等. 时滞差分模型与剩余产量模型的应用比较——以南大西洋长鳍金枪鱼为例[J]. 南方水产科学, 2015, 11(3): 1-6.]
- [33] Ni J F, Liu Q. Performances of surplus production models in different fishing scenarios[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2004(1): 60-67. [倪建峰, 刘群. 剩余产量模型在不同渔业中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2004(1): 60-67.]
- [34] Barber W E. Maximum sustainable yield lives on[J]. North American Journal of Fisheries Management, 1988, 8(2): 153-157.
- [35] IOTC. Report of the 21st Session of the IOTC Scientific Committee[R]. Seychelles, Document 2018, IOTC-2018-SC21-R[E].
- [36] He S, Wang X F, Dai X J, et al. Relationship between change of bigeye tuna catches by Chinese tuna purse seine fleets and FAD closure[J]. South China Fisheries Science, 2017, 13(5): 110-116. [何珊, 王学昉, 戴小杰, 等. 中国金枪鱼围网船队大眼金枪鱼渔获物的特征变化与人工集鱼装置禁渔期的关系[J]. 南方水产科学, 2017, 13(5): 110-116.]
- [37] ICCAT. Report of the 2018 ICCAT bigeye tuna stock assessment meeting (SCRS)[R]. Pasaia, Document 2018, 2018-BET-SA.
- [38] WCPFC. Conservation and management measure for bigeye, yellowfin and skipjack tuna in the Western and Central Pacific Ocean[R]. (2015-12-07). Manila, Philippines, Document CMM 2017-01, WCPFC-Conservation and Management Measure 2017-01.
- [39] Guan W J, Tang L, Zhu J F, et al. Application of a Bayesian method to data-poor stock assessment by using Indian Ocean albacore (*Thunnus alalunga*) stock assessment as an example[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(2): 117-125.
- [40] Ma Q Y, Jiao Y, Ren Y P. Linear mixed-effects models to describe length-weight relationships for yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) along the north coast of China[J]. PLoS ONE, 2017, 12(2): e0171811.
- [41] Ma Q Y, Jiao Y, Ren Y P, et al. Population dynamics modeling with spatial heterogeneity for yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) along the coast of China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019 (Accepted).

Stock assessment for bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean using JABBA

ZHAO Pengpeng¹, TIAN Siqian^{1,2,3}, MA Qiuyun^{1,2,3}, DAI Libin¹

1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China;

3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China

Abstract: Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) is one of the most valuable tropical tuna species targeted by most longline fisheries. *T. obesus* stock assessments have always been the focus for regional tuna fishery management organizations worldwide. Based on the catch from 1950 to 2016 and Catch Per Unit Effort (CPUE) from 1955 to 2016, the stock of the Indian Ocean bigeye tuna was assessed by the Bayesian state space surplus production model in an open environment, JABBA (Just Another Bayesian Biomass Assessment), and the implications on the effects of fishing boat and CPUE data scale was explored. The results showed that the stock assessment was sensitive to different CPUE, and the scenario using CPUE considering vessel effect from 1979 to 2016 was revealed to perform best with the lowest Root-Mean-Squared-Error (RMSE) and Deviance Information Criterion (DIC), and selected to be the base case. The median estimate for bigeye tuna biomass in 2016 was 812 kt, and the Maximum Sustainable Yield (MSY) was estimated to be 163 kt, which was much higher than the catch (86.81 kt) in 2016, indicating that the stock was not overfished, with 81% in the green zone of the Kobe plot. The biomass of bigeye tuna would be higher than the biomass that can produce the maximum sustainable yield (B_{MSY}) in the next 10-year projection when the total permissible catch was set to 69.45–104.17 kt (80%–120% of catch in 2016). There were some retrospective errors in the stock assessment results, with underestimated fishing rate and overestimated biomass. Therefore, the stock assessments should be improved by updating the model structure, CPUE standardization, and setting for prior distribution of model parameters.

Key words: distant-water fishery; bigeye tuna; stock assessment; surplus production model; sensitivity analysis

Corresponding author: MA Qiuyun. E-mail: qyma@shou.edu.cn