

文章编号: 1674-5566(2019)03-0471-12

DOI:10.12024/jsou.20180502322

基于复合种群的阿根廷滑柔鱼资源评估和管理策略评价

李娜¹, 陈新军^{1,2,3,4,5}, 金岳¹

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 以西南大西洋阿根廷滑柔鱼为例, 利用基于贝叶斯统计方法的 Schaefer 模型分单一种群和复合种群 2 种种群方案, 对其资源量进行评估, 并对其管理策略做了风险分析。研究表明, 年渔获量数据和资源丰度指数数据为贝叶斯资源评估模型提供了足够多的信息。单一种群方案和复合种群方案下的模型参数的预测值及估算的最大可持续产量接近, 单一种群方案下的捕捞死亡率低于限制参考点 F_{lim} , 复合种群方案下的南部种群存在捕捞死亡率大于限制参考点 F_{lim} 的年份, 但随着捕捞死亡率的减小资源量恢复到良好水平。决策分析表明, 在单一种群方案和复合种群方案下, 当收获率设定为 0.3 及以下时, 资源能够保持在可持续利用的良好水平, 保守的管理策略可将收获率设定在 0.2 至 0.3, 相应的持续渔获量为 80 万 t 左右。

关键词: 阿根廷滑柔鱼; 复合种群; 贝叶斯 Schaefer 模型; 资源评估; 管理策略

中图分类号: S 932.8 **文献标志码:** A

阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*) 属头足纲 (Cephalopoda)、柔鱼科 (Ommastrephidae), 为大洋性浅海种, 广泛分布于西南大西洋 22°S ~ 54°S 的大陆架和陆坡, 其经济地位在世界头足类中极为重要, 也是我国远洋鱿钓船的主要捕捞对象之一^[1-3]。阿根廷滑柔鱼为一年生的短生命周期种类^[1], 且具有洄游特性^[4]。西南大西洋海域 90% 以上的渔获量为非沿岸国的远洋渔船所捕获, 主要有日本、波兰、西班牙、韩国和中国等。1997 年, 中国大陆的鱿钓船首次对阿根廷滑柔鱼进行捕捞生产, 2015 年最高年产量超过 40 万 t^[5]。各个国家和地区年总产量最高超过 100 万 t^[3]。同时, 柔鱼科种类资源量情况及渔场分布受海洋环境影响较大^[6-10]。为了对阿根廷滑柔鱼进行更加科学有效的管理, 目前以 44°S 为分界线, 分北方资源和南方资源进行管理。此外, 为了实现阿根廷滑柔鱼渔业资源的可持续利用和科学的管理, 阿根廷政府以及南大西洋渔业委员会正在计划采取一些新的措施^[11]。鉴于目前对阿根廷滑柔

鱼资源评估和管理的研究相对不足, 根据 2000—2014 年中国大陆渔业数据和联合国粮农组织 (FAO) 统计的全球阿根廷滑柔鱼产量数据, 利用 Schaefer 模型分单一种群和复合种群对西南大西洋阿根廷滑柔鱼资源进行评估, 并对其管理策略进行风险分析, 以期对阿根廷滑柔鱼资源的科学管理和持续健康发展提供指导和依据。

1 材料与方法

1.1 研究海域和数据来源

西南大西洋阿根廷滑柔鱼生产统计数据来自中国远洋渔业协会上海海洋大学鱿钓技术组, 作业时间为 2000—2014 年, 海域为 41.0°S ~ 49.5°S, 47.5°W ~ 62.5°W (图 1)。全球阿根廷滑柔鱼产量数据 (表 1) 来源于 FAO 网站 (<http://www.fao.org/fishery/statistics/global-capture-production/query/en>)。对应的海洋环境数据包括海表温度 (sea surface temperature, SST) 和叶绿素浓度 (Chlorophyll-a, *Chl. a*)。SST 数据来源于夏威夷

收稿日期: 2018-05-19 修回日期: 2018-12-26

基金项目: 国家海洋局公益性行业专项 (20155014); 上海市科技创新行动计划 (14DZ1205000)

作者简介: 李娜 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源学。E-mail: 694705972@qq.com

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

大学网站 (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>); *Chl. a* 数据来源于美国 NOAA Ocean Watch 数据库 (<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/las/servlets/dataset>)。

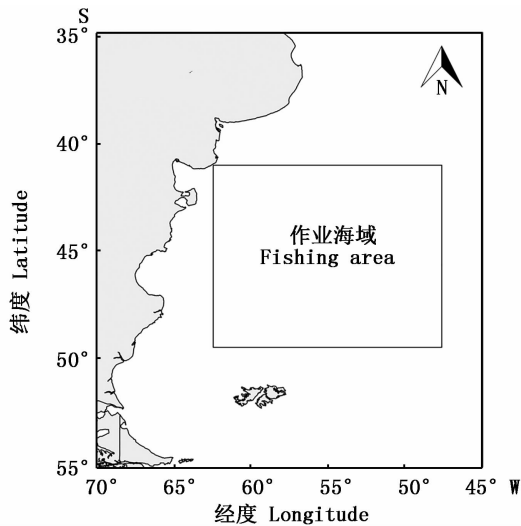


图 1 作业海域示意图

Fig. 1 Sketch map of fishing area

表 1 阿根廷滑柔鱼 CPUE 和产量

Tab. 1 The CPUE and catch data of *Illex argentinus*

年份 Year	渔获量 Catch / (10 ⁴ t)		标准化捕捞 努力量渔获量 Standard CPUE / (t/d)
	中国大陆 China mainland	全球产量 Total	
2000	9.313 0	98.458 9	-
2001	9.350 0	75.045 2	11.698 7
2002	8.543 6	54.040 6	6.586 9
2003	9.600 0	50.362 4	8.080 0
2004	1.340 0	17.998 1	2.939 8
2005	4.100 0	29.151 7	5.287 2
2006	10.400 0	70.426 3	16.400 0
2007	20.762 6	95.504 4	30.719 9
2008	19.718 7	83.793 5	26.289 7
2009	6.140 0	26.122 7	7.246 4
2010	3.500 0	18.996 7	3.337 7
2011	1.301 0	20.486 9	6.284 4
2012	7.800 0	34.062 2	7.066 7
2013	10.800 0	52.540 2	4.950 3
2014	33.600 0	86.286 7	13.917 0

1.2 CPUE 标准化

使用基于空间自相关的 GLM 模型对渔业生产统计数据进行了 CPUE 标准化处理^[12]。将标准化的年 CPUE 作为西南大西洋阿根廷滑柔鱼的资源丰度指数 (表 1)。

1.3 Schaefer 模型

非平衡剩余产量模型 (Schaefer 模型) 的表达式^[13]为

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

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

式中: B_t 为 t 年的资源量; r 为内禀自然增长率; K 为环境容纳量; C_{t-1} 为 $t-1$ 年的渔获量; q 为可捕系数。

通过对公式 (1) 的修改可得:

$$B_{i,y+1} = r_i B_{i,y} (1 - \frac{B_{i,y}}{K_i}) - \sum_{j \neq i}^R \theta_{i-j} B_{i,j} + \sum_{j \neq i}^R \theta_{j-i} B_{j,y} - C_{i,y} \quad (3)$$

$$B_{i,y+1} = r_i B_{i,y} (1 - \frac{B_{i,y}}{K_i}) - C_{i,y} \quad (4)$$

式中: B 为资源量; r 为内禀自然增长率; K 为环境容纳量; C 为渔获量; 下标 y 为年份, i 为亚种群; θ_{i-j} 为交换律, 表示种群 i 迁入到种群 j 的比例。式 (3) 为复合种群的动态表达式, 式 (4) 为单一种群的动态表达式。

假设第一年的资源量为 K , 以此减少评估模型的参数^[14]。根据其他学者^[15]的研究结果, 假设第一年的资源量即 B_0 为 250 万 t。式 (3) 中 2001—2014 年各年的交换率分别假设为 0.05、0.08、0.11、0.14、0.17、0.2、0.23、0.26、0.29、0.32、0.35、0.38、0.41、0.44。

1.4 似然函数

假设观测误差服从对数正态分布, 并且资源丰度与 CPUE 呈正相关关系, 则似然函数表达式为

$$L(I|\theta) = \prod_{2001}^{2014} \frac{1}{I_t \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\log I_t - \log(q, B_t)]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (5)$$

由于捕捞和资源丰度指数数据时间序列较短, 难以估算标准差 σ , 因此假设 σ 为 0.2^[16]。

1.5 评估模型假设

把 Schaefer 模型作为主要的评估模型框架, 基于以下假设对参数进行估计:

(a) 假设为单一种群, 估计 q 、 r 、 K 和 B_{2001} 参数。

(b) 假设为复合种群, 估计每一种群的 q 、 r 、 K 和 B_{2001} 参数以及种群间的交换率。

1.6 模型参数先验分布设定

在贝叶斯理论中,参数先验分布的设定是其进行计算的前提和基础,并且将对参数的后验分布产生影响^[17]。在渔业资源评估中,一般采用均匀分布、正态分布和正态随机分布作为模型参数的先验分布^[18]。本研究对模型参数的先验分布提出的方案为正态分布,即有信息的先验分布。同时,对其进行敏感性检验来验证本研究中的数据能否提供足够的信息。由于阿根廷滑柔鱼是短生命周期种类,其资源量变动极易受环境的影响^[19],因此模型的参数 q 、 r 、 K 随着环境等因素变化而变化。

根据已有的研究^[20-21]对各参数进行设定。基准方案:参数 r 的正态先验分布服从正态分布 $(1.5, 0.6^2)$; K 的正态先验分布假设服从正态分布 $(200, 100^2)$; q 的正态先验分布假设服从正态分布 $[2.0 \times 10^{-5}, (0.8 \times 10^{-5})^2]$ ^[22]。敏感性方案中:参数 r 的先验分布服从正态分布 $(1.5, 0.6^2)$; K 的先验分布假设服从正态分布 $(200, 100^2)$; $\ln q$ 的先验分布假设服从均匀分布 $(-7, 0)$ 。

1.7 模型参数后验分布的计算

利用MCMC(蒙特卡洛马尔科夫链)计算模型参数 r 、 K 、 q 的后验概率分布。在进行计算机模拟时:将单一种群初始值设定为 $q = 0.002$, $r = 0.8$, $K = 350$;将北方复合种群的初始值设定为 $q = 0.002$, $r = 0.8$, $K = 100$;将南方复合种群的初始值设定为 $q = 0.002$, $r = 0.8$, $K = 250$ 。总计算次数为 2×10^4 次,放弃前 1×10^4 次的模拟计算,在后 1×10^4 次的模拟计算中,以10为间隔对模拟结果进行存储^[22]。

1.8 确定备选管理策略

通过计算阿根廷滑柔鱼的收获率,以此来制定其资源管理策略。通过建立相应的捕捞控制规则(本研究体现为收获率),以此限制各年份渔获量的比重^[21]。将收获率制定成以下9种:0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1和0。未来 t 年的渔获量计算公式如下:

$$C_t = h_t B_t e^{\varepsilon} \quad \varepsilon \in N(0, 1^2) \quad (6)$$

式中: C_t 为 t 年的捕捞量,万t; h_t 为收获率; B_t 为 t 年的资源量,万t; ε 为误差项。

1.9 生物学参考点估算

目标参考点(target reference points, TRP)和限制参考点(limit reference point, LRP)构成了生物学参考点(biological reference point, BRP),两者存在显著不同,前者是渔业管理的期望,而后的设置则是为了避免过度捕捞^[23]。通常,渔业管理的目标是在保持渔业资源可持续状态下的同时获得MSY。因此,将 F_{MSY} 、 B_{MSY} 、 $F_{0.1}$ 和MSY作为估算的生物学参考点^[24]。

1.10 资源管理效果评价以及风险分析指标

候选管理策略实施拟得到的结果及其风险分析可由指标的建立和管理策略的模拟实施来评估,从2015年开始进行管理策略的模拟,管理至2024年结束,共10年。拟制定的风险分析指标和效果评价包括以下7个:

- (1)管理结束当年,即2024年的资源量;
- (2)管理结束时,即2024年的捕捞量;
- (3) B_{2024}/B_{MSY} ,即2024年资源量与 B_{MSY} 的比值;
- (4) B_{2024}/K ,即2024年资源量与 K 的比值;
- (5) $P(B_{2024} > B_{2015})$,即2024年资源量大于2015年资源的概率;
- (6) $P(B_{2024} > B_{MSY})$,即2024年资源量在 B_{MSY} 以上的概率;
- (7) $P(B_{2024} < B_{MSY}/4)$,即2024年资源量小于 $B_{MSY}/4$ 的概率。

在进行模拟计算时,操作如下:以贝叶斯分析计算的后验分布结果为基础,在其中任意得到1组 q 、 r 、 K ,得到2014年的资源量,将其与备选收获率一起带入Schaefer模型中进行计算,得到备选收获率下各年的资源量。以上步骤重复进行1000次,得到模拟值。依据前述7个评价体系,对各备选管理策略进行分析。将资源崩溃概率最低、期望收益最大作为决策准则。

2 结果

2.1 单一种群方案

2.1.1 模型参数后验概率分布

结果(图2和表2)表明,参数估计中的不确定性可由贝叶斯方法进行有效量化。模型参数预测值,即后验概率分布预测值:基准方案下, $r =$

0.901 5, $K=350.011 6$, $q=0.029 9$; 敏感性方案 下, $r=0.891 7$, $K=349.994 4$, $q=0.032 0$ 。

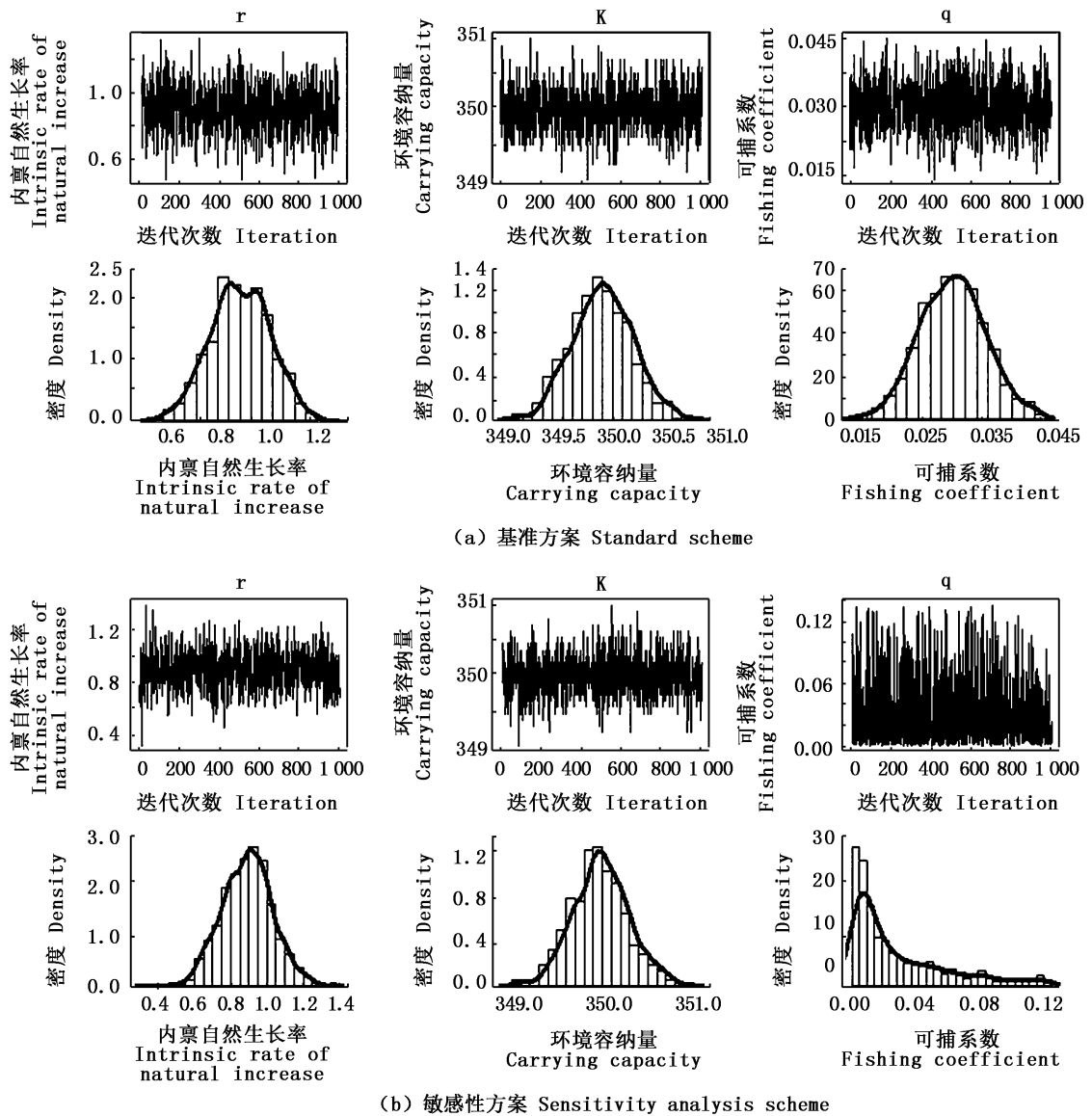


图2 单一种群方案下参数的样本(上)和密度分布(下)
 Fig.2 Marginal posterior probability distributions (up) and density (low) under scenario of prior uniform distribution evaluated as single population

2.1.2 资源量和生物学参考点

由图3可知,捕捞死亡率均在 F_{lar} 以下,且资源量高于 B_{MSY} ,表明当下该资源处于健康状态,也就是说没有被过度捕捞。基准方案下,MSY 为 (78.9 ± 12.315) 万 t,维持 MSY 的资源量为 $(175.0 \pm$

0.156) 万 t,捕捞死亡率 0.451;敏感性方案下,MSY 为 (78.0 ± 12.252) 万 t,维持 MSY 的资源量为 (175.0 ± 0.160) 万 t,捕捞死亡率为 0.446(表 2)。

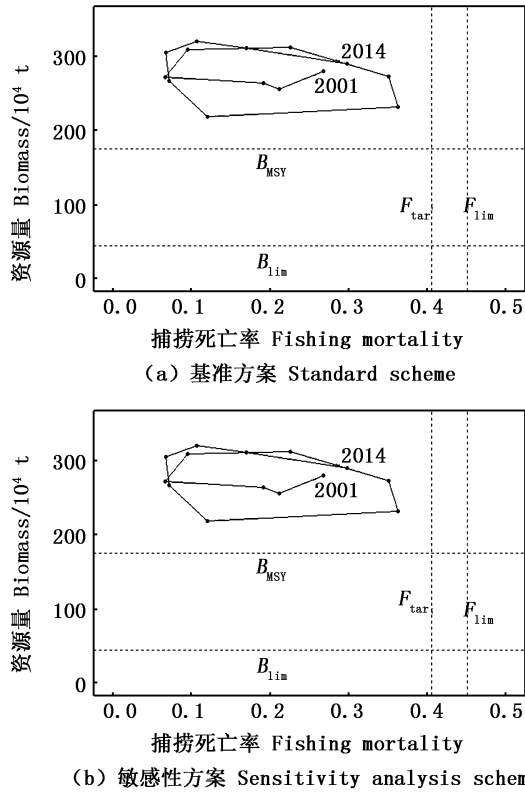


图 3 单一种群方案下 2001—2014 年阿根廷滑柔鱼资源与生物学参考点的关系
 Fig.3 The relationship of *Illex argentines* stock against stock-related and fishing-related reference points from 2001 to 2014 evaluated as single population

2.1.1.3 管理决策分析

由表 3 可知:在基准方案下,收获率为 0 时,

2024 年的资源量为 350.0 万 t。捕捞量的峰值出现在收获率为 0.2 时,达到 81.6 万 t。因此在管理期内,若要使捕捞量最大化,收获率可限制在 0.2 上下,此时 B_{2024}/B_{MSY} 为 1.555; $B_{2024} > 0.5K$ 的概率为 0.999, $B_{2024} < 0.125K$ 的概率值为 0,可知在该方案下,资源基本不会出现过度捕捞,资源崩溃的概率为 0。随着收获率的升高,在收获率为 0.2 ~ 0.6 时,渔获量年间差异不大,但资源量存在明显差异, B_{2024}/B_{MSY} 的值逐渐减小至 0.682,此时不利于保持资源量的良好状态。收获率大于 0.6 时,渔获量和资源量均明显减小,此种管理策略不利于阿根廷滑柔鱼渔业的可持续发展。在敏感性方案下,收获率为 0 时,2024 年的资源量为 302.6 万 t。捕捞量的峰值出现在收获率为 0.2 时,达到 69.9 万 t。因此在管理期内,若要获得最大渔获量,可将收获率控制在 0.2 上下,此时 B_{2024}/B_{MSY} 为 1.332; $B_{2024} > 0.5K$ 的概率值为 0.995, $B_{2024} < 0.125K$ 的概率值为 0,可知在该方案下,资源基本不会出现过度捕捞,资源崩溃的概率为 0.004。随着收获率的升高,在收获率为 0.2 ~ 0.6 时,渔获量年间差异不大,但资源量存在明显差异, B_{2024}/B_{MSY} 的值逐渐减小至 0.561,此时不利于保持资源量的良好状态。收获率大于 0.6 时,渔获量和资源量均明显减小,此种管理策略不利于阿根廷滑柔鱼渔业的可持续发展。

表 2 单一种群方案下的生物学参考点和正态分布统计量

Tab.2 Summary statistics for the estimated BPRs evaluated as single population

方案 Scheme	参数 Parameters	均值 Mean	标准差 Standard deviation	2.5% 分位数 2.5% quantile	25% 分位数 25% quantile	50% 分位数 50% quantile	75% 分位数 75% quantile	97.5% 分位数 97.5% quantile
基准方案 Standard scheme	r	0.902	0.141	0.626	0.812	0.900	0.997	1.166
	K	350.0	0.308	349.4	349.8	350.0	350.2	350.6
	q	0.030	0.006	0.019	0.026	0.030	0.034	0.041
	B_{MSY}	175.0	0.156	174.7	174.9	175.0	175.1	175.3
	MSY	78.9	12.315	54.9	71.0	78.8	87.3	102.2
	$F_{0.1}$	0.406	0.063	0.282	0.365	0.405	0.449	0.525
	F_{MSY}	0.451	0.070	0.313	0.406	0.450	0.499	0.583
敏感性方案 Sensitivity analysis scheme	r	0.892	0.140	0.624	0.798	0.895	0.983	1.175
	K	350.0	0.315	349.4	349.8	350.0	350.2	350.6
	q	0.032	0.033	0.003	0.006	0.017	0.049	0.124
	B_{MSY}	175.0	0.160	174.7	174.9	175.0	175.1	175.3
	MSY	78.0	12.252	54.7	69.8	78.3	86.0	102.7
	$F_{0.1}$	0.401	0.063	0.281	0.359	0.403	0.442	0.529
	F_{MSY}	0.446	0.070	0.312	0.399	0.448	0.492	0.588

表 3 单一种群方案下的管理策略和风险分析指标

Tab. 3 Summary statistics for the estimated index for management and risk analysis as single population

方案 Scheme	收获率 Harvest	2024 资源量 Biomass of 2024/ (10^4 t)	2024 渔获量 Catch of 2024/ (10^4 t)	$B_{2024}/$ B_{MSY}	$B_{2024}/$ K	$P(B_{2024} >$ $B_{2015})$	$P(B_{2024} >$ $0.5K)$	$P(B_{2024} <$ $0.125K)$
基准方案 Standard scheme	0	350.0	0.0	2.000	1.000	0.971	0.999	0.000
	0.1	310.1	31.0	1.772	0.886	0.971	0.999	0.000
	0.2	270.2	81.1	1.544	0.772	0.035	0.999	0.000
	0.3	230.3	69.1	1.316	0.658	0.028	0.977	0.000
	0.4	190.8	76.3	1.090	0.545	0.028	0.770	0.000
	0.5	152.2	76.1	0.870	0.435	0.028	0.257	0.002
	0.6	115.3	69.2	0.659	0.329	0.028	0.011	0.024
	0.7	81.7	57.2	0.467	0.233	0.028	0.000	0.137
敏感性方案 Sensitivity analysis scheme	0	302.6	0.0	1.729	0.865	0.984	0.995	0.004
	0.1	267.9	26.8	1.531	0.765	0.984	0.995	0.004
	0.2	233.1	69.9	1.332	0.666	0.984	0.995	0.004
	0.3	198.4	59.5	1.134	0.567	0.078	0.757	0.004
	0.4	164.0	65.6	0.937	0.468	0.030	0.095	0.004
	0.5	130.2	65.1	0.744	0.372	0.014	0.001	0.004
	0.6	98.1	58.9	0.561	0.280	0.011	0.000	0.059
	0.7	68.9	48.2	0.394	0.197	0.011	0.000	0.212
	0.8	44.1	35.3	0.252	0.126	0.011	0.000	0.585

2.2 复合种群方案

2.2.1 模型参数后验概率分布

复合种群评估方案下, Schaefer 剩余产量模型参数的抽样过程以及后验概率分布见图 4 和表 4。44°S 以北复合种群的后验概率分布预测值为 $r = 0.8974$, $K = 104.9821$, $q = 0.0301$; 44°S 以南复合种群的后验概率分布预测值为 $r = 0.8974$, $K = 244.9821$, $q = 0.0301$ 。

2.2.2 资源量和生物学参考点

在复合种群方案下, 2001—2014 年阿根廷滑柔鱼各年的资源及开发状况如图 5 所示。当前 44°S 以北复合种群资源开发都处于良好状态, 捕捞死亡率低于 F_{tar} , 资源量保持在 B_{MSY} 以上且与该限制参考点相距较远, 表明该资源未被过度捕捞, MSY 为 (23.6 ± 3.89) 万 t, 维持 MSY 的资源量为 (52.5 ± 0.15) 万 t, 此时 F 的值为 0.449 (表 4)。44°S 以南复合种群在 2007、2008 和 2014 三年的捕捞死亡率大于 F_{tar} , 且 2008 年的捕捞死亡率大于 F_{lim} , 在 2008 和 2009 两年, 资源量在 B_{MSY} 以下, 正在经历过度捕捞, MSY 为 (55.0 ± 9.1) 万 t, 维持 MSY 的资源量为 (122.5 ± 0.16) 万 t (表 4)。

2.2.3 管理决策分析

在复合种群方案下, 管理决策指标见表 5。对于 44°S 以北复合种群, 管理期最后一年即 2024 年, 在收获率为 0 时的资源量为 105.0 万 t。在收获率为 0.2 时达到最大渔获量 24.3 万 t。因此在管理期内, 若要使捕捞量最大化, 收获率可限制在 0.2 上下, 此时 B_{2024}/B_{MSY} 为 1.542, $B_{2024} > 0.5K$ 的概率值为 0.998, $B_{2024} < 0.125K$ 的概率值为 0, 可知在该方案下, 资源基本不会出现过度捕捞, 资源崩溃的概率为 0。对于 44°S 以南复合种群, 管理期最后一年即 2024 年, 在收获率为 0 时的资源量为 245.0 万 t。在收获率为 0.2 时达到最大渔获量 56.7 万 t。因此在管理期间, 若要使捕捞量最大化, 收获率可限制在 0.2 上下, 此时 B_{2024}/B_{MSY} 为 1.542, $B_{2024} > 0.5K$ 的概率值为 0.998, $B_{2024} < 0.125K$ 的值为 0。可知在该方案下, 资源基本不会出现过度捕捞, 资源崩溃的概率为 0。

对于南、北两复合种群, 随着收获率的升高, 在收获率为 0.2~0.5 时, 渔获量年间差异不大, 但资源量存在明显差异, B_{2024}/B_{MSY} 的值逐渐减小, 此时不利于保持资源量的良好状态。收获率大

于 0.5 时,渔获量和资源量均明显减小,此种管 理策略不利于阿根廷滑柔鱼渔业的可持续发展。

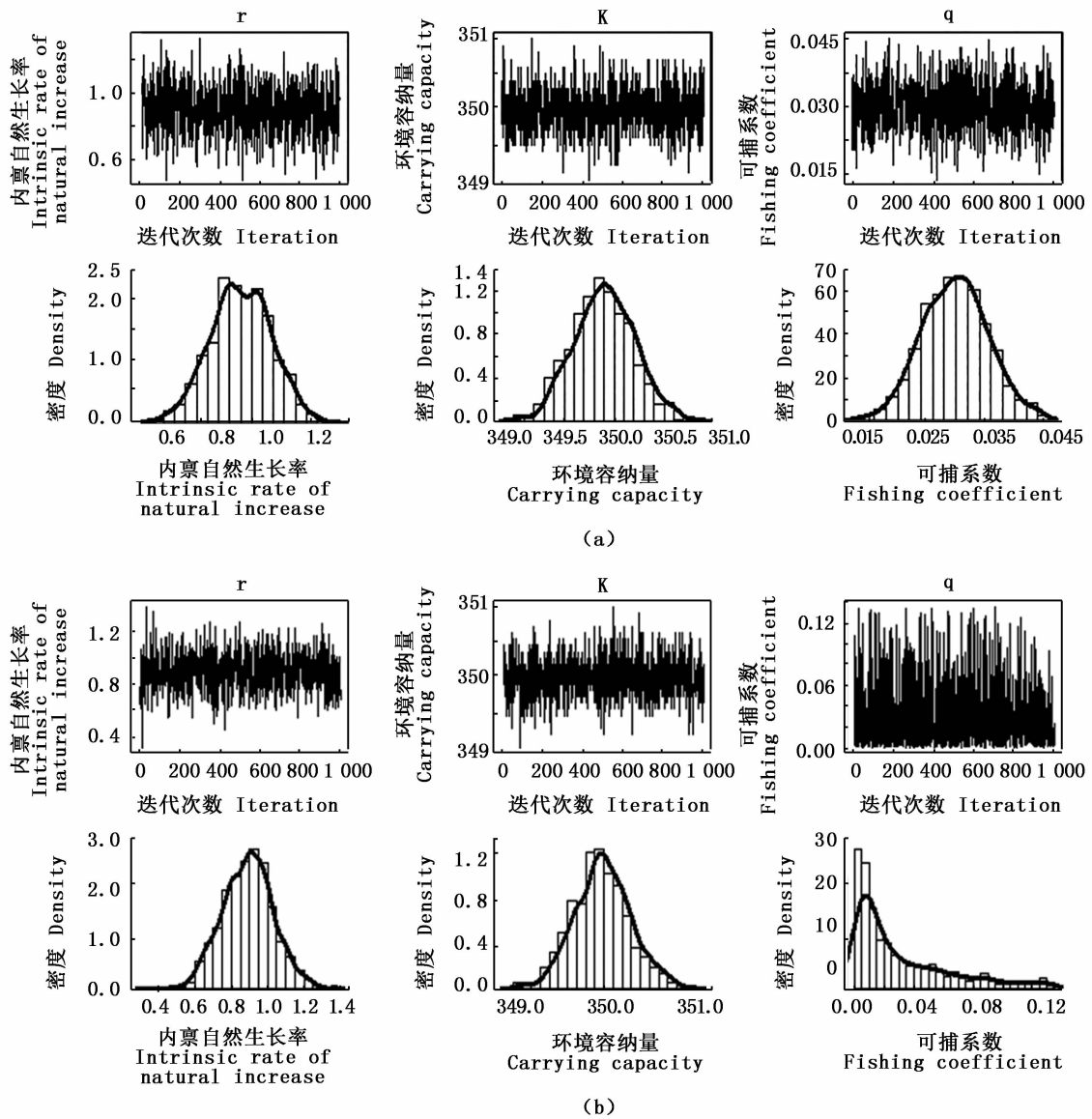


图 4 复合种群方案下参数的样本(上)和密度分布(下),a 为 44°S 以北的复合种群,b 为 44°S 以南的复合种群

Fig.4 Marginal posterior probability distributions (up) and density (low) under scenario of prior uniform distribution evaluated as meta-population , a is meta-population of north of 44°S, b is meta-population of south of 44°S

3 讨论与分析

3.1 模型选择

阿根廷滑柔鱼生活史短,种群年龄结构较为单一,且阿根廷滑柔鱼的年龄鉴定过程复杂、成本较高,因此本研究选择 Schaefer 模型作为基本模型对其进行评估^[25]。尽管该模型概念简单,但其模型参数较少,仅使用 CPUE 和渔获量数据便

可进行相关计算,如此便可取得较科学的评估结果。

应用 Schaefer 模型有以下前提假设,(1)资源群体与外界不存在交流;(2)有即时的开发率反应;(3)作业网具没有变化;(4)模型中的参数恒定不变^[13,26]。西南大西洋海域的海洋环境因素年间变化幅度较大,对阿根廷滑柔鱼的仔稚鱼期影响显著,因此阿根廷滑柔鱼难以实现 K 等参

数的恒定不变的前提假设。在今后的研究中,可以在经典剩余产量模型的基础上,尝试将环境因子加入到 Schaefer 模型中,为阿根廷滑柔鱼资源有效管理和长久的可持续发展提供指导和依据。

表 4 复合种群方案下的生物学参考点和正态分布统计量

Tab. 4 Summary statistics for the estimated BPRs evaluated as meta-population

位置 Location	参数 Parameters	均值 Mean	标准差 Standard deviation	2.5% 分位数 2.5% quantile	25% 分位数 25% quantile	50% 分位数 50% quantile	75% 分位数 75% quantile	97.5% 分位数 97.5% quantile
44°S 以北 North of 44°S	r	0.897	0.148	0.605	0.795	0.898	1.001	1.185
	K	104.982	0.308	104.400	104.800	105.000	105.200	105.600
	q	0.030	0.006	0.019	0.026	0.030	0.034	0.042
	B_{MSY}	52.492	0.153	52.180	52.390	52.490	52.590	52.800
	MSY	23.553	3.889	15.900	20.900	23.560	26.310	31.130
	$F_{0.1}$	0.404	0.067	0.272	0.358	0.404	0.451	0.533
	F_{MSY}	0.449	0.074	0.303	0.398	0.449	0.501	0.593
44°S 以南 South of 44°S	r	0.897	0.148	0.605	0.795	0.898	1.001	1.185
	K	244.982	0.308	244.400	244.800	245.000	245.200	245.600
	q	0.030	0.006	0.019	0.026	0.030	0.034	0.042
	B_{MSY}	122.491	0.156	122.200	122.400	122.500	122.600	122.800
	MSY	54.961	9.071	37.126	48.745	54.975	61.360	72.592
	$F_{0.1}$	0.404	0.067	0.272	0.358	0.404	0.451	0.533
	F_{MSY}	0.449	0.074	0.303	0.398	0.449	0.501	0.593

表 5 复合种群方案下的管理策略和风险分析指标

Tab. 5 Summary statistics for the estimated index for management and risk analysis as meta-population

位置 Location	收获率 Harvest	2024 资源量 Biomass of 2024/ (10 ⁴ t)	2024 渔获量 Catch of 2024/ (10 ⁴ t)	$B_{2024}/$ B_{MSY}	$B_{2024}/$ K	$P(B_{2024} >$ $B_{2015})$	$P(B_{2024} >$ $0.5K)$	$P(B_{2024} <$ $0.125K)$
44°S 以北 North of 44°S	0	104.989	0	2.000	1.000	0.964	0.999	0
	0.1	92.954	9.295	1.771	0.885	0.964	0.999	0
	0.2	80.925	24.277	1.542	0.771	0.044	0.998	0
	0.3	68.925	20.677	1.313	0.657	0.036	0.982	0
	0.4	57.028	22.811	1.086	0.543	0.035	0.749	0
	0.5	45.400	22.700	0.865	0.432	0.035	0.241	0.001
	0.6	34.340	20.604	0.654	0.327	0.035	0.016	0.025
	0.7	24.275	16.992	0.462	0.231	0.035	0	0.140
	0.8	15.682	12.546	0.299	0.149	0.035	0	0.438
44°S 以南 South of 44°S	0	244.984	0	2.000	1.000	0.964	0.999	0
	0.1	216.902	21.690	1.771	0.885	0.964	0.999	0
	0.2	188.832	56.650	1.542	0.771	0.044	0.998	0
	0.3	160.832	48.250	1.313	0.657	0.036	0.982	0
	0.4	133.073	53.229	1.086	0.543	0.035	0.748	0
	0.5	105.941	52.970	0.865	0.432	0.035	0.244	0.001
	0.6	80.132	48.079	0.654	0.327	0.035	0.016	0.025
	0.7	56.646	39.652	0.462	0.231	0.035	0	0.140
	0.8	36.596	29.277	0.299	0.149	0.035	0	0.438

3.2 先验和后验概率分布分析

以贝叶斯方法为基础,获取参数后验概率分布,并任意获得参数值模拟管理,最终获取多种管理效果。在短生命周期生物的资源评估中,会出现各种不确定因素,因此,可通过贝叶斯方法

对其进行优化和改善。模型后验概率分布的估算受贝叶斯方法中先验概率分布假设和选择的影响。在资源评估中,先验概率分布设定不合理会得到较不理想的结果^[27-28],更有可能导致与事实相悖的结果^[29]。根据已有研究^[30],设定本研究

模型参数 q 、 r 、 K 的先验概率分布。将正态分布作为 q 、 r 、 K 的先验概率分布。由后验概率分布可知, q 、 r 、 K 大致符合正态分布, 表明先验分布概率率的设定对资源评估结果的影响不显著。

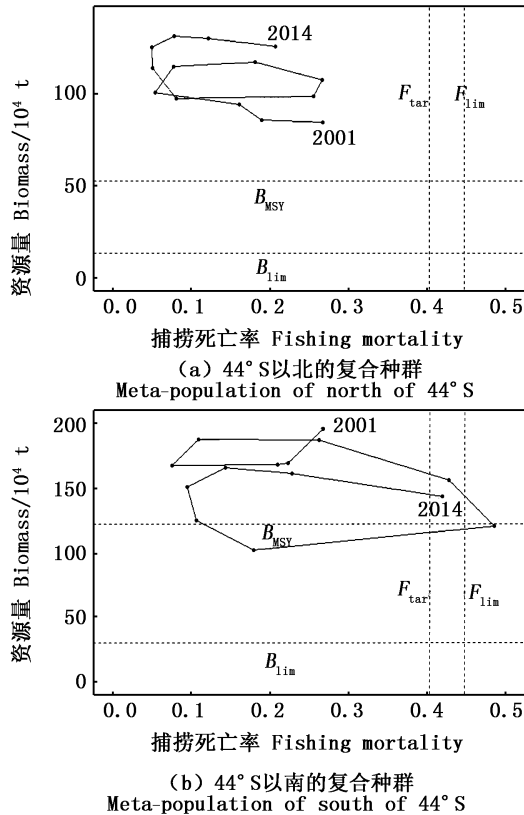


图5 复合种群方案下2001—2014年阿根廷滑柔鱼资源与生物学参考点的关系
Fig. 5 The relationship of *Illex argentinus* stock against stock-related and fishing-related reference points from 2001 to 2014 evaluated as meta-population

3.3 不确定性分析

结果存在一定的不确定性, 主要是由于 CPUE 标准化的原始数据的不确定性。CPUE 标准化的数据来源单一, 仅为中国捕捞作业数据, 其中有很多不确定因素^[31-32], 且中国鱿钓生产数据对应的海域范围仅为 200 海里专属经济区以外, 导致 CPUE 不准确的概率较高。模型参数中的不确定因素是评估结果出现差异的重要原因^[33-34], 研究中将 B_0 即 2015 年的资源量设定为 250 万 t, 若选择不同的 B_0 假设值会得出不同的资源量。同时 σ 假设为 0.2, 可能会影响评估结果。作为生活史较短的种类, 阿根廷滑柔鱼的种

群结构变化与环境因素密切相关。因此, 本研究所估算的模型参数若用于预测今后的种群动态变化, 会存在一定的风险。

3.4 不同方案评估结果比较

在单一种群方案下, 目前阿根廷滑柔鱼的资源量大于 B_{MSY} 。在复合种群方案下, 44°S 以北的复合种群的资源量大于 B_{MSY} , 44°S 以南 2008 和 2009 年的复合种群的资源量在 B_{MSY} 以下。表明 44°S 以南的复合种群的资源量处于不稳定状态, 自 2008 年开始的两年可能正在遭受过度捕捞, 此期间内的捕捞量也相应减少。2011 年以后, 44°S 以南的复合种群资源量恢复到 B_{MSY} 以上, 捕捞量也随之增加, 表明在此期间 44°S 以南的复合种群资源量处于良好状态, 资源量恢复到可持续利用的水平(图 5)。

从表 3、表 5 可知, 在各种种群方案下, 2024 年最大渔获量基本都出现在开发率为 0.2 时, 此时渔获量最大约为 81 万 t, 资源量最大约为 270 万 t, 各种种群方案的结果差异不大。单一种群方案下, 2000—2014 年的 F 都在 F_{tar} 以下。在复合种群方案下, 44°S 以北的复合种群的捕捞死亡率也都低于 F_{tar} , 44°S 以南的复合种群有 2007、2008 和 2014 年 3 年的捕捞死亡率高于 F_{tar} , 由此可以看出, 在捕捞死亡率增加以后, 资源量不断走低, 这可能是由捕捞强度的加大而导致的。2008 年以后, 捕捞死亡率的不断减小使得资源量也逐渐恢复, 2014 年捕捞死亡率高于 F_{tar} , 由于缺乏 2014 年以后的数据, 所以其资源量变化趋势未知。

本结果与前人研究^[22,30] 结果有一定的差异, 可能是在进行资源评估时所采用的模型和参数不同所致。在评估过程中, 资源量初始值设定不同会直接影响评估结果, 并且由于中国对阿根廷滑柔鱼的捕捞限制在部分渔场, 这些均是导致模型结果误差的重要原因^[31]。

3.5 管理策略分析

在各种种群方案下, 生物学参考点 $F_{0.1}$ 为 0.4, MSY 约为 78 万 t, 且浮动较小。当收获率大于 0.5 时, 2024 年后阿根廷滑柔鱼资源崩溃的概率大于 0。当设定的收获率小于等于 0.3 时, 资源能够保持在可持续利用的良好水平, 管理结束后资源量极有可能大于 B_{MSY} , 资源崩溃的概率为 0。当收获率设定在 0.2 至 0.3 时, 此时的管理策略

较为保守,可持续渔获量大,约为 70~80 万 t,且资源能够得到较好的养护。

参考文献:

- [1] HATANAKA H. Growth and life span of short-finned squid *Illex argentinus* in the waters off Argentina[J]. Nihon Suisan Gakkaishi, 1986, 52(1): 11-17.
- [2] CHEN X J, LIU B L, CHEN Y. A review of the development of Chinese distant-water squid jigging fisheries[J]. Fisheries Research, 2008, 89(3): 211-221.
- [3] 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: 58-264.
WANG Y G, CHEN X J. The oceanic economic squid resources and fisheries in the world[M]. Beijing: Ocean Press, 2005: 58-264.
- [4] CADDY J F. The cephalopods: factors relevant to their population dynamics and to the assessment and management of stocks[M]//CADDY J F. Advances in Assessment of World Cephalopod Resources. Rome: FAO, 1983: 416-452.
- [5] 陈新军, 赵小虎. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼产量分布与表温关系的初步研究[J]. 大连水产学院学报, 2005, 20(3): 222-228.
CHEN X J, ZHAO X H. The relationship between the distribution of production of squid *Illex argentinus* and sea surface temperature in the southwest Atlantic Ocean[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2005, 20(3): 222-228.
- [6] 魏广恩, 陈新军, 李纲. 西北太平洋柔鱼洄游重心年际变化及预测[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(4): 573-583.
WEI G E, CHEN X J, LI G. Interannual variation and forecasting of *Ommastrephes bartramii* migration gravity in the northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(4): 573-583.
- [7] 魏联, 陈新军, 雷林, 等. 西北太平洋柔鱼 BP 神经网络渔场预报模型比较研究[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(3): 450-457.
WEI L, CHEN X J, LEI L, et al. Comparative study on the forecasting models of squid fishing ground in the northwest Pacific Ocean based on BP artificial neural network[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(3): 450-457.
- [8] 胡贯宇, 方舟, 陈新军. 东太平洋茎柔鱼生活史研究进展[J]. 水产学报, 2018, 42(8): 1315-1328.
HU G Y, FANG Z, CHEN X J. Review on the life history of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in the eastern Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(8): 1315-1328.
- [9] 张硕, 李莉, 陈新军. 基于海表温因子的太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度预测模型比较[J]. 水产学报, 2018, 42(5): 704-710.
ZHANG S, LI L, CHEN X J. A comparative study on forecasting model of the stock abundance index for the winter-spawning cohort of *Todarodes pacificus* in the Pacific Ocean based on the factor of SST[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(5): 704-710.
- [10] 余为, 陈新军, 易倩. 不同气候模态下西北太平洋柔鱼渔场环境特征分析[J]. 水产学报, 2017, 41(4): 525-534.
YU W, CHEN X J, YI Q. Analysis of variations in the environmental conditions on the fishing ground of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwestern Pacific Ocean under different climate modes[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(4): 525-534.
- [11] 陈新军, 陆华杰, 方舟, 等. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔业生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 7-16.
CHEN X J, LU H J, FANG Z, et al. Fishery biology for *Illex argentinus* squid in the southwest Atlantic Ocean[M]. Beijing: Science Press, 2014: 7-16.
- [12] 李娜, 陈新军, 王冉. 基于空间自相关的阿根廷滑柔鱼 CPUE 标准化研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(2): 61-68.
LI N, CHEN X J, WANG R. Incorporating spatial autocorrelation into CPUE standardization with an application to the *Illex argentinus*[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(2): 61-68.
- [13] 王玉. 剩余产量模型的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
WANG Y. Study of the surplus production models[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [14] BEDDINGTON J R, ROSENBERG A A, CROMBIE J A, et al. Stock assessment and the provision of management advice for the short fin squid fishery in Falkland Islands waters[J]. Fisheries Research, 1990, 8(4): 351-365.
- [15] BASSON M, BEDDINGTON J R, CROMBIE J A, et al. Assessment and management techniques for migratory annual squid stocks: the *Illex argentinus* fishery in the southwest Atlantic as an example[J]. Fisheries Research, 1996, 28(1): 3-27.
- [16] 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.
- [17] 李纲. 东、黄海鲈鱼资源评估及其管理策略风险分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2008.
LI G. Stock assessment and risk analysis of alternative management strategies for chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China Sea and the Yellow Sea[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2008.
- [18] 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.
CAO J. Stock assessment and risk analysis of management strategies for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwest Pacific ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean

- University, 2010.
- [19] 陆化杰, 陈新军. 2006 年西南大西洋鱿钓渔场与表温和海面高度距平值的关系[J]. 大连海洋大学学报, 2008, 23(3): 230-234.
- LU H J, CHEN X J. Fishing ground of squid specially related with sea surface temperature and sea surface height anomaly in southwest Atlantic in 2006[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(3): 230-234.
- [20] 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.
- [21] NEVÁREZ-MARTÍNEZ M O, MORALES-BOJÓRQUEZ E, CERVANTES-VALLE C, et al. Population dynamics of the jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in the 2002-2008 fishing seasons off Guaymas, Mexico [J]. Fisheries Research, 2010, 106(2): 132-140.
- [22] 陆化杰, 陈新军, 李纲, 等. 基于贝叶斯 Schaefer 模型的阿根廷滑柔鱼资源评估与管理[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 2007-2014.
- LU H J, CHEN X J, LI G, et al. Stock assessment and management for *Illex argentinus* in southwest Atlantic ocean based on Bayesian Schaefer model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 2007-2014.
- [23] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- ZHAN B Y. Fishery stock assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [24] HOGARTH D D, ABEYASEKERA S, ARTHUR R I, et al. Stock assessment for fishery management-a framework guide to the stock assessment tools of the Fisheries Management Science Programme (FMSP) [R]. Rome: FAO, 2006.
- [25] YING Y P, CHEN Y, LIN L S, et al. Risks of ignoring fish population spatial structure in fisheries management [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, 68(12): 2101-2120.
- [26] SAILA S B. Behavior of fisheries: quantitative fisheries stock assessment: choice dynamics and uncertainty. Hilborn Ray Walters Carl J. Chapman & Hall, New York, 1992. 570 pp., illus. \$62. 50 (ISBN 412-022-710 cloth) [J]. Bioscience, 1993, 43(1): 57-58.
- [27] 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.
- [28] MCALLISTER M K, 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, 2009, 58(9): 1871-1890.
- [29] PUNT A E, HILBORN R. BAYES-SA-Bayesian stock assessment methods in fisheries-user's manual[R]. Rome: FAO, 2001.
- [30] 汪金涛. 大洋性经济柔鱼类渔情预报与资源量评估研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- WANG J T. Fishery forecasting and stock assessment for commercial oceanic ommastrephid squid [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [31] 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.
- [32] 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 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.
- [33] 徐洁, 官文江, 陈新军. 基于空间相关性的西北太平洋柔鱼 CPUE 标准化研究[J]. 水产学报, 2015, 39(5): 754-760.
- XU J, GUAN W J, CHEN X J. A study of incorporating spatial autocorrelation into CPUE standardization with an application to *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(5): 754-760.
- [34] 陆化杰, 陈新军, 曹杰, 等. 中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化[J]. 水产学报, 2013, 37(6): 951-960.
- LU H J, CHEN X J, CAO J, et al. CPUE standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery in the southwest Atlantic Ocean [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 951-960.

Stock assessment and management for metapopulation of *Illex argentinus*

LI Na¹, CHEN Xinjun^{1,2,3,4,5}, JIN Yue¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306)

Abstract: Stock assessment and management strategy evaluation of *Illex argentinus* was made based on metapopulation. Single population is the basic hypothesis for the present fishery stock assessment. However, resources are usually composed of several populations and communicate with each other, which can form metapopulation. In this paper, the abundance of *I. argentinus* is assessed based on Bayesian statistical Schaefer model with single population and metapopulation. The results showed that year capture data and resource abundance index could provide sufficient information for Bayesian stock assessment model. The estimated maximum sustainable yield is similar to prediction value of model parameters for both single population and metapopulation. Catch mortality is lower than F_{lim} for single population, while catch mortality is higher than F_{lim} for south metapopulation. Abundance recovers to good condition with decreased catch mortality. Decision analysis showed that the abundance could keep at sustainable level under single population and metapopulation with yield rate at 0.3. Yield rate should be set between 0.2 and 0.3 for conservative strategy, where the sustainable catch is around 0.8 million tons.

Key words: *Illex argentinus*; metapopulation; Bayesian Schaefer model; stock assessment; management strategy