

东海北部三疣梭子蟹资源评估与管理决策分析*

刘雅, 王晶, 栗小东, 王迎宾**

(浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)是中国东海北部海域重要的经济蟹类,对三疣梭子蟹资源开展评估是其可持续利用的基础。本文运用基于贝叶斯方法的 Schaefer 剩余产量模型,对东海北部海域的三疣梭子蟹资源进行评估,确定了当前三疣梭子蟹资源的开发利用状态,估算了在不同收获率水平下未来 10 年三疣梭子蟹的生物量和年总可捕捞量,分析了管理策略实施后三疣梭子蟹资源崩溃的风险。研究显示,在基准方案和敏感性分析方案下模型参数预测值以及生物学参考点估计值比较相近。使用两种方案估算得到的最大可持续产量(MSY)均约为 24×10^4 t, MSY 对应的生物量 B_{MSY} 均约为 252×10^4 t。在基准方案下, MSY 对应的捕捞死亡系数 F_{MSY} 为 0.096;在敏感性分析方案下, MSY 对应的捕捞死亡系数 F_{MSY} 为 0.097。在 2001—2020 年间,捕捞死亡系数均低于 F_{MSY} ,且生物量基本在 B_{MSY} 水平之上,表明近年来三疣梭子蟹未出现过捕捞的情况。决策分析和风险分析表明,为使三疣梭子蟹资源可持续利用,将收获率设定在 0.04 左右是较合理的捕捞方案。

关键词: 三疣梭子蟹; 贝叶斯方法; 剩余产量模型; 管理策略; 东海北部; 渔业资源

中图法分类号: S932.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2023)11-055-10

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20220126

引用格式: 刘雅, 王晶, 栗小东, 等. 东海北部三疣梭子蟹资源评估与管理决策分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(11): 55-64.

Liu Ya, Wang Jing, Li Xiaodong, et al. Stock assessment and management decision analysis of *Portunus trituberculatus* inhabiting northern East China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(11): 55-64.

三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)隶属甲壳纲十足目梭子蟹科梭子蟹属,为广温广盐性种类,是中国最重要的海洋经济蟹类之一^[1]。主要分布于日本、朝鲜、菲律宾、马来群岛、红海及中国的渤海、黄海、东海和南海。在东海三疣梭子蟹主要分布在大沙渔场、长江口渔场和舟山渔场^[2],其渔获量约占全国产量的 50%^[3]。东海北部海域是东海最大的三疣梭子蟹产区,其渔获量占东海总渔获量的 40%以上^[4]。国外学者对三疣梭子蟹的相关研究较少, Ariyama H^[5] 基于 1984—2008 年日本大阪湾区域三疣梭子蟹的渔获量数据,探究了过于频繁的渔业开发和偶发的人类活动,以及气候事件对三疣梭子蟹补充量造成的影响。我国有关三疣梭子蟹的研究主要集中于养殖领域,包括三疣梭子蟹的人工育苗^[6]、池塘养殖^[7]、常见病害防控^[8]、配合饲料开发^[9-10]以及优良品种选育^[11]等。对野生三疣梭子蟹资源的相关研究相对有限,主要集中在资源

分布、增殖容量和资源评估方面。如徐炳庆等^[12]通过轮廓系数法对莱州湾三疣梭子蟹资源的时空分布特征进行了研究;栗小东等^[13]基于机器学习方法,对东海北部海域三疣梭子蟹的资源分布进行了预测;林群等^[14]构建了黄河口邻近海域的 Ecopath 模型,初步评估了三疣梭子蟹的增殖容量;俞存根^[4]对东海中北部重要的经济蟹类及其现存资源量和最大可持续产量(Maximum sustainable yield, MSY)进行了分析;Wang 等^[15]基于传统 Schaefer 模型对三疣梭子蟹的最大可持续产量及资源开发情况开展了评估。以上在对三疣梭子蟹进行资源评估的研究中并未考虑模型中相关参数的不确定性。在资源评估过程中,如果不考虑不确定性,将对渔业资源评估结论、渔业生产和生产管理造成负面影响。因此,实现渔业科学管理和合理开发的前提是对资源量的正确评估^[16]。

本研究依据 2001—2020 年东海北部海域三疣梭

* 基金项目:国家重点研究发展计划项目(2019YFD0901304);浙江省基础公益计划项目(LGN21C190009);舟山市科技计划项目(2022C41003)资助

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2019YFD0901304); the Basic Public Welfare Plan of Zhejiang(LGN21C190009); the Science and Technology Plan Project of Zhoushan(2022C41003)

收稿日期:2022-03-02; 修订日期:2022-05-19

作者简介:刘雅(1995—),女,硕士生。E-mail:331774543@qq.com

** 通信作者:E-mail:yingbinwang@126.com

子蟹的渔获量数据和单位捕捞努力量渔获量 (Catch per unit effort, CPUE) 数据, 运用 Schaefer 剩余产量模型, 将参数基准方案 (参数的先验分布均为均匀分布) 与敏感性分析方案 (参数与基准方案相同, 但采用不同先验分布) 进行对比, 对东海北部海域三疣梭子蟹的资源进行评估, 并设定收获率作为三疣梭子蟹资源管理策略且分析管理策略可能存在的风险。研究结果有助于掌握当前三疣梭子蟹的渔业资源变动规律, 并基于目前三疣梭子蟹资源状况对未来资源的动态变化趋势进行预估。

1 材料和方法

1.1 数据来源

东海北部海域三疣梭子蟹渔获量数据来源于《中国渔业统计年鉴》^[17], 时间段为 2001—2020 年 (见

图 1)。除了资源量以外, 其他一些因素也会导致 CPUE 的变动, 因此需要对 CPUE 进行标准化, 以剔除这些因素的影响。本研究使用了近 20 年的渔业生产数据, 其中包含了 3 种三疣梭子蟹生产船型, 同时考虑主要环境因子变化的影响, 因此在使用广义线性模型 (Generalized linear model, GLM) 对 CPUE 数据进行标准化时^[18], 考虑了年份、渔船类型和平均水温 3 个因素的影响。具体模型如下:

$$\ln(\ln \text{CPUE}) \sim \text{factor}(\text{Year}) + \text{factor}(\text{Effort}) + \text{factor}(\text{Vessel}) + \text{factor}(\text{Temp}), \text{data} = \text{RData}). \quad (1)$$

式中: $\ln$ 是 R 语言中广义线性模型的函数命令; $\ln \text{CPUE}$ 代表对 CPUE 取对数; Year 代表年份; Effort 代表捕捞努力量; Vessel 代表 3 种不同的船型, 分别是刺网、蟹笼、单拖网; Temp 代表底层温度。

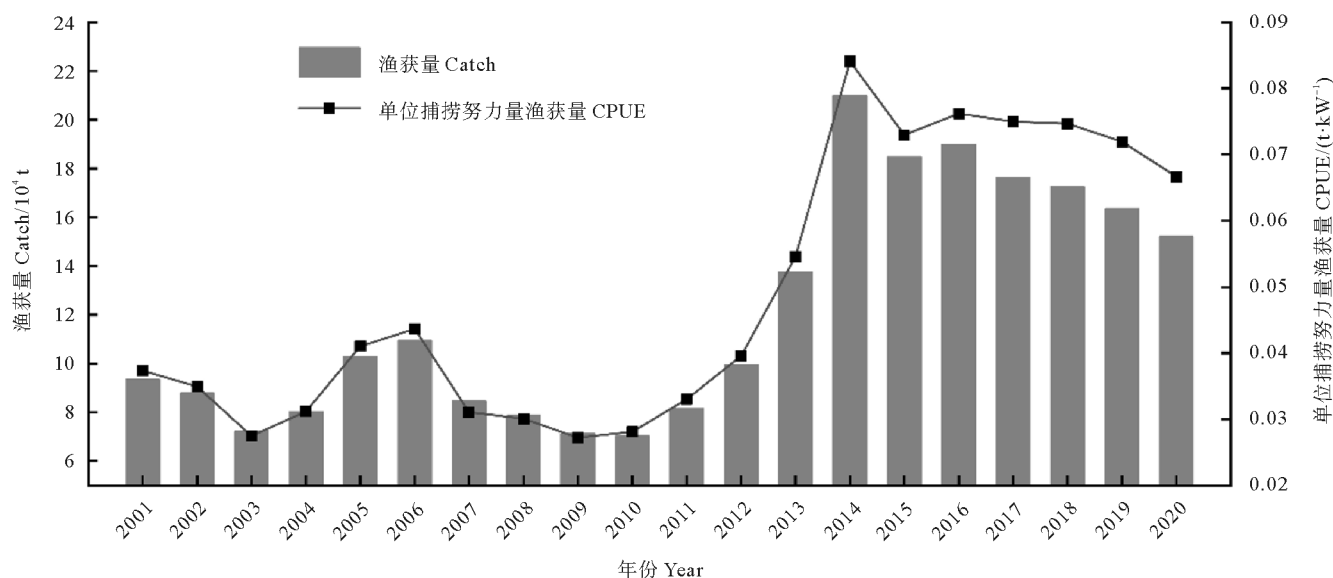


图 1 2001—2020 年东海北部海域三疣梭子蟹年渔获量和标准化 CPUE 数据

Fig. 1 Statistics of catch and standardized CPUE of *Portunus trituberculatus* the Northern East China Sea from 2001 to 2020

1.2 剩余产量模型

Schaefer 非平衡剩余产量模型的离散时间形式如下:

$$B_t = B_{t-1} + rB_{t-1} \left(1 - \frac{B_{t-1}}{K}\right) - C_{t-1}; \quad (2)$$

$$I_t = qB_t e^{\frac{\epsilon_t - \sigma^2}{2}}, \epsilon_t \sim N(0, \sigma^2). \quad (3)$$

式中: B_t 为 t 年的生物量; r 为内禀自然增长率; K 为环境容纳量; C_{t-1} 为 $t-1$ 年的渔获量; q 为可捕系数。其中 r 、 K 、 q 为模型的参数。 I_t 为三疣梭子蟹资源丰度的相对指数, ϵ_t 为误差项。

在进行资源评估的过程中, 一般会假设剩余产量模型中初始年的生物量 B_0 为 K , 通过减少模型估算的参数数量来达到降低模型评估难度的目的^[19]。但这种

假设成立的前提条件是能够确定渔业开始时前一年的资源量^[20]。由于中国对三疣梭子蟹的捕捞活动开始较早, 因此将初始一年的资源量视为 K 并不合理。本研究的 B_0 值参考 Wang 等^[15]的研究结果。

1.3 似然函数

假设 CPUE 正比于生物量, 且观测误差服从对数正态分布, 则似然函数的表达式为:

$$L(I|\theta) = \prod_{t=2001}^{2020} \frac{1}{I_t \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(I_t) - \ln(qB_t))^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4)$$

式中: L 和 $\ln$ 均表示自然对数; I 表示单位捕捞努力量渔获量; θ 表示随机变量; Π 表示连乘符号; q 表示可捕系数; B_t 表示 t 年的生物量; σ 表示标准差。

由于本研究采用的渔获量和 CPUE 数据的时间序列为 20 年,这对标准差(σ)的估算来说存在一定的不稳定性,因此在本研究将其视为恒定值($\sigma=0.2$)^[19]。

1.4 模型参数先验分布的设定

在贝叶斯理论中,参数的后验分布会受到先验分布设定的影响^[21]。因此,要对先验分布进行敏感性检验来验证样本数据提供的信息是否充足。具体方法是比较各参数在不同先验分布下得到的后验分布的差异大小,来判断样本数据提供的信息是否充足。若结果差异较大,则表明数据没有提供足够的信息^[18]。

因为较难搜集到三疣梭子蟹相关参数的先验信息,为了结果的合理性,故采用均匀分布作为模型参数先验概率分布的基准方案。此方案 K 的基准先验分布

假设服从均匀分布(50×10^4 t, 550×10^4 t),下边界设置为 50×10^4 t,此值大于 2001—2020 年数据中的最大渔获量。为了尽量减少上边界值对后验概率的影响,上边界值被设定为 550×10^4 t^[22]。对于可捕系数 q ,获取其有信息的先验分布具有较大难度,在研究中一般将这种无信息的先验分布设置为均匀分布或对数均匀分布。为足以覆盖内禀增长率 r 的合理范围, r 的上、下边界区间一般包括与评估种类相似的物种 r 的估计值^[23]。本研究为了验证样本数据是否提供了足够的信息,用敏感性分析方案来替代基准方案中的参数先验分布,比较两种情况下得到的参数后验分布差异大小。

根据三疣梭子蟹的相关研究^[15],参数 r 、 K 、 q 基准方案和敏感性分析方案的先验分布设定见表 1。

表 1 剩余产量模型参数 r 、 K 、 q 的先验概率分布

Table 1 The prior probability distribution of the parameters r , K , and q in the surplus production model

方案 Scenario	内禀增长率 r Intrinsic rate of natural increase r	承载力 K Carrying capacity K / 10^4 t	可捕系数 q Fishing coefficient q
基准方案 Base scenario	$U(0.01, 2)$	$U(50, 550)$	$U(0.000\ 1, 0.05)$
敏感性分析方案 Sensitivity analysis scenario	$N(1, 0.5^2)$	$U(50, 550)$	$\ln(q) \sim U(-20, 0)$

1.5 模型后验分布的计算

贝叶斯方法不仅考虑了评估模型的不确定性,而且考虑了参数的不确定性,通过将经验信息与似然函数结合在一起,得到模型参数的后验分布,所以可以得到比传统分析方法更可靠的结果。因此,贝叶斯方法被认为是目前国际渔业资源研究领域较有代表性的方法,且适用于缺乏某些特定数据的情况下研究渔业资源动态^[24]。

本研究中模型参数 r 、 K 、 q 的后验概率分布是通过 MCMC(Markov chain monte carlo algorithm)算法测算的。此算法共迭代 50 000 次,将前 5 000 次的结果舍弃,后每隔 40 次储存剩下的 45 000 次的运算结果。采用此算法计算时,各参数的初始值设定分别为: $r=0.15$, $K=37\ 706.4$, $q=0.005$ ^[15]。

1.6 生物学参考点估算

生物学参考点是从生物学角度设定的指标,包括目标参考点(Target reference points, TRP)和限制参考点(Limit reference point, LRP)。目标参考点是渔业管理为了持续获得某一渔获量所设定的指标,限制参考点指的是在渔业管理中为了避免出现种群的生物量过低导致种群不能被可持续利用的情况而设置的指标^[25]。本研究涉及到的生物参考点有 F_{MSY} 、 B_{MSY} 、 $F_{0.1}$ 和 MSY 。 F_{MSY} 和 B_{MSY} 分别指渔业达到 MSY 水平时

对应的捕捞死亡系数和生物量, $F_{0.1}$ 表示平衡渔获量和捕捞死亡系数关系曲线最大斜率的 10% 对应的捕捞死亡系数。通过计算可得:

$$F_{\text{MSY}} = \frac{r}{2}, \quad (5)$$

$$F_{0.1} = 0.45r, \quad (6)$$

$$\text{MSY} = \frac{rK}{4}, \quad (7)$$

$$B_{\text{MSY}} = \frac{K}{2}. \quad (8)$$

在本研究中,捕捞死亡系数的目标参考点 F_{tar} 设定为 $F_{0.1}$, 限制参考点 F_{lim} 设定为 F_{MSY} ; B_{MSY} 设定为资源量的目标参考点 B_{tar} , $B_{\text{MSY}}/4$ 设定为限制参考点 B_{lim} 。可以通过以上参考点来判断当前的渔业资源状况。当捕捞死亡系数大于 F_{lim} 时,表明该资源正在遭受过度捕捞(Overfishing),相反则表明该资源未遭受过度捕捞;当资源量小于 B_{lim} 时,表明该资源已经遭到破坏,处于过度捕捞状态(Overfished),相反则表明该资源未处于过度捕捞状态。

1.7 确定备选管理策略

本文采用不同的收获率(Harvest rate,即捕捞死亡率,规定了渔业年捕捞渔获量在资源量中的固定占比)来作为三疣梭子蟹资源管理策略。收获率分别设定为 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07 和 0.08。因

此,未来 t 年的渔获量的计算公式如下:

$$C_t = h_t B_t e^\epsilon, \epsilon \sim N(0, 1^2). \quad (9)$$

式中: C_t 为 t 年的渔获量; h_t 为收获率; B_t 为 t 年的生物量; ϵ 为误差项。

1.8 管理策略实施效果模拟

资源评估过程的复杂性会导致评估结果存在较多不确定性,因此通过建立指标来对不同的管理策略进行风险评估是十分必要的。本研究假设实施管理策略的时间段为 2021—2030 年。建立的指标有:

(1)管理结束时的生物量 B_{2030} ,即 2030 年资源量的期望值。

(2)管理策略实施后 2030 年渔获量的期望值 C_{2030} 。

(3)2030 年三疣梭子蟹生物量与 B_{MSY} 之比的期望值(B_{2030}/B_{MSY})。

(4)2030 年三疣梭子蟹生物量的衰减率(Depletion),即实施某一管理策略后,2030 年三疣梭子蟹生物量与 K 的比例(B_{2030}/K)。

(5)2030 年三疣梭子蟹生物量大于 2020 年三疣梭子蟹生物量的概率 $P(B_{2030} > B_{2020})$,表示管理措施实施后资源较管理措施实施前资源恢复的概率。

(6)2030 年三疣梭子蟹生物量大于 B_{MSY} 的概率 $P(B_{2030} > B_{MSY})$,表示资源恢复到健康水平的概率。

(7)2030 年三疣梭子蟹生物量小于 $B_{MSY}/4$ 的概率 $P(B_{2030} < B_{MSY}/4)$,表示管理措施实施后资源崩溃的概率。

在 1.5 中,我们得出剩余产量模型参数 r 、 K 、 q 的后验概率分布后,可以通过反复的模拟计算得到指标概率分布,具体步骤见图 2。

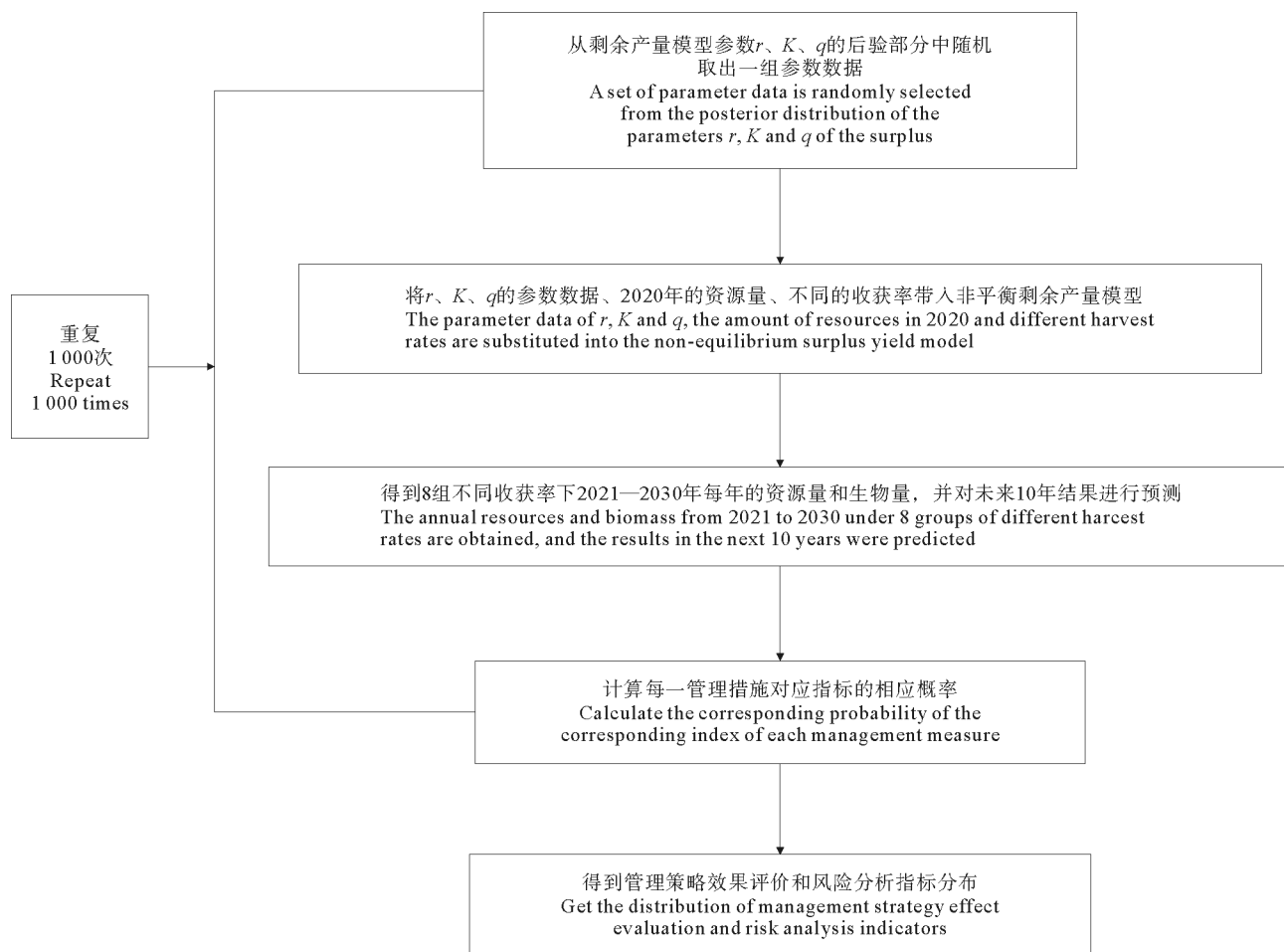


图 2 指标概率分布计算流程图

Fig. 2 Flowchart for calculating the probability distribution of indicator

2 结果

2.1 后验概率分布和期望值

图 3 为不同方案模型的后验概率分布。基准方案

假设 r 、 K 、 q 的先验概率均为均匀分布,但由图 3 的曲线可知 r 、 K 、 q 的后验概率明显不同于假设的分布类型。同时,由两图对比可知这两种方案的参数后验分布非常相似,这表明模型参数后验分布的结果受本研

究采用的渔业数据的影响远大于先验分布的影响,即数据提供了较丰富的信息。

模型估计的参数估计值见表 2,结果表明两方案下内禀增长率 r 的估计值分别为基准方案 0.192,敏感性

分析方案 0.194,即后验分布均值无明显差异;基准方案和敏感性分析方案的环境最大容纳量 K 的估计值分别为 $503.38 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $504.23 \times 10^4 \text{ t}$;两方案下可捕系数 q 的估计值相等。

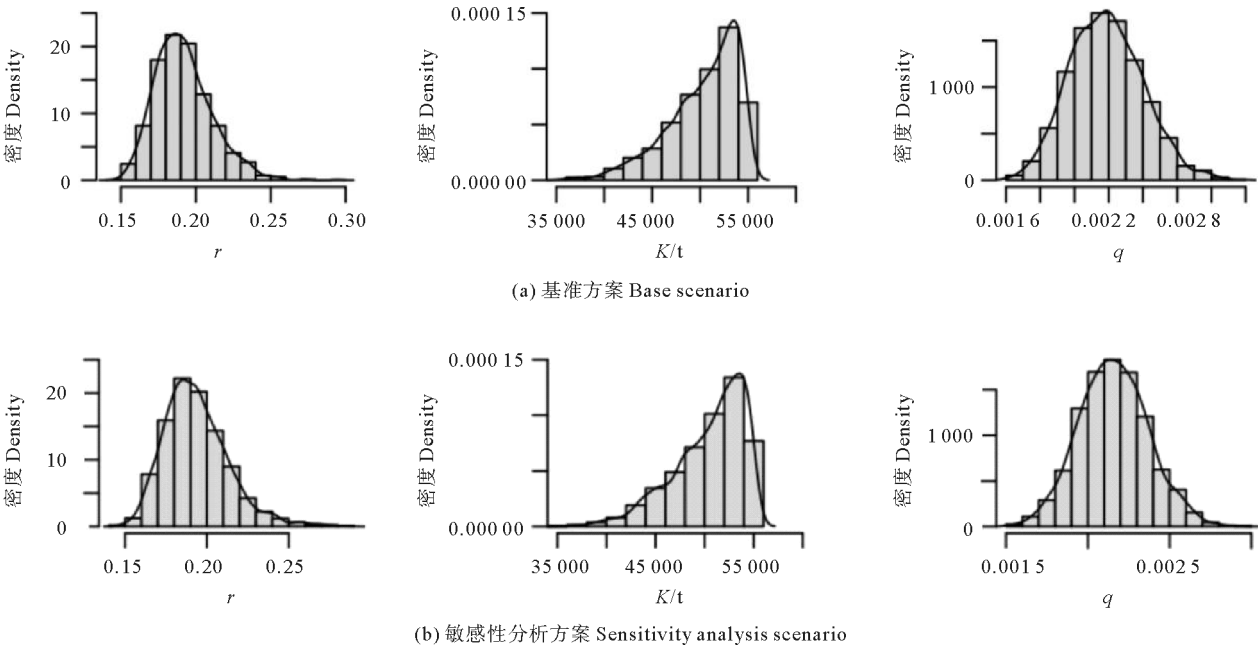


图 3 基准方案和敏感性分析方案的后验概率分布

Fig. 3 The posterior probability distribution of the base scheme and the sensitivity analysis scheme

表 2 模型相关参数的估计量

Table 2 The estimated values of model parameters

方案 Scenario	参数 Parameter	平均值 Median	2.5%分位数 2.5%quantile	50%分位数 50%quantile	97.5%分位数 97.5%quantile
基准方案 Base scenario	r	0.192	0.160	0.190	0.235
	$K/10^4 \text{ t}$	503.38	414.16	511.85	547.94
	q	0.002	0.002	0.002	0.003
敏感性分析方案 Sensitivity analysis scenario	r	0.194	0.162	0.191	0.240
	$K/10^4 \text{ t}$	504.23	416.67	513.56	548.66
	q	0.002	0.002	0.002	0.002

2.2 三疣梭子蟹资源状况分析

基准方案和敏感性分析方案估算的三疣梭子蟹生物学和渔业学参考点见表 3。基准方案下估算的 MSY 为 $24.07 \times 10^4 \text{ t}$, MSY 对应的生物量 B_{MSY} 为 $251.70 \times 10^4 \text{ t}$, 此时的捕捞死亡系数为 0.096。此方案评估的 $F_{0.1}$ 为 0.086。在敏感性分析方案下,估算的 MSY 为 $24.33 \times 10^4 \text{ t}$, B_{MSY} 为 $252.12 \times 10^4 \text{ t}$, 此时的捕捞死亡系数为 0.097。此方案评估的 $F_{0.1}$ 为 0.087。由这两种方案估算得到的结果可知, F_{2020} 的均值小于 F_{MSY} 的均值且 B_{2020} 的均值大于 B_{MSY} 的均值,这表明当前东海北部海域三疣梭子蟹资源未遭受过度捕捞且未处在

过度捕捞的状态(见表 3)。

图 4 的 4 个相位,红色区域代表已过度捕捞且正遭受过度捕捞,而绿色区域代表未出现过度捕捞,黄色区域代表已过度捕捞或正在过度捕捞^[26]。从图 4 分析可知,2001—2020 年,捕捞死亡系数基本低于 F_{MSY} 且生物量大都在 B_{MSY} 之上,这表明了近年来三疣梭子蟹资源状况良好,基本不存在过度捕捞的状况。

2.3 管理策略分析

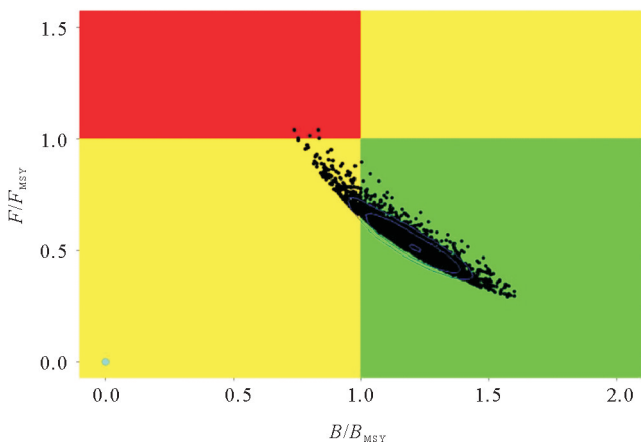
基准方案和敏感性分析方案在不同的收获率下的管理决策和风险分析的指标结果见表 4。两种方案的各项指标值均比较接近,在基准方案下,随着收获率的

增大,2030 年渔获量期望值总体呈上升趋势,但当收获率从 0.05 增大到 0.07 时,2030 年最大渔获量期望值的变化不显著。在敏感性分析方案下,收获率从 0.01 增大到 0.06 时,2030 年最大渔获量期望值呈上升趋势,但随着收获率的继续增大,2030 年最大渔获量期望值却逐渐减小。综合两种方案的结果可知,如果要获取 2021—2030 年最大持续产量,应将收获率控制在 0.06 左右,此时对应的资源量为 23×10^4 t 左右。

表 3 两种方案下估算的生物学参考点
Table 3 Biology reference points estimated under two scenarios

方案 Scenario	参数 Parameter	平均值 Median	2.5%分位数 2.5%quantile	50%分位数 50%quantile	97.5%分位数 97.5%quantile
基准方案 Base scenario	MSY/ 10^4 t	24.07	19.89	23.94	28.93
	F_{MSY}	0.096	0.096	0.095	0.118
	$F_{0.1}$	0.086	0.072	0.085	0.106
	F_{2020}	0.052	0.041	0.051	0.067
	$B_{\text{MSY}}/10^4$ t	251.70	207.08	255.92	273.97
	$B_{2020}/10^4$ t	299.14	299.14	298.33	372.77
敏感性分析方案 Sensitivity analysis scenario	MSY/ 10^4 t	24.33	20.06	24.18	29.72
	F_{MSY}	0.097	0.081	0.096	0.120
	$F_{0.1}$	0.087	0.073	0.086	0.108
	F_{2020}	0.051	0.040	0.050	0.055
	$B_{\text{MSY}}/10^4$ t	252.12	208.34	256.78	274.33
	$B_{2020}/10^4$ t	303.21	230.89	302.18	383.40

注: MSY: 最大可持续产量 Maximum sustainable yield; F_{MSY} : 渔业达到 MSY 水平时的捕捞死亡系数 The fishing mortality coefficient when the fishery reaches the maximum sustainable yield level; $F_{0.1}$: 平衡渔获量和捕捞死亡系数关系曲线最大斜率的 10%对应的捕捞死亡系数 The fishing mortality coefficient corresponding to 10% of the maximum slope of the relationship curve between balanced catch and fishing mortality coefficient; F_{2020} : 渔业在 2020 年的捕捞死亡系数 The fishing mortality coefficient for fisheries in 2020; B_{MSY} : 渔业达到 MSY 水平时的生物量 The biomass when the fishery reaches the maximum sustainable yield level; B_{2020} : 渔业在 2020 年的生物量 The biomass of fisheries in 2020。



(蓝线展示了 B/B_{MSY} 和 F/F_{MSY} 在 2001—2020 年的变化。The blue line shows the interannual variation of B/B_{MSY} and F/F_{MSY} between 2001 and 2020.)

图 4 资源开发状态变化图

Fig. 4 Diagram of changes in resource development status

当收获率为 0.06 时,风险分析表明资源状况并不十分乐观。在基准方案下, B_{2030}/B_{MSY} 的概率期望值为 0.96,敏感性分析方案为 0.99。对于 $B_{2030} > B_{\text{MSY}}$,基准方案和敏感性分析方案的概率期望值分别为 0.53 和 0.56。对于 $B_{2030} < B_{\text{MSY}}/4$,基准方案和敏感性分析方案的概率期望值分别为 0.03 和 0.04。这表明该情况下,2030 年的生物量与 B_{MSY} 非常接近且出现资源崩溃的可能,但生物量大于 B_{MSY} 的概率较小,此时的资源状况已出现衰退倾向,若继续保持 0.06 的收获率,将来资源崩溃的可能性会大大增加。

从渔业管理的角度出发,通过分析表 4 可知,当收获率为 0.04 时,基准方案和敏感性分析方案中 $B_{2030} > B_{2020}$ 的概率期望值均大于 0.6, $B_{2030} > B_{\text{MSY}}$ 的概率期望值均大于 0.8,且 $B_{2030} < B_{\text{MSY}}/4$ 的概率期望值较小,所以,将收获率控制在 0.04 左右是较为保守的决策,此时对应的持续渔获量在 20×10^4 t 左右。此时资源

量会维持在较高水平且不会出现资源崩溃的状况。

3 讨论与分析

3.1 先验和后验概率分布

贝叶斯方法是利用统计数据(如渔获量和 CPUE 等)与先验概率分布相结合,从而推断出后验概率分布的统计学方法^[27]。先验概率分布可以依据以往的研究结果,也可以参考研究者的主观判断。由于先验概率分布会对资源评估结果产生影响,选择了不合理的先验概率分布可能会导致错误的结果,所以对先验概率分布的推断目前仍有争议^[19]。因此,需要选择正确的先验概率分布,以避免后验概率分布结果完全被先验

概率所主导^[28]。

在本研究中,三疣梭子蟹资源评估方面的参考资料较少,信息不足,只能依据已有的研究结果设定模型参数 K 、 q 、 r 的先验概率分布^[15]。因此,为了减少先验分布对后验分布的影响,在基准方案中,我们选择了范围较大的均匀分布,同时设置了敏感性分析方案进行比较分析。从后验分布来看,参数 K 、 q 、 r 与先验的均匀分布相比差异很大,说明本研究采用的数据提供了充足的信息;敏感性分析方案下的后验分布与基准方案下的后验分布十分相似,说明资源评估的结果受到模型参数先验概率分布的影响十分有限。

表 4 两种方案下管理决策和风险分析的指标
Table 4 Management decision and risk analysis indicators under the two schemes

方案 Scenario	收获率 Harvest rate	$B_{2030}/10^4 \text{ t}$	$C_{2030}/10^4 \text{ t}$	B_{2030}/B_{MSY}	B_{2030}/K	$P(B_{2030} > B_{2020})$	$P(B_{2030} > B_{\text{MSY}})$	$P(B_{2030} < B_{\text{MSY}}/4)$
基准方案 Base scenario	0.01	410.14	6.58	1.65	0.82	1.00	1.00	0.00
	0.02	373.63	12.37	1.50	0.75	0.98	1.00	0.00
	0.03	337.49	16.19	1.36	0.68	0.88	0.94	0.00
	0.04	304.40	20.70	1.22	0.61	0.67	0.81	0.01
	0.05	271.11	22.60	1.08	0.54	0.51	0.68	0.02
	0.06	239.47	22.98	0.96	0.48	0.30	0.53	0.03
	0.07	213.38	22.04	0.85	0.43	0.20	0.41	0.05
	0.08	189.86	23.35	0.76	0.38	0.12	0.31	0.09
敏感性分析方案 Sensitivity analysis scenario	0.01	421.28	6.99	1.67	0.83	1.00	1.00	0.00
	0.02	383.16	12.66	1.52	0.76	0.97	1.00	0.00
	0.03	350.01	17.49	1.39	0.69	0.86	0.96	0.00
	0.04	313.23	20.93	1.24	0.62	0.67	0.85	0.01
	0.05	283.91	23.77	1.12	0.56	0.48	0.73	0.02
	0.06	249.82	23.78	0.99	0.50	0.29	0.56	0.04
	0.07	215.02	23.02	0.85	0.43	0.17	0.43	0.06
	0.08	183.24	22.54	0.72	0.36	0.10	0.31	0.09

注: B_{2030} : 2030 年管理结束时生物量的期望值 Expected value of biomass at the end of management by 2030; C_{2030} : 管理策略实施后 2030 年渔获量的期望值 Expected value of catch by 2030 after the implementation of management strategies; B_{2030}/B_{MSY} : 2030 年生物量的期望值与渔业达到 MSY 水平时生物量的期望值之比 The ratio of expected value of biomass in 2030 to the expected value of biomass when the fishery reaches the maximum sustainable yield level; B_{2030}/K : 2030 年生物量的期望值与环境容纳量之比 The ratio of expected value of biomass to environmental capacity in 2030; $P(B_{2030} > B_{2020})$: 2030 年生物量的期望值大于 2020 年生物量的期望值的概率 The probability that the expected value of biomass in 2030 is greater than the expected value of biomass in 2020; $P(B_{2030} > B_{\text{MSY}})$: 2030 年生物量的期望值大于渔业达到 MSY 水平时生物量的期望值的概率 The probability that the expected value of biomass in 2030 is greater than the expected value of biomass when the fishery reaches the maximum sustainable yield level; $P(B_{2030} < B_{\text{MSY}}/4)$: 2030 年生物量的期望值小于渔业达到 MSY/4 水平时生物量的期望值的概率 The probability that the expected value of biomass in 2030 is less than the expected value of biomass when the fishery reaches the 1/4 level of the maximum sustainable yield.

3.2 当前资源状况评价及未来管理策略分析

当前东海北部海域三疣梭子蟹资源状况相对乐观,在近年来并未遭受到过度捕捞且三疣梭子蟹的资源状况良好。本研究得出的捕捞死亡系数 F 较小,可能是由于三疣梭子蟹适应力强、存活率较高且增殖放流数量大,使得三疣梭子蟹资源量维持在较高水平,因此估算出的捕捞死亡系数 F 较小。本研究得出的三疣梭子蟹的 MSY 约为 24×10^4 t,这一结果不同于 Wang 等^[15] 研究结果。Wang 等^[15] 研究显示,假设三疣梭子蟹的捕捞强度和放流数量保持在 2015 年的水平,三疣梭子蟹的 MSY 约为 14.2×10^4 t。造成结果不同的原因可能是采用了不同的评估方法或所用数据的时间跨度不同。Wang 等^[15] 使用的是传统的非平衡剩余产量模型,评估所使用的数据是 2001—2015 年间的渔业统计数据。当采用相同时间跨度的数据(2001—2015 年)时,使用贝叶斯方法得到的 MSY 为 19×10^4 t,与 Wang 等^[15] 14×10^4 t 的研究结果差异明显缩小。具体分析可得,2001—2015 年的年产量均值约为 10.4×10^4 t,而采用 2001—2020 年的渔业统计数据算出的年产量均值约为 12.1×10^4 t。2015 年的年产量约为 18.5×10^4 t,与本文评估得到的 MSY 值更接近。对于 Wang 等^[15] 未使用的时间段即 2016—2020 年,东海北部海域三疣梭子蟹的年产量均值约为 17.0×10^4 t,明显大于 2001—2015 年的均值,且 2001—2015 年 CPUE 均值也偏小。对数据趋势分析可得,2013—2020 年的 CPUE 均值明显大于 2001—2012 年,且 2013 年之后三疣梭子蟹年产量相较于之前明显增加,2015 年之后的产量虽略有下降,但总体仍保持较高水平。因为本文采用的数据时间跨度为 20 年,故后期研究海域三疣梭子蟹统计数据的变化可能会对模型产生较大影响,导致评估结果(如 MSY)数据变大。由此可见,采用不同时间段的数据做出的评估结果可能会产生差异,影响主要来自渔获量和捕捞努力量的年际变化趋势。因此,全面且准确的长时间序列数据对于评估 MSY 及相关的生物学参考点至关重要。

渔业资源管理的主要目标是通过合理的调控与科学的管理,从渔业资源中获得最佳的可持续利益。这就要求在对渔业管理策略进行选择时,应从多角度考虑,要在保证渔业资源可持续开发利用状态与获得高渔获量之间进行全面权衡。综合两种方案下的管理策略和风险指标分析结果可知,若要获取最大产量,应将收获率控制在 0.06。但风险分析表明,此时的资源状况并不乐观。若将收获率设定为 0.06 开展捕捞活动,三疣梭子蟹资源会出现过度捕捞现象,甚至有可能出现资源崩溃的情况。所以,将收获率设置为 0.06 对资源的可持续发展来说存在很大风险。

从资源保护的角度来看,将三疣梭子蟹资源的收获率控制在 0.03 时,资源量会维持在较高的水平且不会出现资源崩溃的状况。从经济收益的角度来看,将收获率控制在 0.05 时,基准方案和敏感性分析方案中 2030 年最大渔获量期望值与结果中最大值非常接近,且出现资源崩溃的可能性较低。但在大多数渔业已经出现衰退趋势的现状下,我们应采取使资源状况更安全的策略作为最佳管理策略。对利益及其存在的风险进行权衡后得出,0.04 的收获率在未来 10 年的管理期内是较合理且保守的管理策略。

3.3 研究的不足和展望

本研究分基准和敏感性分析两种方案,使用了与贝叶斯方法相结合的 Schaefer 剩余产量模型,对东海北部海域三疣梭子蟹的资源状况进行了评估,并估算了三疣梭子蟹资源在 2030 年恢复到健康水平的概率和崩溃的概率。研究结果可为三疣梭子蟹资源养护和可持续利用提供有利支持,为制定科学合理的渔业管理策略提供参考。

但是,本研究仍然存在一些不足和需改善之处。第一,模型参数的不确定性,本研究假设了 CPUE 数据的标准差 σ 为 0.2,该值的假设对评估结果造成的影响需要进一步研究与分析。第二,本研究采用的生产数据时间段为 2001—2020 年,因此模型参数的结果只能较客观地反映这一时期的渔业状态。由于三疣梭子蟹属于易受环境影响的短生命周期物种,且渔业统计年鉴中对该种的统计也存在误差,因此,基于 2001—2020 年间估算出的模型参数对其未来的渔业资源变化进行的预测会存在一定的不确定性。第三,三疣梭子蟹是东海北部海域重要的增殖放流种类之一,每年幼蟹放流数量达到几千万尾,而本研究并未将该影响纳入模型评估当中,这无疑会对资源评估结果产生一定的影响。今后的研究中,我们将继续积累更多的统计和调查数据,进一步完善评估模型,在评估过程中充分考虑环境因子和增殖放流等因素的影响,并尝试使用生态系统模型对三疣梭子蟹的 MSY 开展评估,为合理开发、有效保护三疣梭子蟹资源提供科学参考。

参考文献:

- [1] He J, Gao Y, Wang W, et al. Limb autotomy patterns in the juvenile swimming crab (*Portunus trituberculatus*) in earth ponds [J]. Aquaculture, 2016, 463: 189-192.
- [2] 宋海棠, 俞存根, 薛利建, 等. 东海经济虾蟹类[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 83-85.
Song H T, Yu C G, Xue L J, et al. The Economical Crabs and Shrimps in East China Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 83-85.
- [3] Liu S, Sun J, Hurtado L A. Genetic differentiation of *Portunus trituberculatus*, the world's largest crab fishery, among its three

- main fishing areas[J]. Fisheries Research, 2013, 148: 38-46.
- [4] 俞存根, 宋海荣, 姚光展. 东海大陆架海域蟹类资源量的评估[J]. 水产学报, 2004, 28(1): 41-46.
- Yu C G, Song H T, Yao G Z. Assessment of the crab stock biomass in the continental shelf waters of the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(1): 41-46.
- [5] Ariyama H, Secor D H. Effect of environmental factors, especially hypoxia and typhoons, on recruitment of the gazami crab *Portunus trituberculatus* in Osaka Bay, Japan[J]. Fisheries Science, 2010, 76(2): 315-324.
- [6] 廖永岩, 肖展鹏, 袁耀阳. 三疣梭子蟹幼体和幼蟹的温度适应性[J]. 水生生物学报, 2008, 32(4): 534-543.
- Liao Y Y, Xiao Z P, Yuan Y Y. Temperature tolerance of larva and juvenile of *Portunus trituberculatus* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2008, 32(4): 534-543.
- [7] 钱丽君, 张德民, 徐小红. 应用 DGGE 分析三疣梭子蟹养殖塘底泥细菌的多样性[J]. 水产学报, 2007, 31(2): 204-210.
- Qian L J, Zhang D M, Xu X H. Bacterial diversity of *Portunus trituberculatus* pond sediment estimated by denaturing gradient gel electrophoresis[J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(2): 204-210.
- [8] 许文军, 施慧, 徐汉祥, 等. 养殖梭子蟹血卵涡鞭虫感染的初步研究[J]. 水生生物学报, 2007, 31(5): 637-640.
- Xu W J, Shi H, Xu H X, et al. Preliminary study on the *Hemodinium* infection in cultured *Portunus trituberculatus* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007, 31(5): 637-640.
- [9] 张稳, 谢奉军, 金敏, 等. 饲料中 n-3 高不饱和脂肪酸含量对三疣梭子蟹幼蟹生长性能及脂肪酸组成的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(5): 1254-1264.
- Zhang W, Xie F J, Jin M, et al. Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acid content on growth performance and fatty acid composition of juvenile swimming crab (*Portunus trituberculatus*) [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(5): 1254-1264.
- [10] Jin M, Zhou Q C, Wang M Q, et al. Dietary arginine requirement of juvenile swimming crab, *Portunus trituberculatus* [J]. Aquaculture Nutrition, 2016, 22(6): 1174-1184.
- [11] Gao B Q, Liu P, Li J, et al. Effect of inbreeding on growth and genetic diversity of *Portunus trituberculatus* based on the full-sibling inbreeding families[J]. Aquaculture International, 2015, 23: 1401-1410.
- [12] 徐炳庆, 陈玮, 王田田, 等. 莱州湾“伏休”结束前三疣梭子蟹的资源状况及其分布特征[J]. 水产学报, 2021, 45(4): 543-551.
- Xu B Q, Chen W, Wang T T, et al. Resource status and distribution characteristics of *Portunus trituberculatus* before the end of summer fishing moratorium in Laizhou Bay [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(4): 543-551.
- [13] 栗小东, 王晶, 杨春蕙, 等. 基于两种机器学习方法分析东海北部海域三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)时空分布[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(5): 1284-1292.
- Li X D, Wang J, Yang C H, et al. Spatiotemporal distribution of *Portunus trituberculatus* in the Northern East China Sea based on two machine learning methods [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2021, 52(5): 1284-1292.
- [14] 林群, 王俊, 李忠义, 等. 黄河口邻近海域生态系统能量流动与三疣梭子蟹增殖容量估算[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3523-3531.
- Lin Q, Wang J, Li Z Y, et al. Assessment of ecosystem energy and carrying capacity of swimming crab enhancement in the Yellow River estuary and adjacent waters[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3523-3531.
- [15] Wang Y B, Gao L, Chen Y X. Assessment of *Portunus (Portunus) trituberculatus* (Miers, 1876) stock in the northern East China Sea[J]. Indian Journal of Fisheries, 2018, 65(4): 28-35.
- [16] Hilborn R, Walters C J. Quantitative fisheries stock assessment: Choice, dynamics and uncertainty[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 1992, 2(2): 177-178.
- [17] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001-2020.
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001-2020.
- [18] 许骆良, 陈新军, 汪金涛, 等. 基于 Schaefer 模型的东南太平洋茎柔鱼资源评估和管理[J]. 海洋学报, 2015, 37(10): 49-58.
- Xu L L, Chen X J, Wang J T, et al. Stock assessment and management of *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean with Schaefer model[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(10): 49-58.
- [19] 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.
- [20] 陈新军, 曹杰, 刘必林, 等. 基于贝叶斯 Schaefer 模型的西北太平洋柔鱼资源评估与管理[J]. 水产学报, 2011, 35(10): 1572-1581.
- Chen X J, Cao J, Liu B L, et al. Stock assessment and management of *Ommastrephes bartramii* by using a Bayesian Schaefer model in the Northwestern Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(10): 1572-1581.
- [21] Chen Y, Breen P A, Andrew N L. Impacts of outliers and misspecification of priors on Bayesian fisheries-stock assessment[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2000, 57(11): 2293-2305.
- [22] 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 G, Chen X J, Guan W J. 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.
- [23] Pauly D, Zeller D. Comments on FAOs state of world fisheries and aquaculture (SOFIA 2016) [J]. Marine Policy, 2017, 77: 176-181.
- [24] Millar R B, Meyer R. Bayesian state-space modeling of age-structured data: Fitting a model is just the beginning[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2000, 57(1): 43-50.
- [25] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 167-194.
- Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 167-194.
- [26] 官文江. R 语言在海洋渔业中的应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 264-268.
- Guan W J. Application of R Language in Marine Fishery[M].

- Beijing: China Ocean Press, 2015: 264-268.
- [27] Booth A J, Quinn T J. Maximum likelihood and Bayesian approaches to stock assessment when data are questionable[J]. Fisheries Research, 2006, 80(2):169-181.
- [28] Stobberup K A, Erzini K. Assessing mackerel scad, *Decapterus macarellus*, in Cape Verde: Using a Bayesian approach to biomass dynamic modelling in a data-limited situation[J]. Fisheries Research, 2006, 82(1): 194-203.

Stock Assessment and Management Decision Analysis of *Portunus trituberculatus* Inhabiting Northern East China Sea

Liu Ya, Wang Jing, Li Xiaodong, Wang Yingbin

(School of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: *Portunus trituberculatus* is an important economic crab species inhabiting northern East China Sea, and the assessment of its stock is the basis for its sustainable utilization. The Schaefer surplus production model based on Bayesian approach was used in this study to evaluate the resources of *P. trituberculatus* in northern East China Sea. At the same time, the current development and utilization status of *P. trituberculatus* resources were determined, and the biomass and annual total catch of *P. trituberculatus* under different harvest rates in the next 10 years were estimated. The risk of resource collapse of *P. trituberculatus* after the implementation of management strategy was analyzed. The results showed that the predicted values of model parameters and the estimated values of biological reference points were similar between the base scenario and sensitivity analysis scenario. The maximum sustainable yield (MSY) estimated using both scenarios was about 24×10^4 t, and the biomass corresponding to MSY B_{MSY} was about 252×10^4 t. The fishing mortality coefficient corresponding to MSY F_{MSY} is 0.096 for the base scenario and 0.097 for the sensitivity analysis scenario. From 2001 to 2020, the fishing mortality coefficients were all below and the biomass was largely above the level of B_{MSY} , indicating that *P. trituberculatus* had not been overfished in recent years. The decision analysis and risk analysis indicated that setting the harvest rate at around 0.04 is a more reasonable scenario for the sustainable use of *P. trituberculatus* resources.

Key words: *Portunus trituberculatus*; Bayesian method; surplus production model; management strategy; northern East China Sea; fishery resource

责任编辑 朱宝象