

基于贝叶斯 Schaefer 模型的西北太平洋柔鱼资源评估与管理

陈新军^{1,2,3*}, 曹杰¹, 刘必林^{1,2,3}, 陆化杰^{1,2,3}, 田思泉^{1,2,3}, 马金¹

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学大洋生物资源开发和利用上海市高校重点实验室, 上海 201306;

3. 上海海洋大学大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 利用基于贝叶斯统计方法的 Schaefer 模型分均匀分布、正态分布和随机分布 3 种方案, 对西北太平洋柔鱼资源量进行评估, 并对其管理策略做了风险分析。研究认为, 在均匀分布的基准方案下, 参数 r 、 K 和 q 的后验概率分布与先验概率分布存在较大差异, 这表明本研究采用的年渔获量和 CPUE 数据为贝叶斯资源评估模型提供了足够多的信息。正态分布和随机分布 2 种方案下模型参数的预测值及估算的最大可持续产量较接近, 但小于基准方案。研究认为, 3 种方案下, 1996—2004 年捕捞死亡率都远低于限制参考点 $F_{0.1}$, 1996—2004 年渔获量也小于最大可持续产量, 这表明目前西北太平洋柔鱼资源处于良好状况, 没有遭受过度捕捞。决策分析表明, 在相同的收获率情况下, 基准方案得到的 2019 年资源量和渔获量均大于其它 2 种方案, 但是资源崩溃的概率最大。保守的管理策略应将收获率控制在 0.3 左右, 持续渔获量在 13 万 t 左右。

关键词: 柔鱼; 贝叶斯 Schaefer 模型; 资源评估; 管理策略; 西北太平洋

中图分类号: S 932

文献标志码: A

柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 广泛分布北太平洋海域^[1-2], 我国于 1993 年对该资源进行了调查, 并于 1994 年开始了小规模鱿钓作业, 之后作业规模不断扩大, 产量稳定在 6~10 万 t 之间, 1998 年以后我国鱿钓产量约该种类总产量的 80% 以上^[3]。柔鱼通常分为中部秋生群、东部秋生群、西部冬春生群和中东部冬春生群等 4 个群体^[4-5], 其中西部冬春生群为我国鱿钓船的传统捕捞对象, 主要捕捞区域 38°N~46°N、165°E 以西海域^[3]。资源量估算是渔业资源科学管理和合理开发的基础。ICHII 等^[6]利用 ASPIC 模型、Delury 模型等对 1982—1992 年流刺网渔场秋生群的年资源量进行了估算; ICHII 等^[7]利用扫海面积法、Delury 模型和非平衡剩余产量模型对流刺网渔场秋生群的资源量进行评估; 村田守等^[8]、OSAKO 等^[9]、陈新军等^[10]和曹杰等^[11]也曾对西部冬春生群资源量进行了评估。以上学者

采用了不同的评估模型, 但并没有考虑资源评估中存在的诸多不确定性, 也没有明确地提出管理措施, 以及对管理措施进行风险分析。

近十多年来, 由于人们对渔业资源变动规律认识的深入, 资源评估模型中的不确定性和风险评估被应用到渔业资源评估研究中。在渔业中, 决策中的不确定性可能产生于不同的来源, 比如测量误差、过程误差、模型误差和操作误差^[12]。贝叶斯理论因为充分考虑了与模型以及参数值有关的不确定性, 被迅速应用到渔业资源评估中。该方法的优势在于能够在评估中遇到不确定的情况下为渔业管理提供不同的管理措施, 以降低管理策略实施的风险。为此, 本研究根据 1995—2004 年我国鱿钓渔业修正后的渔获量数据, 以剩余产量模型为基础, 运用贝叶斯统计方法对西北太平洋柔鱼进行资源评估以减少评估中的不确定性, 并对备选管理策略进行风险分析以寻求最

收稿日期: 2011-03-08 修回日期: 2011-05-22

资助项目: 教育部博士点基金(20093104110002); 上海市曙光计划跟踪计划(08GG14); 上海市优秀学科带头人计划(10XD1402000); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA092201; 2007AA092202); 上海市重点学科(S030702)

通讯作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

好的管理措施。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

采用 1995—2004 年我国西北太平洋 38° ~ 46°N、150° ~ 165°E 海域的柔鱼渔业生产统计数据,包括日捕捞量、作业天数、日作业船数和作业

区域(0.5° × 0.5° 为一个渔区)。CPUE 为每天的捕捞量(t/d)。所用 CPUE(t/d)数据经 GLBM 模型进行了标准化处理^[13],标准化后的年 CPUE 数据作为柔鱼资源丰度的相对指数。由于中国大陆鱿钓的年捕捞量占总捕捞量的 80%^[3],因此对 1995—2004 年柔鱼渔获量进行了修正(表 1)。

表 1 我国西北太平洋鱿钓渔业渔获量和 CPUE

Tab. 1 Catch and standardized CPUE data for the Chinese squid jigging fishery in the Northwest Pacific

年份 year	渔获量/t catch			CPUE/(t/d) standardized CPUE
	中国 China	其他国家和地区渔获量 catch from other countries and regions	合计 total	
1995	73 000	18 250	91 250	1.704
1996	83 000	20 750	103 750	1.617
1997	101 839	25 459.75	127 298.8	1.587
1998	117 000	29 250	146 250	2.037
1999	132 000	33 000	165 000	1.919
2000	124 204	31 051	155 255	2.426
2001	80 873	20 218.25	101 091.3	1.749
2002	84 487	21 121.75	105 608.8	1.673
2003	82 949	20 737.25	103 686.3	1.962
2004	106 532.2	26 633.05	133 165.3	1.901

1.2 非平衡剩余产量模型

非平衡剩余产量模型(Schaefer 剩余产量模型)可表达为

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

$$I_t = qB_t e^{\varepsilon_t - \frac{\sigma^2}{2}} \quad \varepsilon_t \subset N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

式中, B_t 为 t 年的资源量; r 为内禀自然增长率; K 为承载力, 未开发时的平衡资源量水平; C_{t-1} 为 $t-1$ 年的渔获量; q 为可捕系数。其中 r 、 K 、 q 和 B_0 为模型的参数。

在资源评估中, 通常假设最初一年的资源量等于 K , 这样剩余产量模型中的需要被估算的参数就从 4 个减少到 3 个^[14]。但这种假设只有在渔业开始的前一年其资源量已知情况下才有意义。由于日本早在 20 世纪 70 年代就开始对柔鱼进行捕捞, 因此本研究中不能将初始一年的资源量视为 K 。根据文献^[13]的研究结果, 假设 B_0 为 25 万 t。

1.3 似然函数

假设 CPUE 和资源量成正比, 并且观测误差

服从对数正态分布, 则似然函数的表达式为:

$$L(I|\theta) = \prod_{t=1998}^{2006} \frac{1}{I_t \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\log(I_t) - \log(qB_t)]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

由于获量和 CPUE 数据的时间序列太短而无法估算标准差 σ , 因此 σ 被设定 0.2^[14]。

1.4 模型参数先验分布的设定

根据所有已知的信息对模型参数的先验分布提出 3 种方案(表 2), 即基准方案(均匀分布)、正态分布方案和随机分布方案, 分别表示无信息先验分布、有信息先验分布和随机影响先验分布。由于柔鱼资源量受到环境因素的影响很大, 因此模型的参数 r 、 K 、 q 并不是恒定不变的。考虑环境因素变动对模型的参数 K 的影响, 研究表明西北太平洋柔鱼资源补充量与其产卵场适合水温范围呈正相关性, 范围越大其资源补充量亦越大^[15]。根据其适合水温范围大小变动的标准差对随机分布方案中 K 参数进行假设(表 2)。

对于内禀自然增长率, 已知的信息有 ICHII 等^[7]对北太平洋柔鱼秋生群体的研究结果, 其内

禀自然增长率 r 为 1.19。因此假设 r 的基准先验分布服从均匀分布 (0.5, 1.5), 正态先验分布服从正态分布 (1.19, 0.6²)。对于 K 的基准先验分布假设服从均匀分布 (30 万 t, 80 万 t), 下边界 30 万 t 大于 1995—2004 年的最大渔获量。为使上边界的值对后验概率的影响尽可能小, 上边界值

被设定为 80 万 t, 正态先验分布服从正态分布 (55, 27.5²)。对于可捕系数, 研究表明 q 值为 $3.31 \times 10^{-6} \sim 1.18 \times 10^{-5}$ ^[13], 因此假设 q 的基准先验分布服从均匀分布 ($1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$), 正态先验分布服从正态分布 [$1.5 \times 10^{-5}, (0.75 \times 10^{-5})^2$]。

表 2 剩余产量模型参数 r, K, q 的先验概率分布

Tab. 2 Scenarios for different settings of prior distributions for parameters of the surplus production model

方案 scenario	内禀自然增长率 r intrinsic rate of natural increase	承载力 K carrying capacity	可捕系数 q fishing coefficient
基准方案 uniform distribution	U(0.5, 1.5)	U(30, 80)	U($1 \times 10^{-6}, 3 \times 10^{-5}$)
正态分布 normal distribution	N(1.19, 0.6 ²)	N(55, 27.5 ²)	N($1.55 \times 10^{-5}, 0.75 \times 10^{-5}$)
随机分布 random distribution	N($U_r, 0.6^2$)	N($U_k, 27.5^2$)	N($U_q, 0.75 \times 10^{-5}$)

Notes: $U_r \sim N(1.19, 1), U_k \sim N(55, 1), U_q \sim N(0.15, 1)$ 。

1.5 模型参数后验概率分布的计算

利用 MCMC 方法来计算剩余产量模型的参数 r, K, q 的后验概率分布。MCMC 迭代计算时

各参数的初始值设定见表 3。共进行 20 000 次运算, 前 10 000 次结果舍弃, 后 10 000 次运算, 每 10 次对结果进行一次储存。

表 3 MCMC 计算剩余产量模型参数 r, K, q 的初始值设定

Tab. 3 Initial value for r, K, q of surplus production model of MCMC iterations

方案 scenario	内禀自然增长率 r intrinsic rate of natural increase	承载力 K /万 t carrying capacity	可捕系数 q fishing coefficient
基准方案 uniform distribution	0.6	40	0.000 005
正态分布 normal distribution	0.6	40	0.000 005
随机分布 random distribution	0.6	40	0.000 005

1.6 确定备选管理策略

以收获率作为西北太平洋柔鱼资源管理策略。收获率 (harvest rate) 是一种捕捞控制规则, 它规定每年捕捞相同比例 (尾数或资源量) 的鱼^[14]。备选收获率分别设定为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 和 0.8。因此, 未来 t 年的渔获量可通过下式进行计算:

$$C_t = h_t B_t e^\varepsilon \quad \varepsilon \subset N(0, 1^2) \quad (4)$$

式中, C_t 为管理期间 t 年的渔获量 (万 t); h_t 为收获率; B_t 为管理期间 t 年的资源量 (万 t); ε 为误差项。

1.7 生物学参考点估算

生物学参考点可分为目标参考点 (target reference points, TRP) 和限制参考点 (limit reference point, LRP)。目标参考点的设置是为了达到渔业管理的目标, 而限制参考点则是渔业管理中应该避免的状态。通常渔业管理希望获得 MSY

的同时, 并保持渔业资源处在可持续的稳定状态, 因此本文研究涉及到的生物学参考点有 $F_{MSY}, B_{MSY}, F_{0.1}$ 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:

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

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

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

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

本研究将以 $F_{0.1}$ 作为捕捞死亡系数的目标参考点 F_{targ} , 以 F_{MSY} 作为限制参考点 F_{lim} ; 将 B_{MSY} 作为资源量的目标参考点 B_{targ} , $B_{MSY}/4$ 作为

限制参考点 B_{lim} 。当捕捞死亡系数 F 大于 F_{lim} 时,则说明该资源正在遭受过度捕捞 (overfishing),反之,则没有遭受过度捕捞;当其资源量小于 B_{lim} 时,则说明该资源量水平很低,已经处于过度捕捞状态 (overfished),反之则未处于过度捕捞状态。

1.8 资源管理效果评价以及风险分析指标

利用建立指标和模拟管理策略来评估备选管理策略的实施效果以及风险,模拟管理策略从 2005 年开始一直持续到 2019 年,共 15 年。建立的指标包括:

(指标 1) 管理结束时的资源量,即 2019 年的资源量的期望值;

(指标 2) 管理策略实施后 2019 年渔获量的期望值;

(指标 3) 管理策略实施期间观察到的最低资源量 B_{min} ;

(指标 4) 2019 年柔鱼资源量与 B_{MSY} 之比的期望值 (B_{2019}/B_{MSY})

(指标 5) 2019 年柔鱼资源量的衰减率 (Depelction),即实施某一管理策略后,2019 年柔鱼资源量与 K 的比例 (B_{2019}/K);

(指标 6) 2019 年柔鱼资源量大于 2005 年柔鱼资源量的概率, $P(B_{2019} > B_{2005})$,它表示管理措施实施后资源较管理措施实施前资源回复的概率;

(指标 7) 2019 年柔鱼资源量大于 B_{MSY} 的概率 $P(B_{2019} > B_{MSY})$,它表示资源恢复到健康水平的概率;

(指标 8) 2019 年柔鱼资源量小于 $B_{MSY}/4$,即小于 $B_{MSY}/4$ 的概率 $P(B_{2019} < B_{MSY}/4)$,它表示管理措施实施后资源崩溃的概率。

计算机模拟按照以下步骤进行:(1) 在贝叶斯分析得到的 r 、 K 、 q 的后验分布中随机抽取一组数据,将 2004 年的资源量和收获率 (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 和 0.8) 代入非平衡剩余产量模型中进行计算,可得到 9 组不同收获率下的 2005—2019 年每年的资源量。(2) 重复步骤 (1) 1 000 次后得到 2005—2019 年每年不同收获率下的资源量 1 000 组。

利用指标 1 ~ 指标 8 建立管理决策和风险分析表对不同的备选管理措施进行分析。决策的原则依据期望收益最高、风险最小。

2 结果

2.1 模型参数后验概率分布

不同假设方案下模型参数的抽样过程以及后验概率分布见图 1。对于基准方案 (均匀分布), K 、 q 的后验概率分布与它们先验概率相比差异很大 (图 1-a), 这表明与先验概率分布相比, 数据对参数 K 、 q 的后验概率分布产生了很大影响。对于正态分布方案和随机分布方案, 参数 K 、 q 的后验概率分布与它们的先验概率分布率差异不大 (图 1-b 和图 1-c), 即后验概率分布基本服从正态分布 ($P < 0.05$)。3 种方案中参数 r 的后验概率分布与先验概率分布差距较大, 这表明在本研究的数据下参数 r 并不完全服从假设的分布类型。

不同假设方案下模型参数的预测值, 即参数后验概率分布的均值见表 4。其中 r 值的范围为 1.16 ~ 1.22, 基准方案下最小, 正态分布方案下最大; K 值的范围为 55.0 ~ 61.6 (万 t), 基准方案下最大, 正太分布方案下最小; 3 种方案下 q 值的大小几乎一致, 为 0.05×10^{-5} 。

2.2 当前柔鱼资源渔业状况分析

3 种不同方案下, 1996—2004 年柔鱼资源量和开发状况见图 2。3 种方案都表明, 当前柔鱼资源开发都处在一个良好的状态, 资源量保持在较高的水平且未遭受过度捕捞。3 种不同方案下估算的柔鱼生物学以及渔业参考点见表 5、表 6 和表 7。第二、三方案估算的 B_{MSY} 、 MSY 结果相近, 但明显小于基准方案估算的结果, 其中最小的 MSY 为随机方案估算的 16.535 万 t, 最小的 B_{MSY} 为正态分布方案估算的 27.523 万 t。然而第二、三方案估算的 $F_{0.1}$ 、 F_{MSY} 结果则略大于基准方案估算的结果, 其中最小的 $F_{0.1}$ 、 F_{MSY} 为基准方案估算的 0.530 和 0.589。无论对于哪种方案, 1996—2004 年的捕捞死亡率都远低于 $F_{0.1}$, 1996—2004 年的渔获量也小于 MSY 。

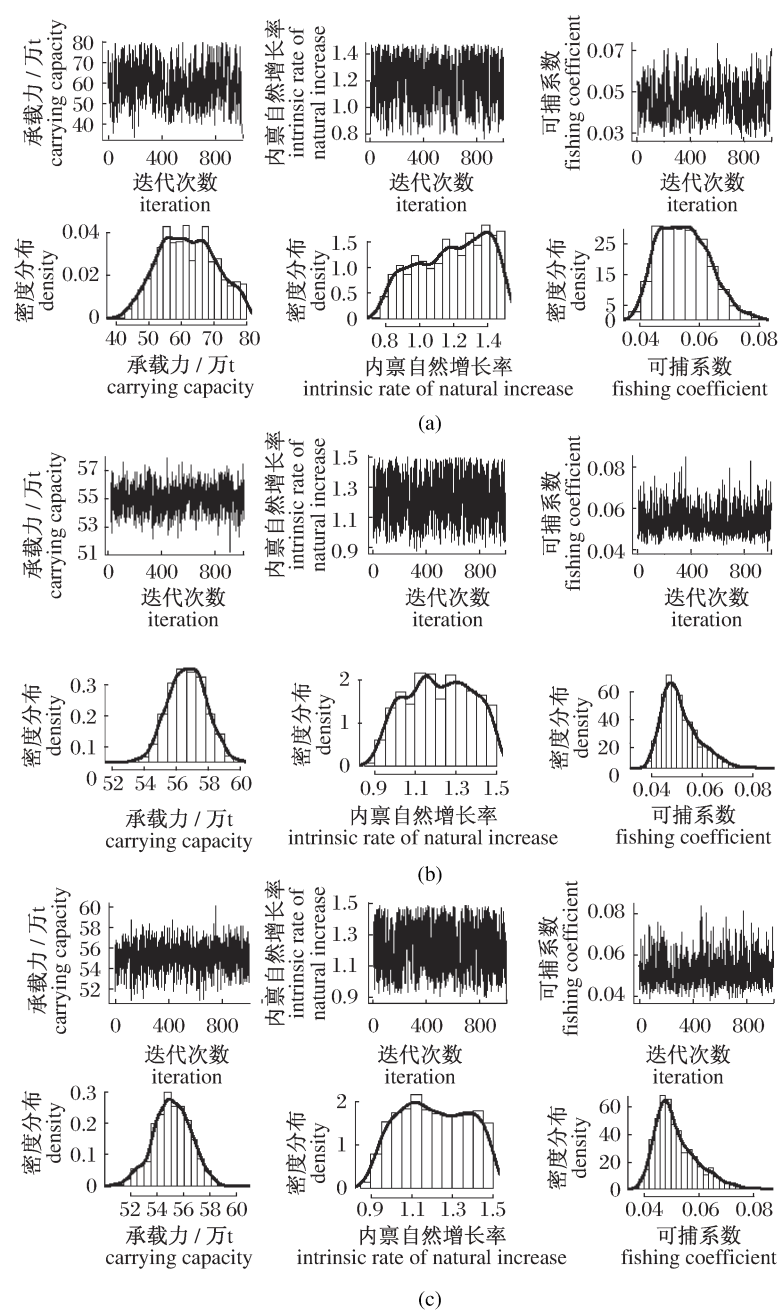


图1 不同方案下参数 K 、 r 、 q 的样本(上)和密度分布(下)

(a) 基准方案; (b) 正态分布; (c) 随机分布。

Fig.1 Plot of Markov-chain Monte Carlo traces(up) and density(low) for K, r, q under scenario of random effect

(a) uniform distribution; (b) normal distribution; (c) random distribution.

表4 不同方案下模型参数的后验概率平均值

Tab.4 Posterior means and coefficient of variations (CVs) for model parameters for the three prior scenarios

方案 scenario	内禀自然增长率 intrinsic rate of natural increase	承载力/万 t carrying capacity	可捕系数/ 10^{-4} fishing coefficient
基准方案 uniform distribution	1.16(0.22)	61.6(8.90)	0.050(0.01)
正态分布 normal distribution	1.22(0.21)	55.0(0.99)	0.051(0.01)
随机分布 random distribution	1.21(0.16)	55.1(1.40)	0.051(0.01)

注:括号内为变异系数。

Notes: The value represents the coefficient of variation in brackets.

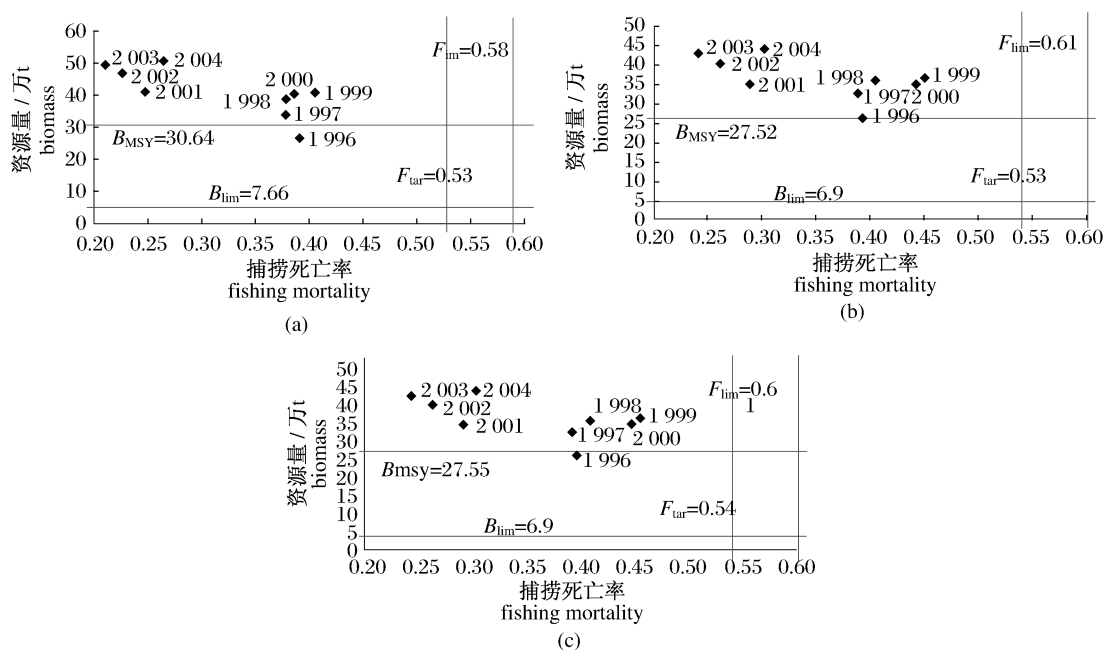


图 2 随机方案下 1996—2004 年柔鱼资源状况与生物学参考点的关系

(a) 基准方案; (b) 正态分布; (c) 随机分布。

Fig. 2 Relationship between neon flying squid stock and biological reference points from 1996 to 2004 under different scenarios

(a) uniform distribution; (b) normal distribution; (c) random distribution.

表 5 基准方案下估算的生物学参考点和捕捞死亡系数的统计量

Tab. 5 Summary statistics for the estimated BRPs for the scenario of uniform prior distribution

参数 parameter	中值 median	平均值 mean	2.50% 分位数 2.50% quantile	25% 分位数 25% quantile	75% 分位数 75% quantile	97.50% 分位数 97.50% quantile
q	0.048 8	0.049 5	0.031 4	0.040 6	0.057 2	0.071 7
K	61.270	61.557	44.989	54.775	67.918	78.560
r	1.178	1.160	0.752	0.976	1.355	1.486
B_{MSY}	30.635	30.779	22.495	27.387	33.959	39.280
MSY	18.044	17.849	8.453	13.365	23.011	29.186
$F_{0.1}$	0.530	0.522	0.338	0.439	0.610	0.669
F_{MSY}	0.589	0.580	0.376	0.488	0.678	0.743

注: K, B_{MSY}, MSY 的单位为万 t。Notes: The units of K, B_{MSY}, MSY are all ten thousands tonnes.

表 6 正态分布方案下估算的生物学参考点和捕捞死亡系数的统计量

Tab. 6 Summary statistics for the estimated BRPs for the scenario of normal prior distribution

参数 parameter	中值 median	平均值 mean	2.50% 分位数 2.50% quantile	25% 分位数 25% quantile	75% 分位数 75% quantile	97.50% 分位数 97.50% quantile
q	0.049 9	0.051 3	0.040 9	0.046 2	0.055 2	0.068 2
K	55.045	55.045	53.160	54.360	55.720	56.960
r	1.216	1.216	0.940	1.092	1.343	1.484
B_{MSY}	27.523	27.522	26.580	27.180	27.860	28.480
MSY	16.727	16.738	12.492	14.837	18.711	21.133
$F_{0.1}$	0.547	0.547	0.423	0.491	0.604	0.668
F_{MSY}	0.608	0.608	0.470	0.546	0.672	0.742

注: K, B_{MSY}, MSY 的单位为万 t。Notes: The units of K, B_{MSY}, MSY are all ten thousands tonnes.

表 7 随机方案下估算的生物学参考点和捕捞死亡系数的统计量

Tab. 7 Summary statistics for the estimated BRPs for the scenario of random effect

参数 parameter	中值 median	平均值 mean	2.50% 分位数 2.50% quantile	25% 分位数 25% quantile	75% 分位数 75% quantile	97.50% 分位数 97.50% quantile
q	0.049 9	0.051 8	0.041 1	0.046 4	0.056 2	0.070 9
K	55.095	55.098	52.200	54.158	56.075	57.751
r	1.201	1.208	0.928	1.075	1.350	1.484
B_{MSY}	27.548	27.549	26.100	27.079	28.037	28.875
MSY	16.535	16.636	12.106	14.555	18.925	21.426
$F_{0.1}$	0.540	0.543	0.417	0.484	0.608	0.668
F_{MSY}	0.600	0.604	0.464	0.538	0.675	0.742

注: K, B_{MSY}, MSY 的单位为万 t。

Notes: The units of K, B_{MSY}, MSY are all ten thousands tonnes.

2.3 管理决策分析

由表 8 可知, 正态分布和随机方案的各项指

标比较接近, 而与基准方案的指标差异较大。如
在各收获率下, 2019 年资源量和渔获量的期望

表 8 不同收获率时基准方案、正态分布方案和随机方案的管理策略以及风险分析指标

Tab. 8 Summary statistics for the estimated index for management and risk analysis under the scenarios of uniform, normal distribution and random effect

收获率 harvesting rate	2019 年资源 量/万 t biomass in 2019	2019 年渔 获量/万 t catch in 2019	B_{min}	$B_{2019}/$ B_{MSY}	$B_{2019}/$ K	概率 P ($B_{2019} >$ B_{2005})	概率 P ($B_{2019} >$ B_{MSY})	概率 P ($B_{2019} <$ $B_{MSY}/4$)	
0	方案 1 scenario 1	61.93	0	42.26	2.00	1.00	0.52	1.00	0.00
	方案 2 scenario 2	55.05	0	51.25	2.00	1.00	0.57	1.00	0.00
	方案 3 scenario 3	55.12	0	50.86	2.00	1.00	0.57	1.00	0.00
0.1	方案 1 scenario 1	56.47	5.65	38.19	1.82	0.91	0.52	1.00	0.00
	方案 2 scenario 2	50.42	5.04	47.03	1.83	0.92	0.57	1.00	0.00
	方案 3 scenario 3	50.48	5.05	45.76	1.83	0.92	0.57	1.00	0.00
0.2	方案 1 scenario 1	51.00	10.20	33.82	1.65	0.82	0.66	1.00	0.00
	方案 2 scenario 2	45.78	9.16	41.49	1.66	0.83	0.57	1.00	0.00
	方案 3 scenario 3	45.83	9.17	40.40	1.66	0.83	0.57	1.00	0.00
0.3	方案 1 scenario 1	45.53	13.66	29.31	1.47	0.74	0.61	0.97	0.00
	方案 2 scenario 2	41.15	12.35	35.32	1.49	0.75	0.46	1.00	0.00
	方案 3 scenario 3	41.19	12.36	34.52	1.49	0.75	0.48	1.00	0.00
0.4	方案 1 scenario 1	40.06	16.02	24.80	1.30	0.65	0.56	0.79	0.00
	方案 2 scenario 2	36.52	14.61	29.15	1.33	0.66	0.44	1.00	0.00
	方案 3 scenario 3	36.54	14.62	28.64	1.33	0.66	0.43	1.00	0.00
0.5	方案 1 scenario 1	34.59	17.30	17.06	1.12	0.56	0.52	0.52	0.00
	方案 2 scenario 2	31.89	15.95	22.98	1.16	0.58	0.43	1.00	0.00
	方案 3 scenario 3	31.90	15.95	22.75	1.16	0.58	0.43	1.00	0.00
0.6	方案 1 scenario 1	29.14	17.49	7.99	0.94	0.47	0.50	0.28	0.00
	方案 2 scenario 2	27.26	16.36	16.85	0.99	0.50	0.43	0.97	0.00
	方案 3 scenario 3	27.25	16.35	16.90	0.99	0.50	0.43	0.97	0.00
0.7	方案 1 scenario 1	23.80	16.66	2.75	0.77	0.39	0.49	0.09	0.03
	方案 2 scenario 2	22.64	15.85	10.95	0.82	0.41	0.43	0.73	0.00
	方案 3 scenario 3	22.62	15.83	11.22	0.82	0.41	0.43	0.72	0.00
0.8	方案 1 scenario 1	18.71	14.97	0.71	0.61	0.30	0.48	0.01	0.15
	方案 2 scenario 2	18.05	14.44	5.85	0.66	0.33	0.43	0.39	0.00
	方案 3 scenario 3	18.02	14.42	6.20	0.66	0.33	0.43	0.41	0.00

注: 资源量和渔获量的单位为万 t。

Notes: The units of biomass and catch are all ten thousands tonnes.

值,基准方案要明显大于其它两个方案。各方案下得出的 2019 年最大渔获量期望值都是在收获率为 0.6 时获得的,分别为 17.49 万 t(基准方案)、16.36 万 t(正态分布方案)和 16.35 万 t(随机方案),这表明如果要获取 2005—2019 年最大持续产量,应该将收获率控制在 0.6 左右,此时对应的资源量在 27.25 ~ 29.14 万 t。

然而收获率为 0.6 时的风险分析表明,基准方案最不乐观,基准方案观测到的 2019 年最低资源量仅为 7.99 万 t,而正态分布方案和随机方案分别为 16.85 万 t 和 16.90 万 t。基准方案时 B_{2019}/B_{MSY} 比值为 0.94,而正态分布方案和随机方案接近 1,均为 0.99;而对于 $P(B_{2019} > B_{MSY})$ 的结果,基准方案和其它两个方案相差很大,基准方案认为 2019 年资源量大于 B_{MSY} 的概率仅为 0.28,而其它两个方案则一直为 0.97;对于 $P(B_{2019} < B_{MSY}/4)$ 的结果,3 种方案的概率都为 0.00。综合以上分析,在基准方案下且收获率为 0.6 时,2019 年的资源量接近 B_{MSY} 并不会出现资源的崩溃,但是 2019 年资源量大于 B_{MSY} 的概率非常小,这表明资源量已出现衰退趋势,若继续保持 0.6 的收获率将来资源量有可能会出现崩溃;而正态分布方案和随机方案都表明,收获率为 0.6 时 2019 年资源量维持在高水平上且大于 B_{MSY} 的概率相当高,基本没有崩溃的危险,若继续保持 0.6 左右的收获率将来资源量也基本不会出现崩溃。

对于给定的收获率,基准方案下的资源量和渔获量最高,但其决策分析最不乐观,而正态分布方案和随机方案下的指标基本一致。对于基准方案保守的决策应将收获率控制在 0.3 左右,持续渔获量在 13 万 t 左右;对于正态分布方案和随机方案保守的决策应将收获率控制在 0.5 左右,持续渔获量为 16 万 t 左右,既能保证较高的渔业产量也能维持资源量的高水平。

3 分析与讨论

3.1 先验和后验概率分布分析

贝叶斯方法中先验概率分布的假设和选择对于估算模型后验概率分布起着极为重要的作用。目前对如何推断先验概率分布仍存在很多争议^[16],其中一个主要原因是选择的先验概率分布对资源评估结果会产生影响^[17-18],甚至导致错误的结果^[19]。比如,如果所用的数据不是有信息

的,那么后验概率的估算结果可能完全由先验概率主导和控制^[19-20]。

本研究中,对于模型参数 K 、 q 、 r 的先验概率分布设定主要依据已有的研究结果^[8,13,15]。参数 K 、 q 、 r 的先验概率分布被设定为 3 种方案,分别为均匀分布方案、正态分布方案和随机方案,其中正态分布方案与随机方案的模型输出结果相似且参数 K 、 q 的后验概率分布接近先验概率分布类型(正态分布),表明资源评估的结果对模型参数的先验概率分布可能不是很敏感。然而均匀分布方案下模型输出结果较其余两种方案差距较大且参数 K 、 q 的后验概率分布与先验概率分布相差较大,后验概率分布类型更接近正态分布。无论哪种方案参数 r 的后验概率分布与先验概率分布都相差较大,表明本研究的数据给贝叶斯分析带来了足够的信息。

3.2 不确定性分析

本研究的不确定性主要来自两方面:原始数据的不确定性,本研究的数据仅来自中国大陆鱿钓生产数据,虽然经过修正但还可能存在一定的不确定性;模型参数的不确定性,本研究假设了模型参数初始资源量即 1995 年的初始资源量为 25 万吨,敏感性分析的结果表明不同初始资源量的值对前几年资源量的评估有一定的影响。同时,假设了 CPUE 数据的标准差 σ 为 0.2,该值的假设如何对评估评估结果或者模型选择产生何种研究,需要进一步研究与评价。另外,本研究使用的贝叶斯剩余产量模型基于 1995—2004 年的鱿钓生产数据,模型参数的结果只能反映 1995—2004 年间的渔业信息,由于西北太平洋柔鱼属于短生命周期鱼类,其种群动态过程受到环境的影响很大,因此基于 1995—2004 年间估算出的模型参数若用于计算或预测今后环境变动或者渔业本身的变化超出 1995—2004 年间提供的信息范围时会存在一定的风险。

3.3 当前资源状况评价及今后管理策略分析

就目前柔鱼资源状况,本研究结果持乐观的态度。从捕捞死亡系数上看,1996—2004 年捕捞死亡系数均低于 F_{tar} ,这表明了近年来柔鱼没有遭受过过度捕捞;从资源量水平上看,1996—2004 年的资源量都在 B_{MSY} 水平之上,这表明了近年来柔鱼资源量都维持在较高的水平上。本研究认为,柔鱼的 MSY 为 16 万 t 左右,这一结果与前人

研究结果^[3,8-10]有一定的出入。误差可能来自不同评估模型、模型参数的设置等。管理策略研究和分析结果表明,渔获量最大时的收获率为 0.6,但是若将管理策略定为收获率 0.6,则 2019 年以后资源量存在着一定风险。研究认为,最为保守的管理策略应将收获率控制在 0.3 左右,持续渔获量在 13 万 t 左右。

4 小结

研究结果表明,当前西北太平洋柔鱼资源状况处在良好状态,资源量基本维持在较高的水平。目前捕捞死亡率也不高,基本在 0.25 左右,远低于 $F_{0.1}$,渔获量也低于 MSY。对于给定的备选管理策略收获率,三种假设的模型参数先验概率分布类型方案(均匀分布、正态分布、随机分布),得出的效果评价和风险分析结果不同。均匀分布方案下,资源量和渔获量大于其余两种方案但风险很大,保守的管理策略应将收获率控制在 0.3 左右,持续渔获量在 13 万 t 左右。

参考文献:

- [1] 王尧耕,陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业[M]. 北京:海洋出版社,2005:152-153.
- [2] 陈新军,刘必林,王尧耕. 世界头足类[M]. 北京:海洋出版社,2009:60-69.
- [3] CHEN X J, CHEN Y, TIAN S Q, *et al.* An assessment of the west winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean [J]. Fisheries Research, 2008,92(2-3):221-230.
- [4] YATSU A, TANAKA H, MORI J. Population structure of the neon flying squid, *Ommastrephes bartamii*, in the North Pacific [C] // Okutani T. (Ed.), Contributed papers to International Symposium on Large Pelagic Squids. Japan Marine Fishery Resources Research Center, Tokyo, 1998: 31-48.
- [5] NAGASAWA K, MORI J, OKAMURA H. Parasites as biological tags of stocks of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the North Pacific Ocean [C] // OKUTANI T (Ed.), Contributed Papers to International Symposium on Large Pelagic Squids. Japan Marine Fishery Resources Research Center, Tokyo, 1998:49-64.
- [6] ICHII T, MAHAPATRA K. Stock assessment of the autumn cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the North Pacific based on the past driftnet fishery data. Report of the 2004 Meeting on Squid Resources [R]. Japan Sea National Fisheries Research Institute, Niigata, 2004: 21-34 (in Japanese).
- [7] ICHII T, MAHAPATRA K, OKAMURA H, *et al.* Stock assessment of the autumn cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the North Pacific based on past large-scale high seas driftnet fishery data [J]. Fisheries Research, 2006, 78 (2-3): 286-297.
- [8] 村田守, 鸠津靖彦. 北西太平洋海域におけるアカイカ資源特性値について[R]. 北水研報告, 1982,47:1-10.
- [9] OSAKO M, MURATA M. Stock assessment of cephalopod resources in the northwestern Pacific [R] // CADDY J F. (Ed.), Advances in Assessment of World Cephalopod Resources. FAO Fish Tech Paper, 1983,231:5-144.
- [10] 陈新军,钱卫国,刘必林,等. 利用衰减模型评估柔鱼西部冬春生群体资源[J]. 海洋湖沼通报,2008(2):130-140.
- [11] 曹杰,陈新军,田思泉,等. 基于世代分析法的西北太平洋柔鱼冬春生西部群体资源评估和管理[J]. 中国海洋大学学报,2010,40(3):37-42.
- [12] QUINN T J, DERISO R B. Quantitative Fish Dynamics[M]. NY:Oxford University Press,1999.
- [13] 曹杰. 西北太平洋柔鱼资源评估与管理[D]. 上海:上海海洋大学,2010.
- [14] MCALLISTER M K, KIRKWOOD G P. Bayesian stock assessment: a review and example application using the logistic model [J]. ICES Journal Marine Science, 1998,55(6):1031-1060.
- [15] CAO J, CHEN X J, CHEN Y. Influence of surface oceanographic variability on abundance of the western winter-spring stock of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwest Pacific Ocean [J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 381:119-127.
- [16] WALTERS C J, LUDWIG D. Calculation of Bayes posterior probability distribution for key population parameters: a simplified approach [J]. Canada Journal Fishery Aquat Science, 1994,51:713-722.
- [17] CHEN Y, BREEN P A, ANDREW N L. Impacts of outliers and misspecification of priors on Bayesian fisheries-stock assessment [J]. Canada Journal Fishery Aquat Science, 2000,57:2293-2305.
- [18] MCALLISTER M K, PIKITCH P 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]. Canada Journal Fishery Aquat Science, 2001, 58: 1871 – 1890.
- [19] PUNT A E, HILBORN R. BAYES-SA: Bayesian stock assessment methods in fisheries. User's manual [R]. FAO Computerized Information Series (Fisheries). No. 12, Rome: FAO. 2001.
- [20] 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]. Fishery Research, 2006, 82 (1 – 3): 194 – 203.

Stock assessment and management of *Ommartrephes bartramii* by using a Bayesian Schaefer model in the Northwestern Pacific Ocean

CHEN Xin-jun^{1,2,3*}, CAO Jie¹, LIU Bi-lin^{1,2,3}, LU Hua-jie¹, TIAN Si-quan^{1,2,3}, MA Jin¹

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

2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Resources Exploitation of Shanghai Education Commission,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

Abstract: The stock assessment and risk analysis of alternative management strategies for neon flying squid *Ommartrephes bartramii* were carried out by using a Bayesian Schaefer model, in which three conditions, i. e. uniform, normal and random prior assumptions, are considered. Comparing the prior distributions of model parameters (e. g. r , K and q) with the posterior distributions, they differed greatly under the scenario of uniform prior assumption, indicating that the data provide enough information for the value of model parameters. The estimated model parameters and reference points were similar under the scenarios of normal and random prior assumptions, but less than the values under the scenario of uniform prior assumption. The fishing mortalities and total catches from 1996 to 2004 were lower than reference points $F_{0.1}$ and MSY under three proposed scenarios, indicating that *O. bartramii* is on an expected sustainable exploited level and it is not in the state of over-fishing and over-fished. A stochastic decision-making framework was developed to incorporate the uncertainties in both the estimates of current fishing mortality (F_{cur}) and stock biomass (B_{cur}) and limited reference points of F_{lim} and B_{lim} . The results of decision analysis indicated that under the same harvest rate, the catch and biomass in 2019 from the uniform assumption are highest, which are more than that estimated from the other two assumptions, but there is the highest probability of the collapse of squid resources. It is concluded that the harvest rate of 0.3 appears to be the best management regulation and the MSY will attain at 130 thousand tons, which balance the desire for high yields and the healthy population.

Key words: *Ommartrephes bartramii*; Bayesian Schaefer model; stock assessment; management strategy; Northwestern Pacific Ocean

Corresponding author: CHEN Xin-jun. E-mail: xjchen@shou.edu.cn