

基于环境因子的东海马鲛鱼(*Scomberomorus Nipponius*)资源量评估

隋 芯^{1,2}, 汪金涛^{1,3,4,5,6}, 陈新军^{1,3,4,5,6}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所渔业资源遥感信息技术重点实验室, 上海 200090; 3. 农业部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 4. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 5. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 6. 农业部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 东海马鲛鱼(*Scomberomorus Nipponius*)的种群动态易受海洋环境条件的影响, 在其资源评估和管理中需要考虑海洋环境条件的作用。假设马鲛鱼产卵场最适海表温度 10~19 °C (Suitable SST, T_{sui}) 范围会影响种群环境容纳量(K), 因此分别使用产卵季 3 月最适表温范围比值($T_{sui-Mar}$)、4 月最适表温范围比值($T_{sui-Apr}$)和 3、4 月份最适表温范围比值的平均值($T_{sui-Ave}$)作为剩余产量模型的环境因子, 构建三种基于环境因子的剩余产量模型(environmentally dependent surplus production, EDSP), 分别为 $T_{sui-Mar}$ -EDSP、 $T_{sui-Apr}$ -EDSP 和 $T_{sui-Ave}$ -EDSP, 利用贝叶斯估计模型参数, 结果显示 $T_{sui-Mar}$ 、 $T_{sui-Apr}$ 、 $T_{sui-Ave}$ 三个基于环境因子的 EDSP 模型偏差信息标准(deviance information criterion, DIC)值小于传统的剩余产量模型的 DIC 值, 其中 $T_{sui-Ave}$ -EDSP 模型 DIC 值最小, 精度最高, 估计的最大可持续产量(maximum sustainable yield, MSY)的范围为 $8.125 \times 10^6 \sim 8.371 \times 10^6$ t, 资源量(biomass)范围是 $1.429 \times 10^6 \sim 1.455 \times 10^6$ t, 从 1994 年到 2015 年, 马鲛鱼的捕捞死亡率远低于目标死亡率(F_{tar})和 MSY 水平捕捞死亡率(F_{MSY}), 种群资源量高于 MSY 水平资源量(B_{MSY})。东海马鲛鱼没有被过度捕捞或未发生过度捕捞, 基于 EDSP 模型中的管理参考点更为保守, 建议日后东海马鲛鱼的种群评估和管理应考虑产卵场环境条件。

关键词: 马鲛鱼; 剩余产量模型; 产卵场环境因子; 东海

中图分类号: S932 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)04-0136-11

DOI: 10.11759/hyxx20200722003

马鲛鱼(*Scomberomorus nipponius*)是暖水性中上层经济型鱼类, 渔获年龄组成主要以 2~3 龄为主, 广泛分布于西北太平洋, 是我国黄、渤海和东海海区重要的渔业对象之一, 也是日本、韩国商业目标鱼种之一^[1]。马鲛鱼产量年间波动显著, 其产量远高于日本和韩国, 1980—1990 年从 10×10^4 t 增加到 20×10^4 t, 在 1990 年以后其产量迅速增加到 50×10^4 t。2000 年以来, 渔获量的范围在 40×10^4 t 到 50×10^4 t^[2], 2015 年中国马鲛鱼的渔获量为 43×10^4 t, 其中有一定数量的兼捕, 但程度不明^[3]。近年来, 中国对马鲛鱼的捕捞量占海洋总捕捞量的比例显著增加, 且马鲛鱼的捕捞量占中国总捕捞量的比例保持在 20%以上, 年渔获量超过 40×10^4 t^[4-6]。

研究表明渤海、黄海和东海马鲛鱼的种群结构随空间变化, 通过随机森林的方法得出主要由 3 个种群组成: 南部种群(东海南部), 中部种群(黄海中部)和北

部种群(北黄海和渤海), 且研究证明其分类结果受到境因子(如海表温等)的影响很大^[5]。东海马鲛鱼每年 3—5 月份开始生殖洄游, 到达东海附近开始产卵^[3, 7], 产卵场海区的水温在 10~19 °C, 从 3 月份开始逐渐性成熟, 到达 4 月份几乎完全性成熟^[8-10](图 1)。

鱼类栖息地的变化会以多种方式影响鱼类种群, 可以通过适宜栖息地的变化来解释鱼类种群资源的变化^[11-12]。海洋环境条件决定鱼类栖息地优劣, 海洋

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-08-05

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901404); 国家自然科学基金(41876141)

[Foundation: The National Basic Research Program of China (973 Program), No.2019YFD0901404; The National Natural Science Foundation of China (General Program, Key Program, Major Research Plan), No. 41876141]

作者简介: 隋芯(1995—), 女, 吉林通化人, 硕士, 主要从事渔业遥感研究, E-mail: 18251859536@163.com; 汪金涛(1987—), 通信作者, 男, 安徽安庆人, 讲师, 主要从事渔业栖息地动态变化, 渔业资源评估, 人工智能渔业和渔情预报研究, E-mail: jtwang@shou.edu.cn

环境变化会影响鱼类种群的增长率(r)和承载能力(K)^[13-14]。东海马鲛鱼的资源丰度也与其栖息地环境因素密切相关。海面温度(sea surface temperature, SST)和叶绿素 a 浓度(chlorophyll a , Chl- a)会影响马鲛鱼的生长速度^[15]; 黑潮地区的 SST、海气相互作用下的厄尔尼诺现象和南方涛动事件(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)均能影响东海马鲛鱼冬季产卵群体的生存, 导致马鲛鱼资源量年际变化, 因此, 环境因子对于马鲛鱼的研究具有重要意义, 这些影响因素需要在马鲛鱼种群评估中加以考虑^[16-17]。

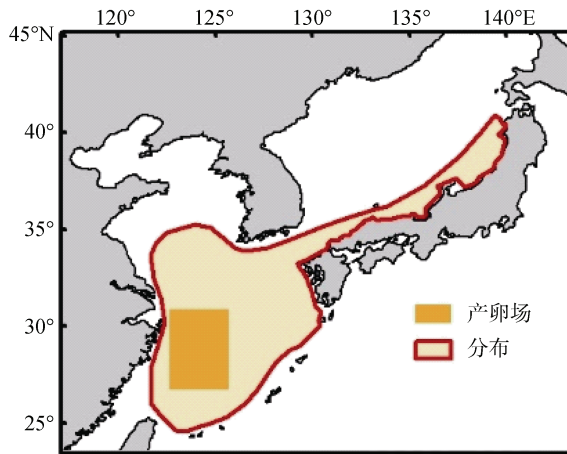


图 1 东海马鲛鱼产卵场的分布^[3]

Fig. 1 Distribution and spawning ground of the mackerel in East China Sea

在资源评估中考虑环境因素已有学者做了初步探索。如在大洋性柔鱼类的资源评估中考虑柔鱼类产卵场和索饵场的适宜 SST, 构建基于环境因子的剩余产量(envIRONMENTALLY DEPENDENT SURPLUS PRODUCTION, EDSP)模型估计柔鱼类资源量^[14]。SP 模型是应用最广泛的评估模型之一^[18], 该模型仅需渔获量和单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)或捕捞努力量数据, 在缺乏年龄结构数据的渔业下往往能得到较好的资源评估结果。与复杂模型相比, 在资源管理中剩余产量模型可以提供更准确、更精确的估计^[19-20]。因此, EDSP 模型可以为马鲛鱼的种群状况进行评估, 以期为马鲛鱼资源的合理开发利用和管理提供科学的理论支持。但是, 目前对东海马鲛鱼建立资源评估模型并对其资源状态进行评估的相关研究相对较少。

本文假设马鲛鱼产卵场环境因素会影响马鲛鱼生物量, 建立多种 EDSP 模型估计东海马鲛鱼资源动态, 计算生物学管理参考点(biological reference points, BRPs), 结果可用于马鲛鱼的资源评估和管理。

1 材料和方法

1.1 渔业和海洋环境数据

1994—2015 年中国东海马鲛鱼总渔获量(catch, 单位: $\times 10^4$ t), 捕捞努力量(effort, 单位: 网), 资源丰度指数(catch per unit effort, CPUE, 单位: t/网)来自于日本西海区水产研究所(图 2)。1994—2015 年的海面温度数据来源于 NOAA 的 Ocean Watch (<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/las/servlets/dataset>), 空间范围为 $23^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$, 空间分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$, 时间分辨率为月。

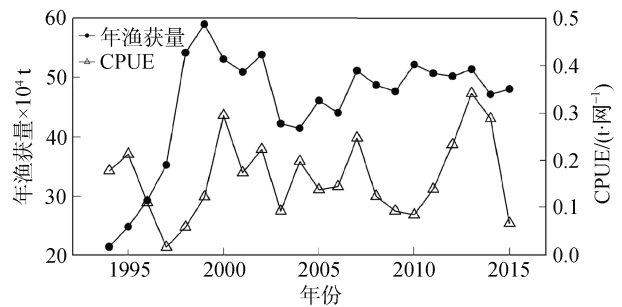


图 2 1994—2015 年马鲛鱼渔获量和 CPUE 随时间变化图
Fig. 2 Total mackerel catch and overtime CPUE (1994 to 2015)

1.2 剩余产量模型

假设马鲛鱼在产卵季节(3—4 月份)产卵场的最适 SST($10\sim 19^{\circ}\text{C}$)对于马鲛鱼的补充量起决定性作用^[7-8, 10]。因此计算 1994—2015 年 3、4 月份产卵场适宜 SST 范围和平均适宜 SST 范围($T_{\text{sui-Mar}}$, $T_{\text{sui-Apr}}$ 和 $T_{\text{sui-Ave}}$), 构建 3 种 EDSP 模型, 分别为: 基于 3 月份最适 SST 的 EDSP 模型($T_{\text{sui-Mar-EDSP}}$); 基于 4 月份 SST 的 EDSP 模型($T_{\text{sui-Apr-EDSP}}$); 基于 3、4 月份平均最适 SST 的 EDSP 模型($T_{\text{sui-Ave-EDSP}}$), 并与不含环境因子的 SP 模型进行比较分析。

Schaefer 剩余产量模型^[14]的计算公式如下:

$$\lg(B_t) | K, \sigma^2 = \lg(K) + u_t, \quad (1)$$

$$\lg(B_t) | B_{t-1}, K, r, \sigma^2 = \lg \left\{ B_{t-1} + rB_{t-1} \left(1 - \frac{B_{t-1}}{K} \right) - C_{t-1} \right\}, \quad (2)$$

$$\lg(I_t) | B_t, q, \tau^2 = \lg(q) + \lg(B_t) + v_t, \quad (3)$$

式中, B_t 为第 t 年的资源量, K 为环境容纳量, r 为内禀自然增长率, q 为可捕系数, I_t 是第 t 年的 CPUE, 假设 I_t 与 B_t 成正比关系, 参数 u_t 和 v_t 均服从独立均匀分布 IID $N(0, \sigma^2)$ 、IID $N(0, \tau^2)$, 根假设 1994 年(初始年份)

马鲛鱼的初始生物量 B_1 为 2.2×10^6 t, 并假设“有效”环境容纳量与环境因子 T_{sui} 成正比^[21]。

$T_{sui-Mar}$ -EDSP 模型为:

$$\lg(B_t) | K, \sigma^2 = \lg(K) + u_t, \quad (4)$$

$$\lg(B_t) | B_{t-1}, K, r, \sigma^2 = \lg \left\{ B_{t-1} + rB_{t-1} \left(1 - \frac{B_{t-1}}{T_{sui-Mart-1}K} \right) - C_{t-1} \right\} + u_t. \quad (5)$$

$T_{sui-Apr}$ -EDSP 模型为:

$$\lg(B_t) | K, \sigma^2 = \lg(K) + u_t, \quad (6)$$

$$\lg(B_t) | B_{t-1}, K, r, \sigma^2 = \lg \left\{ B_{t-1} + rB_{t-1} \left(1 - \frac{B_{t-1}}{T_{sui-Aprt-1}K} \right) - C_{t-1} \right\} + u_t. \quad (7)$$

$T_{sui-Ave}$ -EDSP 模型为:

$$\lg(B_t) | K, \sigma^2 = \log(K) + u_t, \quad (8)$$

$$\lg(B_t) | B_{t-1}, K, r, \sigma^2 = \lg \left\{ B_{t-1} + rB_{t-1} \left(1 - \frac{B_{t-1}}{T_{sui-Avet-1}K} \right) - C_{t-1} \right\} + u_t. \quad (9)$$

利用贝叶斯统计对 Schaefer 的剩余生产模型进行了拟合^[22]。最大似然函数用于估计观测数据和模型数据之间的拟合程度^[23]。假设观测误差服从对数正态分布, 似然函数公式为:

$$L(I | \theta) = \prod_{2015}^{1994} \frac{1}{I_t \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\lg(I_t) - \lg(qB_t)]^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (10)$$

根据前人研究 CPUE 数据的标准差 σ 设定为 0.2 ^[14, 23]。假设模型参数 r, K 和 q 的先验分布均服从均匀分布, 分别为 $r \sim U(0.1, 1.2)$, $\lg(q) \sim U(-20, 0)$ 和 $K \sim U(60, 300)$; 初始值为: $r = 0.9$, $K = 2.20 \times 10^6$ t, $q = \lg(0.001)$ 。模型计算使用了 3 个蒙特卡洛马尔可夫链 (Markov chain Monte Carlo, MCMC) 链, 总迭代次数

为 45 000, 丢弃前 5 000 次, 后 40 000 次, 模型每 40 次迭代保存一次结果。模型拟合指标采用偏差信息 (deviance information criterion, DIC), DIC 值越小表示模型拟合精度越高。

1.3 资源状态的评估生物参考点

计算渔业生物参考点 (biological reference points, BRPs) 中的目标参考点 (target reference points, TRPs) 和限制参考点 (limit reference points, LRP) 对马鲛鱼的种群状态进行评估, 具体包括最大可持续产量 (maximum sustainable yield, MSY)、MSY 水平的捕捞死亡率 (F_{MSY})、MSY 水平的资源量 (B_{MSY}) 以及 $F_{0.1}$, 并以 $F_{0.1}$ 作为捕捞死亡率目标参考点 F_{tar} , 其余参考点同样简单描述^[24-25] (表 1)。

表 1 东海马鲛鱼的生物参考点统计表

Tab. 1 Biological reference points (BRPs) for *S. niphonius* fishery in East China Sea

模型	渔获量 BRPs/ 10^4 t	捕捞死亡率 BRPs	资源量 BRPs/ 10^4 t
SP 模型	MSY= $rK/4$	$F_{MSY}=r/2$	$B_{MSY}=K/2$
		$F_{0.1}=0.45r$	
		$F_t=C_t/B_t$	
T_{sui} -EDSP 模型	MSY= $rK/4$	$F_{MSY}=r/2$	$B_{MSY}=K/2$
		$F_{0.1}=0.45r$	
		$F_t=C_t/B_t$	

注: SP 为剩余产量模型; T_{sui} -EDSP 为基于环境因子的剩余产量模型; T_{sui} 为产卵场的环境因子; MSY 为最大可持续产量; C_t 为 t 年的渔获量; B_t 为 t 年的资源量

2 结果

2.1 剩余产量模型比较

四种剩余产量模型参数 r, K, q 的后验分布与先验分布之间存在很大差异, 参数后验分布受其先验分布的影响较小, 模型获得比较丰富的东海

马鲛鱼的渔业信息。后验分布参数 r, K 的范围分别为 $1.139 \sim 1.169$ 、 $2.823 \times 10^6 \sim 2.882 \times 10^6$ t, q 的值为 1×10^{-6} (图 3), r 和 K 的最小值都出现在 SP 模型中, 而 r 和 K 的最大值分别出现在 $T_{sui-Mar}$ -EDSP 模型和 $T_{sui-Apr}$ -EDSP 模型中。 $T_{sui-Ave}$ -EDSP 模型的 DIC 值最小 (表 2)。

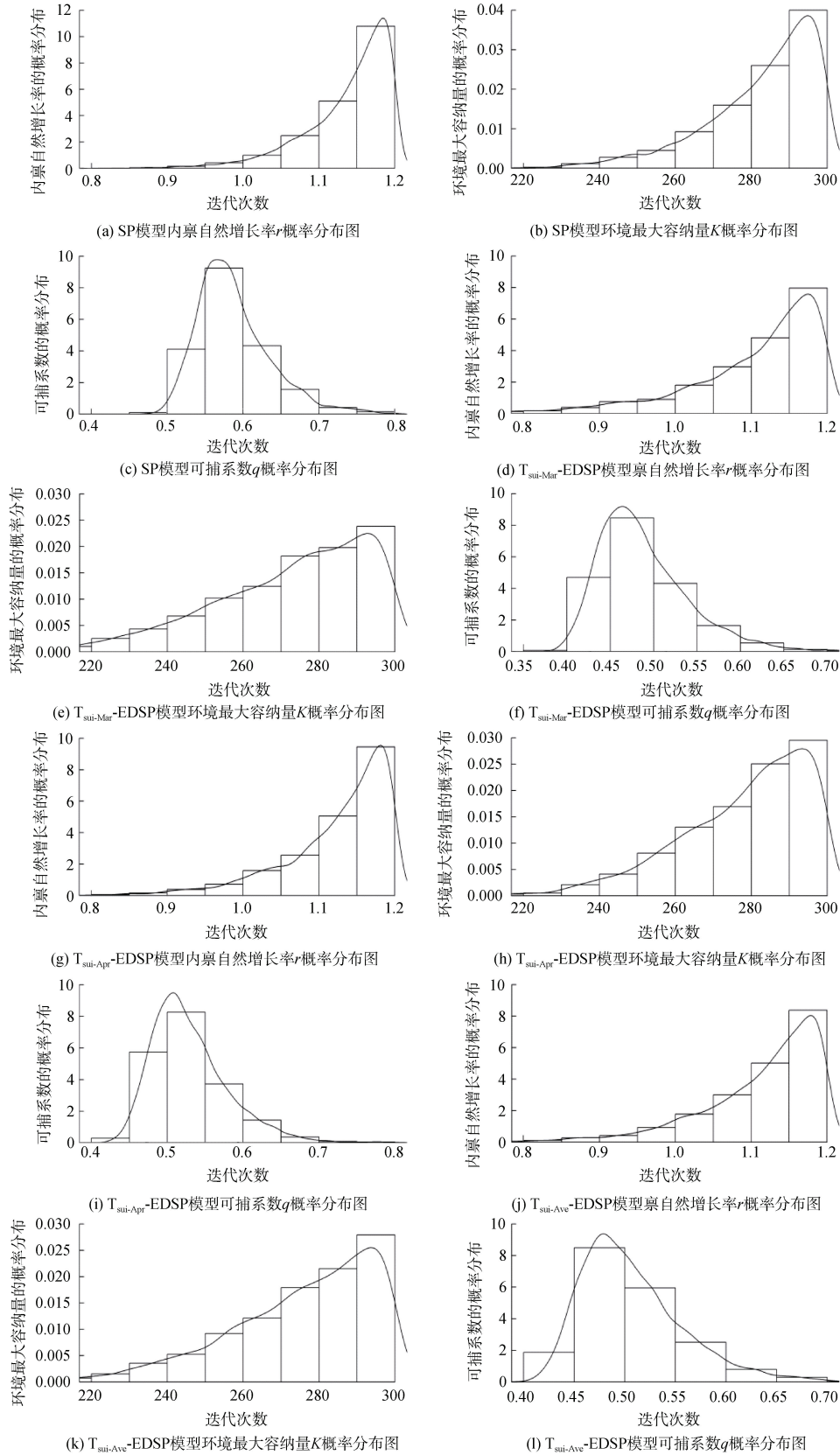


图3 SP模型、 T_{sui} -EDSP模型中参数内禀自然增长率 r ，环境容纳量 K ，可捕系数 q 的概率分布图
 Fig. 3 Distributions of r , K , and q parameters in the SP and T_{sui} -EDSP model

表 2 马鲛鱼的剩余产量模型中参数统计表

Tab. 2 Summary statistics of the parameters for Schaefer surplus production models for *S. niphonius* fishery

模型	参数						DIC
	<i>r</i>		<i>K/10⁴ t</i>		<i>q</i> ($\times 10^{-7}$)		
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	
SP 模型	1.139	0.054	282.322	14.685	1.000	0.000 1	143.2
T _{sui-Mar} -EDSP 模型	1.169	0.031	283.984	12.885	1.000	0.000 1	137.3
T _{sui-Apr} -EDSP 模型	1.147	0.050	288.194	9.966	1.000	0.000 2	140.7
T _{sui-Ave} -EDSP 模型	1.166	0.034	285.118	12.280	1.000	0.000 1	132.6

2.2 东海马鲛鱼生物学参考点和种群状态

SP 模型的 MSY 为(8.125×10⁵t), *B*_{MSY} 的值为 1.433×10⁶ t; T_{sui-Ave}-EDSP 模型的 MSY 值为(8.109×10⁵t), *B*_{MSY} 值为(1.429×10⁶ t); T_{sui-Mar}-EDSP 模型的 MSY 值为(8.371×10⁵ t), *B*_{MSY} 约为(1.433×10⁶ t), 所以, T_{sui-Mar}-EDSP 模型中的 MSY 和 *B*_{MSY} 值均高于 T_{sui-Ave}-EDSP 模型中的值, 并且 T_{sui-Mar}-EDSP 模型中, MSY 和 *B*_{MSY} 高于 SP 模型中的对应值。T_{sui-Apr}-EDSP 模型的资源量范围是 1.721×10⁶~2.2×10⁶ t, *F*_{*t*}=0.186 73, 在四个模型中最小, 其最大可持续产量 *B*_{MSY}=1.455×10⁶ t 为最大值, T_{sui-Ave}-EDSP 模型的 MSY 和 *B*_{MSY} 低于其他三个模型。

SP 模型中的 *F*_{tar} 的值为 0.519 67, *F*_{MSY} 的值为 0.577 42, *F*_{tar} 和 *F*_{MSY} 均小于其他 3 个 EDSP 模型中的值, 在所有剩余产量模型中, 1994—2015 年间, 马鲛鱼的捕捞死亡率 *F* 远小于 *F*_{tar} 和 *F*_{MSY} 的值, 同时, 每年马鲛鱼的总渔获量也低于最大可持续产量 MSY 的值(图 1; 表 3)。本研究通过捕捞死亡率/最大可持续捕捞死

亡率和资源量/最大可持续资源量, 即 *F*/*F*_{MSY} 和 *B*/*B*_{MSY} 的比值对资源状态进行评估, 四种剩余产量模型的评估马鲛鱼的生物量都处于良好状态, 即 *B*/*B*_{MSY}>1(表 3), 基于最优的剩余产量模型 T_{sui-Ave}-EDSP 模型的计算结果可知, 该资源未过度捕捞(图 4)。

3 讨论

对于中上层鱼类, 环境变量在调节其种群动态中受到广泛重视^[26-27]。SST 的变化对环境容纳量(*K*)和内禀增长率(*r*)有重要影响, 资源丰度与海表温、表面盐度和水深显著相关(*P*<0.05), 环境条件的改变会影响东海马鲛鱼的资源量^[7, 28-29]。因此, 评估马鲛鱼种群资源状态必定要考虑栖息地气候和海洋环境因素^[16], 而鱼卵和幼体是鱼类种群中重要的群体, 鱼卵和幼体对环境变化高度敏感, 外界环境条件会影响其存活率, 所以, 产卵场的环境条件对种群资源至关重要^[30-31]。

表 3 1994—2015 年通过 SP 模型、T_{sui-Mar}-EDSP 模型、T_{sui-Apr}-EDSP 和 T_{sui-Ave}-EDSP 模型计算得到的生物参考点统计表
Tab. 3 Fishery biological reference points estimated by the SP, T_{sui-Mar}-EDSP, T_{sui-Apr}-EDSP, and T_{sui-Ave}-EDSP model in 1994-2015

生物参考点 \ 模型	SP	T _{sui-Mar} -EDSP	T _{sui-Apr} -EDSP	T _{sui-Ave} -EDSP
<i>B</i> _{MSY} /×10 ⁴ t	143.26	143.31	145.48	142.88
<i>B</i> _{lim} /×10 ⁴ t	35.814	35.827	36.371	35.719
MSY/×10 ⁴ t	81.253	83.713	83.334	81.089
<i>F</i> _{tar}	0.519 67	0.530 39	0.522 75	0.519 67
<i>F</i> _{MSY}	0.577 42	0.589 33	0.580 83	0.577 41
<i>F</i> _{<i>t</i>}	0.205 53	0.189 90	0.186 73	0.206 07

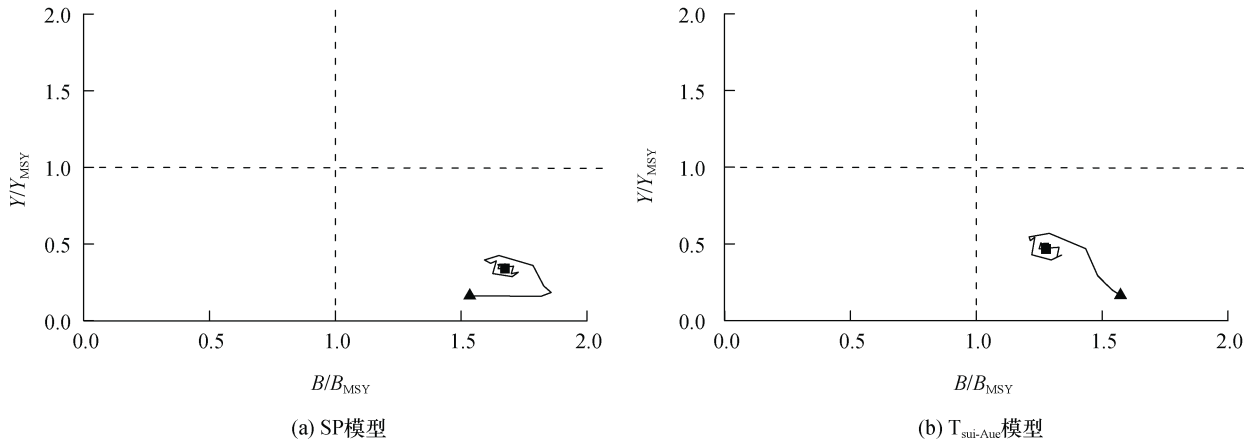


图 4 1994—2015 年 SP 模型(a)和 $T_{sui-Ave}$ -EDSP 模型(b)中马鲛鱼的种群状态

Fig. 4 Stock status of *S. niphonius* fishery from 1994 to 2015 based on the SP model (a) and $T_{sui-Ave}$ -EDSP model (b)

注: 黑色三角形是起始年份 1994, 黑色矩形为结束年份 2015

本研究分析了 1994 年至 2015 年 CPUE 与渔获量之间的关系。根据日本西海区水产研究所的渔业统计数据表明, 1994—2015 年, CPUE 的变化趋势几乎与渔获量变化趋势相同, 渔获量和 CPUE 在 1998—2000 年之间达到峰值, 在 2005—2015 年, CPUE 与渔获量相比有较大波动, 但总体趋势一致, 尽管从 2007—2015 年, 渔获量总体上保持稳定, 但实际东海马鲛鱼的年渔获量波动很大, 年渔获量由于捕捞技术、捕捞规模等影响较大, 并不能反映马鲛鱼资源相对丰度真实情况, 因此选用 CPUE 作为马鲛鱼资源丰度指标(图 2)。

本研究中贝叶斯原理的一个重要过程就是对参数设定先验分布, 先验分布的选择将直接影响到评估的结果^[32-33], 由于鲜有马鲛鱼资源评估的研究, 已知的生物学信息较少, r 、 K 、 q 的先验分布均使用了无信息的均匀分布, 根据 MCMC 的运算结果, 三个模型参数 r 、 K 、 q 的后验分布与先验分布具有很大差异, 这说明马鲛鱼的渔业数据可以提供足够的信息, 以估计建立的四个剩余产量模型中的参数(图 5)。

通过 BRPs 来调控渔业死亡率以及为渔业管理提供更加准确的参考, 这一点引起了研究学者的广泛关注^[25]。拟合度高的模型可以将计算的生物参考点用于渔业管理^[34], 生物参考点是调控捕捞政策的重要组成部分, 也是制定捕捞策略的重要基础^[35]。为评估当前的种群资源状态, 可以将生物参考点与当前资源量、亲体补充量以及捕捞水平(即是否正处于过度捕捞状态、已经过度捕捞、充分开发以及未

被开发利用)相结合, 以确定当前资源状态, 这将为第二年的捕捞政策奠定科学基础^[36]。在估算 BRPs 时, 本研究考虑环境条件随时间的变化对生物参考点的影响, 这与传统种群评估中假设的静态参考点相比, 更好地反映了适宜性栖息地随时间的变化。例如, 加入环境因子的剩余产量模型比传统的 SP 模型的 DIC 值要小(表 2), $T_{sui-Ave}$ -EDSP 的模型计算结果比 $T_{sui-Mar}$ -EDSP 和 $T_{sui-Apr}$ -EDSP 的模型计算结果更准确, 这种基于环境因子的剩余产量模型的方法更有利于对马鲛鱼的种群资源按照时间进行管理, 即根据时间变化来调整对其的管理方案, 优化种群资源结构。

通过模型结果可知: 1994—2015 马鲛鱼的年渔获量均低于 MSY, 资源量也高于 B_{MSY} , 目前的 F_t 均低于 F_{tar} , 这表明东海马鲛鱼没有发生过度捕捞(图 4)^[6]。近年来, 马鲛鱼资源量一直处于较高水平, 说明马鲛鱼的渔业资源尚未得到充分开发和利用, 这种情况下, EDSP 模型的优势显而易见, 根据环境条件的变化来调整马鲛鱼的开发策略^[10]。另外, 随着捕捞强度的提高, 与 SP 模型相比 EDSP 模型被证明是更符合实际的, 因为 $T_{sui-Ave}$ -EDSP 模型中的“ B/B_{MSY} ”的值(过度捕捞的计算公式, 阈值为 1)往往比 SP 模型中的“ B/B_{MSY} ”的值更接近“1”。此外, 当海面温度降低或升高时(超出最适温度 10~19 °C 范围), r 和 K 减小, 这就要求减少捕捞努力量, 以免过度利用马鲛鱼资源量, 造成过度捕捞影响生态结构。

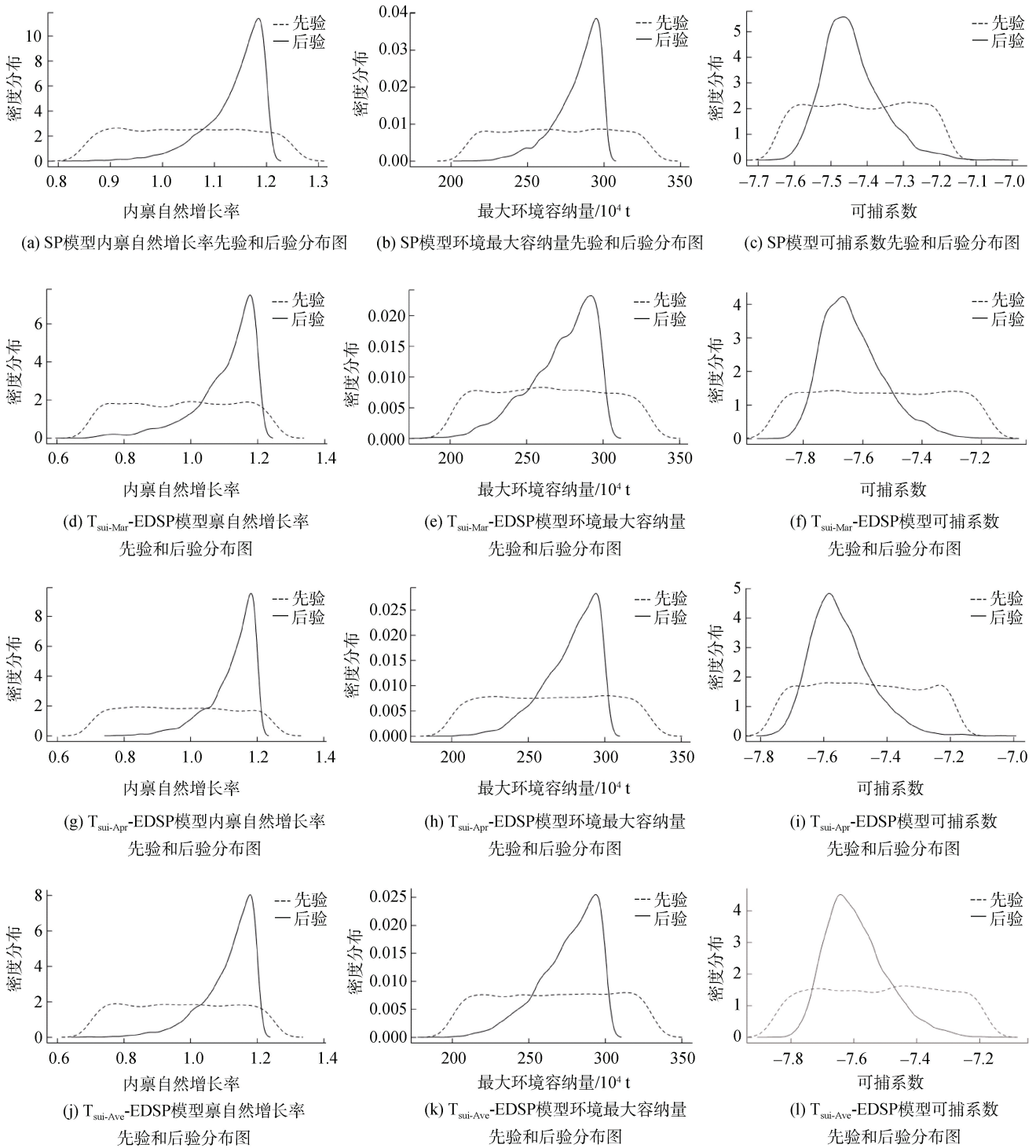


图 5 参数的先验分布和后验分布对比图

Fig. 5 Comparison of priori and posterior parameter distributions

然而，模型的不确定性主要来自以下两个方面：
 (1) 与数据相关的不确定性：尽管捕捞数据来自中国、日本和韩国，但 CPUE 等渔业数只使用日本单方提供的渔业数据进行研究，与实际的数据会有一定的

偏差；
 (2) 模型参数的不确定性：例如，假设 1994 年的生物量为 $(2.2 \times 10^6 \text{ t})$ ，这可能会对马鲛鱼的资源评估产生偏差。另外，本文还假设 CPUE 的标准差 σ 等于 0.2，假设标准差 σ 值对模型选择和种群资源评估

的影响需要进一步探索, 该研究对于保护马鲛鱼资源, 维持中国马鲛鱼的生产规模, 保持马鲛鱼产量的稳定, 合理开发和利用马鲛鱼资源具有现实意义。此外, 盐度也经常被用作营养物通量的间接度量, 而海面风场会影响卵和幼体的输送和分布, 而本研究中阐述这海洋环境因素的意义与其在调节马鲛鱼栖息地质量和种群动态中的生态作用是一致的, 因此, 未来的研究应考虑海面风场和盐度等海洋环境^[37]。

4 结论

本文基于传统的剩余产量模型 SP, 建立了基于环境因子的剩余产量模型 EDSP, 研究表明, 剩余产量模型虽然简单, 但与复杂模型相比, 仍可以提供与管理有关的更准确、更符合实际的估计数据^[19, 38]。更进一步地建立基于环境因子的剩余产量模型将是评价东海马鲛鱼种群资源较为适合的方法。

综上, 在评估马鲛鱼种群资源状态时, EDSP 模型计算的结果比传统的 Schaefer 剩余产量模型的计算结果更好。在种群评估中加入环境因素, 这对于基于生态系统的渔业管理十分重要, 本文研究发现东海马鲛鱼的生物参考点 BRPs 很大程度上取决于4月份产卵场的适宜海表温的比例, 即适宜的海表温的格网数越多, 马鲛鱼的资源量越大, 这项研究结果表明, 在评估和管理东海马鲛鱼种群资源动态时应考虑产卵场的4月份海表温度。

参考文献:

- [1] 邱盛尧, 李登来, 徐彬. 论我国渔业管理对黄渤海蓝点马鲛资源的贡献[J]. 齐鲁渔业, 2007, 24(3): 39-42.
QIU Shengyao, LI Denglai, XU Bin. On the contribution of fishery management to the resources of *Scomberomoms niphonius* (Cuvier et Valeneiennes) in Bohai Sea and Yellow Sea[J]. Shandong Fisheries, 2007, 24(3): 39-42.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [3] 高橋素光, 依田真里. 平成 29(2017)年度サワラ東シナ海系群の資源評価[R]. 西海区水産研究所, 2017: 1627-1641.
TAKAHASHI Motoko, MARI Yoda. Resource evaluation of the mackerel East China Sea in 2017[R]. Seikai Fisheries Research Institute, 2017: 1627-1641.
- [4] 张秋华, 程家骅, 徐汉祥, 等. 东海区渔业资源及其可持续利用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007.
ZHANG Qiuhua, CHENG Jiahua, XU Hanxiang, et al. Fisheries Resources and Sustainable Utilization in the East China Sea Region[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007.
- [5] ZHANG C, YE Z J, LI Z G, et al. Population structure of *Scomberomorus niphonius* in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea: evidence from random forests based on otolith features[J]. Fisheries Science, 2016, 82: 251-256.
- [6] 中国产业信息网. 2017-2022 年中国马鲛鱼市场现状研究分析及未来发展趋势预测报告[R]. 2017. <https://www.chyxx.comChina>.
Industry Information Network. Report on the Research and Analysis of China's Mackerel Market Status and Future Development Trend Forecast Report in 2017-2022[R]. 2017. <https://www.chyxx.comChina>.
- [7] 宋超, 王宇坛, 刘尊雷, 等. 象山港蓝点马鲛鱼卵、仔稚鱼的时空分布特征及其与环境因子关系[J]. 中国水产科学, 2016, 23(5): 1197-1204.
SONG Chao, WANG Yutan, LIU Zhunlei, et al. Relationship between environmental factors and distribution of *Scomberomorus niphonius* eggs, larvae, and juveniles in Xiangshan Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(5): 1197-1204.
- [8] 黄克勤. 马鲛鱼[J]. 水产科技情报, 1973(11): 31.
HUANG Keqin. Japanese Spanish mackerel[J]. Fisheries Science & Technology Information, 1973(11): 31.
- [9] 韦晟. 蓝点马鲛在黄、渤海的渔场渔期与环境的关系[J]. 海洋湖沼通报, 1980, 2: 34-40.
WEI Sheng. The fishing seasons and grounds of the blue spotted mackerel, *Scomberomorus niphonius* in the Yellow sea and Bohai relation to environmental factors[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1980, 2: 34-40.
- [10] 袁杨洋, 叶振江, 刘群, 等. 黄海南部春季蓝点马鲛 (*Scomberomorus niphonius*) 渔场海洋学特征与渔期[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(4): 506-510.
YUAN Yangyang, YE Zhenjiang, LIU Qun, et al. Fishery oceanography and spatial-temporal distribution of *Scomberomorus niphonius* in spring in Southern Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(4): 506-510.
- [11] VASCONCELOS R P, EGGLESTON D B, LE PAPE O, et al. Patterns and processes of habitat-specific demographic variability in exploited marine species[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 71: 638-647.
- [12] 官文江, 田思泉, 朱江峰, 等. 渔业资源评估模型的研究现状与展望[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1112-1120.

- GUAN Wenjiang, TIAN Siqun, ZHU Jiangfeng, et al. A review of fisheries stock assessment models[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(5): 1112-1120.
- [13] 郑晓琼, 李纲, 陈新军. 基于环境因子的东、黄海鲈鱼剩余产量模型及应用[J]. 海洋湖沼通报, 2010(3): 41-48.
- ZHENG Xiaoqiong, LI Gang, CHEN Xinjun. Application of environmentally dependent surplus production model for *Scomber Japonicus* in the East China Sea and Yellow Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010(3): 41-48.
- [14] WANG J T, WEI Y, CHEN X J, et al. Stock assessment for the western winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) using environmentally dependent surplus production models[J]. Scientia Marina, 2016, 80(1): 69-78.
- [15] OOZEKI Y, WATANABE Y. Comparison of somatic growth and otolith increment growth in laboratory-reared larvae of Pacific saury, *Cololabis saira*, under different temperature conditions[J]. Marine Biology, 2000, 136(2): 349-359.
- [16] 刘蕊. 渤、黄、东海蓝点马鲛渔场分布的逐月与年间变化[D]. 上海: 上海海洋大学, 2009.
- LIU Rui. The monthly and interannual variability in distribution of fishing grounds of the Spanish Mackerel, *Scomberomorus niphonius* (Cuvier et Valenciennes) in Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[D]. Shanghai: Ocean University of Shanghai, 2009.
- [17] TIAN Y, AKAMINE T, SUDA M. Modeling the influence of oceanic-climatic changes on the dynamics of Pacific saury in the northwestern Pacific using a life cycle model[J]. Fisheries Oceanography, 2010, 13(S1): 125-137.
- [18] GRAS M, ROEL B A, COPPIN F, et al. A two-stage biomass model to assess the English Channel cuttlefish (*Sepia officinalis* L.) stock[J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71(9): 2457-2468.
- [19] LUDWING 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.
- [20] LUDWING D, WALTERS C J. A robust method for parameter estimation from catch and effort data[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, 46(1): 137-144.
- [21] PRAGER M H. A suite of extensions to a non-equilibrium surplus-production model[J]. Fishery Bulletin, 1994, 92: 374-389.
- [22] STURTZ S, LIGGES U, GELMAN A. R2WinBUGS: A package for running WinBUGS from R[J]. Journal of Statistical Software, 2005, 12(3): 1-16.
- [23] 李纲, 陈新军, 官文江, 等. 东黄海鲈鱼资源评估与管理决策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- LI Gang, CHEN Xinjun, GUAN Wenjiang, et al. Stock Assessment and Management for Mackerel in East Yellow Sea[M]. Beijing: Ocean Press, Beijing, 2011.
- [24] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- ZHAN Bingyi. Fisheries stock assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] 童玉和, 陈新军, 田思泉, 等. 渔业管理中生物学参考点的理论及其应用[J]. 水产学报, 2010, 34(7): 1040-1050.
- TONG Yuhe, CHEN Xinjun, TIAN Siqun, et al. Theory and application of biological reference points in fisheries management[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(7): 1040-1050.
- [26] ROBERTS M J. The influence of the environment on chokka squid *Loligo vulgaris reynaudii* spawning aggregations: steps towards a quantified model[J]. African Journal of Marine Science, 1998, 20: 267-284.
- [27] AGNEW D J, BEDDINGTON J R, HILL S L. The potential use of environmental information to manage squid stocks[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59: 1851-1857.
- [28] TIAN S Q, CHEN X J, CHEN Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. Fisheries Research, 2009, 95(2-3): 181-188.
- [29] WANG J T, CHEN X J, LEI L, et al. Comparison between two forecasting models of fishing ground based on frequency statistic and neural network for *Ommastrephes bartramii* in the North Pacific Ocean[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2014, 34(3): 82-88.
- [30] CHAMBERS R C, TRIPPEL E A. Early life history and recruitment in fish populations[M]. London: Chapman & Hall, 1997, 78-81.
- [31] WAN R J, ZENG D Y, BIAN X D, et al. Species composition and abundance distribution pattern of ichthyoplankton and their relationship with environmental factors in the East China Sea ecosystem[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1375-1398.
- [32] CHEN Y, BREEN P A, ANDREW N L. Impacts of outliers and mis-specification of priors on Bayesian fisheries-stock assessment[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57: 2293-2305.
- [33] 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]. Cana-

- dian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, 58: 1871-1890.
- [34] FAO. Precautionary approach to fisheries. Part2: Scientific papers[M]. Rome: FAO fisheries technical paper 350/2. 1996: 210.
- [35] GABRIEL W L, MACE P M. Proceedings of the fifth national NMFS stock assessment workshop: A review of biological reference points in the context of the precautionary approach, January 34-35, 1999[C]. NOAA Technical Memorandum: Scientific Publications Office, 2015.
- [36] DEROBA J J, BENICE J R. A review of harvest policies: Understanding relative performance of control rules[J]. Fisheries Research, 2008, 94: 210-223.
- [37] LEGGETT W C, FRANK K T. Paradigms in fisheries oceanography[J]. Oceanography, 2008, 46: 331-364.
- [38] LUDWING D, WALTERS C J. A robust method for parameter estimation from catch and effort data[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, 46(1): 137-144.

Resource assessment of *Scomberomorus Niphonius* dependent environmental factors in East China Sea

SUI Xin^{1, 2}, WANG Jin-tao^{1, 3, 4, 5, 6}, CHEN Xin-jun^{1, 3, 4, 5, 6}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. East China Sea Fishery Research Institute, CAFS, Shanghai 200090, China; 3. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China; 4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 6. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China)

Received: Jul. 22, 2020

Key words: *Scomberomorus niphonius*; surplus production model; environmental factors; East China Sea

Abstract: Marine environmental variable is among the important factors that affect fishery resources and fishing ground for pelagic fishes. Stock dynamics of mackerel are greatly affected by environmental conditions. Therefore, environmental factors should be considered in the assessment and management of mackerel resources. We assumed that the temporal variability of spawning ground with favorable sea surface temperature of 10~19°C (T_{sui}) affects the carrying capacity (K). In order to accurately study the key month affecting the spawning of mackerel, this study established an EDSP model using the appropriate spawning field temperature ratio of environmental factors in March ($T_{sui-Mar}$), April ($T_{sui-Apr}$), and their average ($T_{sui-Ave}$), respectively. In this study, three types of environmentally dependent surplus production (EDSP) model were used to evaluate the population dynamics of *S. niphonius*: $T_{sui-Mar}$ -EDSP, $T_{sui-Apr}$ -EDSP, and $T_{sui-Ave}$ -EDSP. Using Bayesian to estimate the model parameters, the results revealed that deviation information criterion (DIC) values of EDSP models is dependent on the environmental factors, such that $T_{sui-Mar}$, $T_{sui-Apr}$, and $T_{sui-Ave}$ were smaller than DIC values of the original surplus production model (SP). According to DIC values, the estimated $T_{sui-Ave}$ -EDSP model was better than the SP and other two EDSP models, which has the highest accuracy. In $T_{sui-Ave}$ -EDSP, maximum sustainable yield (MSY) varied from 8.125×10^5 to 8.371×10^5 t and biomass at MSY level varied from 1.429×10^6 to 1.455×10^6 t. The fishing mortality rates of *S. niphonius* from 1994 to 2015 were much lower when compared to the target and MSY fishing mortality (F_{tar} and F_{MSY}) and the stock biomass was higher than B_{MSY} , thus suggesting that the mackerel was not overfished or undergoing overfishing. The management reference points in the EDSP model for *S. niphonius* were more conservative when compared to those in the conventional model. It is recommended that the future assessment and management of mackerel in East China Sea should consider the spawning environmental conditions.

(本文编辑: 赵卫红)