

DOI: 10.11758/yykxjz.20161114001

http://www.yykxjz.cn/

崔雪森, 周为峰, 唐峰华, 戴阳, 张胜茂, 程田飞. 基于约束线性回归的柔鱼栖息地指数渔场预报模型构建. 渔业科学进展, 2018, 39(1): 64-72

Cui XS, Zhou WF, Tang FH, Dai Y, Zhang SM, Cheng TF. The construction of habitat suitability index forecast model of *Ommastrephes bartramii* fishing ground based on constrained linear regression. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(1): 64-72

基于约束线性回归的柔鱼栖息地指数 渔场预报模型构建*

崔雪森^① 周为峰 唐峰华 戴 阳 张胜茂 程田飞

(中国水产科学研究院东海水产研究所 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室 上海 200090)

摘要 柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)是我国在西北太平洋重要的商业捕捞对象,对其渔场进行准确预报是提高渔业生产能力的重要内容。本研究分别选取 2005~2013 年我国在该海域的柔鱼渔获量和捕捞努力量作为计算适宜度指数(SI)的 2 种指标,利用包括海表温度、叶绿素 a (Chl-a)浓度、表温梯度强度和 100 m 水深的 Argo 浮标水温数据在内的海洋环境因子,通过非线性回归,生成了不同环境因子的 SI 曲线。在考虑约束条件的前提下,建立 2 种柔鱼渔场的栖息地指数(HSI)模型,并利用逐步回归剔除不显著的解释变量。2 种模型拟合优度比较的结果显示,利用渔获量建立的模型具有更高的精度,其中,7~11 月模型的调整后相关系数分别为 0.853 ($P<0.001$)、0.773 ($P<0.001$)、0.789 ($P<0.001$)、0.745 ($P<0.001$)和 0.724 ($P<0.0001$)。各环境因子的 SI 权重系数符合约束条件,并随着季节的变化,权重值有所不同。在主要渔汛期间(7、8 和 10 月),100 m 水深温度的 SI 对 HSI 得分起到了最关键作用;而在渔汛末期(11 月),与海表温度相关的 SI 成为影响 HSI 的最重要因子。利用该模型对 2014 年进行预报实验,预报结果与实际渔场在空间分布上具有一致性。全年统计结果显示,高 HSI (>0.7)的区域渔获量占总渔获量的 49.06%,而低 HSI (<0.3)区域渔获量仅占 9.06%,表明该模型具有一定的渔场预报能力。

关键词 柔鱼;西北太平洋;约束条件;栖息地指数

中图分类号 S931.3 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2018)01-0064-09

柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)是西北太平洋重要的经济鱼种之一,其种群通常分为东部秋生群、中部秋生群、西部冬春生群和中东部冬春生群,其中,西部冬春生群位于 170°E 以西渔场(Yatsu *et al*, 1998; Chen *et al*, 2003),是中国在西北太平洋从事鱿钓作业的传统捕捞对象(陈新军等, 2011)。作为一种短生命周期的生态机会主义者,柔鱼的资源丰度与分布对产

卵与索饵场的环境条件很敏感(Chen *et al*, 1999; Nigmatullin *et al*, 2001)。根据该鱼种的这一特性,国内外学者分别设计了诸如 MaxEnt(Alabia *et al*, 2015a、2015b)、GLM 和 GAM(Tian *et al*, 2009b)、贝叶斯方法(Cao *et al*, 2014; 崔雪森等, 2015)、支持向量机(崔雪森等, 2016)等多种柔鱼资源评估和渔场分析预报模型。除此之外,栖息地指数(Habitat suitability

* 国家科技支撑计划(2013BAD13B01)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2015T07)共同资助[This work was supported by National Key Technology R&D Program (2013BAD13B01) and Special Fund for Basic Scientific Research Business of Central Public Research Institutes (2015T07)].

① 通讯作者: 崔雪森, 副研究员, E-mail: cui1012@sh163.net

收稿日期: 2016-11-14, 收修改稿日期: 2017-01-08

index, HSI)模型也在渔业领域得到了越来越广泛的应用(Vinagre *et al.*, 2006; 冯波等, 2007; Chen *et al.*, 2009; 丁琪等, 2015), 柔鱼渔场与环境因子之间关系的研究也有相关报道(陈新军等, 2009; Tian *et al.*, 2009a; Chen *et al.*, 2010; Igarashi *et al.*, 2013)。

相关渔业研究中, HSI 模型的最基本算法包括连乘法、最小值法、最大值法、几何平均法和算术平均法等 5 种(龚彩霞等, 2011), 其中算术平均法是较为常用的一种方法, 在柔鱼的相关研究中, 通常比其他方法能更好地定义最适栖息地指数(陈新军等, 2009; Chen *et al.*, 2010)。过去算术平均法中各个要素的适宜度指数多采用相同的权重, 近年来, 学者越来越注重不同环境因子对综合栖息地指数的贡献大小。通过专家知识赋予各个环境因子的 SI 变量不同的权重, 或采用对不同变量权重的排列组合, 用枚举法从中筛选出最优模型的权重, 从而提升了分析和预报渔场的准确性(胡贯宇等, 2015; 范江涛等, 2016)。但专家知识常带有一定的主观性, 而通过权重组合筛选得到的结果也可能只是一组近似的最优权重组合, 也未考虑不同环境因子 SI 之间的共线性问题。另外, 当环境变量数目增大到一定程度时, 上述枚举法也会更繁琐。

本研究拟在算术平均法 HSI 模型基础上, 利用约束条件的线性回归, 得出不同环境适宜指数权重的最优值组合, 从而为简化模型参数筛选过程、提升利用模型分析和预报渔场精度提供一定的参考。

1 材料与方 法

1.1 数据处理

1.1.1 渔获数据 本研究中的渔获数据由上海海洋大学鱿钓技术组提供, 时间范围为 2005~2013 年, 空间范围为 145°~170°E、35°~47°N, 内容包括生产日期、空间信息(经度和纬度)、产量、作业次数等, 按 1°×1°网格分月进行统计。尽管单位捕捞努力量渔获量(Catch per unit effort, CPUE)常用作渔业资源的丰度指数, 但在基于商业目的捕捞数据中, CPUE 与资源量的关系常会受到渔民捕捞行为的影响(易明华等, 2009), 因此, 并不能很好地表征柔鱼的资源丰度。虽然渔获量受捕捞努力量的影响, 但多年累加的渔获量重心可反映柔鱼资源的空 间位置变化(唐峰华等, 2015), 因此, 本研究利用分月的多年累加渔获量作为计算适宜度指数的指标。另外, 以分月累加捕捞努力量(作业渔船数)为基础计算适宜度指数, 以便同由渔获计算的适宜度指数模型进行比较, 从而获得更优

的模型。

1.1.2 环境数据来源与处理 大量研究表明, 柔鱼渔场与海表温度(SST, °C)、叶绿素 a 浓度(Chl-a, mg/m³)和 SST 梯度强度(Grad, °C/km)有密切关系(Chen *et al.*, 1999; 余为等, 2015; Chen *et al.*, 2014)。本研究中 SST 与 Chl-a 的月平均数据均从 NASA 的 Oceancolor 网站 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) 获得, 按照 1°×1°网格进行平均化处理, 并根据 Pi 等(2010)的方法计算 SST 梯度强度。本研究对 SST 梯度和 Chl-a 分布进行 D'Agostino 检验, 结果显示, 偏度值(Skewness)分别达到 2.082($P<0.001$)和 0.659($P<0.001$), 均为显著正偏分布, 因此, 对其均取自然对数, 分别记作 lnGrad 和 lnChl-a。

另外, 研究表明, 西北太平洋柔鱼西部渔场水温垂直结构对柔鱼资源分布有重要影响, 白天该水域柔鱼栖息水层约为 100 m(陈新军, 2015)。本研究将该深度水温(T_{100} , °C)也作为参考环境因子之一。该数据由日本海洋地球科技机构(JAMSTEC)提供 (<http://www.jamstec.go.jp/>), 为 Argo 月平均客观分析结果, 水平空间分辨率为 1°×1°。

1.2 HSI 模型的建立

HSI 模型是 20 世纪 80 年代美国鱼类和野生动物保护署提出的, 是定量研究生物对栖息地适应程度与栖息地生境因子之间关系的经典方法, 模型所得指数越高, 栖息地质量越高, 指数取值范围在 0~1 之间(Bain *et al.*, 1982)。

任中华等(2014)在长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)渔场分析中采用了非线性回归, 获得各环境的 SI 曲线。本研究也采用了类似方法, 以渔获量或捕捞努力量作为因变量, 分别建立与各环境因子的回归曲线(公式 1), 再对拟合值进行归一化处理, 从而确定各环境因子的 SI(公式 2)。

$$Y = ae^{b(m-u)^2} \quad (1)$$

$$SI = Y/a = e^{b(m-u)^2} \quad (2)$$

式中, a 、 b 和 u 均为待定的参数, Y 为渔获产量或捕捞努力量, m 为环境变量的集合, 即 $m \in$ (SST, lnGrad, lnGhla, T_{100})。

同时, 分别以渔获量和捕捞努力量为基础, 计算综合栖息地指数(HSI)(Tian *et al.*, 2009; Igarashi *et al.*, 2013)。根据 Brooks(1997)的建议, 当 $0 \leq HSI \leq 0.3$ 时, 可视为低质量栖息地, 而当 $0.7 \leq HSI \leq 1$ 时为高质量栖息地, 本研究将以此为标准对预报结果进行统计, 并对渔场预报效果进行评价。

1.3 带有约束的线性回归

将历史数据中各环境因子的适宜度指数与综合适宜指数匹配后,在一定约束条件下进行回归。回归模型形式(公式3)为:

$$HSI = \sum_m \beta_m SI_m \quad (3)$$

约束条件为:

$$0 \leq \beta_m \leq 1 \text{ 且 } \sum_m \beta_m = 1$$

式中, m 定义同 1.2, β 为回归方程中解释变量的系数,利用统计分析软件 SAS(Statistical analysis system)进行求解。

由于 SI 均由环境因子与渔获量或捕捞努力量的关系建立,在理论上二者不应出现负相关,但在 SAS 中不能以不等式的形式对 β_m 进行限定,而一旦结果中 β_m 出现负值的情况,则可能是由于不同环境因子

的 SI 之间存在多重共线性造成,这会导致模型估计失真。针对这种可能出现的情况,本研究拟通过以 AIC(Akaike information criterion)最大值为筛选标准的逐步回归方法,调整进入模型的解释变量个数,确保模型具有正确的物理意义。另外,模型添加的约束条件是否恰当,取决于模型在施加约束条件前后的解释能力有无较大变化,或者是约束条件对模型的影响是否显著。如果约束条件对模型的影响显著,则可判定模型中的约束条件不成立(Pringle *et al*, 1971)。

2 结果

2.1 各环境因子的 SI 拟合参数

根据各月份渔获量和捕捞努力量在不同环境因子下的分布情况,利用公式(1)分别进行非线性回归,获得各环境因子的 SI 拟合曲线的参数值(表 1 和表 2),

表 1 以渔获量为基础的 4 种环境因子 SI 曲线的拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of SI curves for 4 environmental factors based on catch

环境因子 Environmental factor	参数 Parameter	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	11月 November
海表温度 SST	a	1396.093	9733.155	4420.723	4377.309	2734.804
	b	-0.097	-0.640	-0.135	-0.280	-0.456
	u	18.156	18.727	18.112	15.005	13.232
叶绿素 a 浓度 lnChl- a	a	1520.892	5738.650	3789.270	4044.069	2790.793
	b	-3.568	-5.178	-2.363	-5.028	-8.856
	u	-1.809	-1.650	-1.173	-0.768	-1.010
SST 梯度强度 lnGrad	a	2938.713	9902.128	9882.691	4913.897	1371.952
	b	-9.871	-8.577	-15.175	-4.799	-1.198
	u	-4.646	-4.398	-4.329	-4.305	-4.183
100 m 海水温度 T_{100}	a	1921.776	7131.652	5625.570	2898.164	1493.591
	b	-0.155	-0.308	-0.224	-0.104	-0.109
	u	8.659	4.627	3.654	4.726	6.311

表 2 以捕捞努力量为基础的 4 种环境因子 SI 曲线的拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of SI curves for 4 environmental factors based on fishing effort

环境因子 Environmental factor	参数 Parameter	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	11月 November
海表温度 SST	a	1274.084	3336.964	1861.086	2778.124	1299.522
	b	-0.107	-0.398	-0.110	-0.409	-0.363
	u	18.995	18.918	18.363	15.360	13.170
叶绿素 a 浓度 lnChl- a	a	2648.514	3400.434	2479.571	4862.455	1924.206
	b	-12.063	-4.206	-2.093	-12.414	-5.219
	u	-1.982	-1.645	-1.280	-0.737	-1.203
SST 梯度强度 lnGrad	a	3778.298	5496.910	6365.371	4900.782	1742.264
	b	-3.743	-3.301	-5.574	-3.099	-0.389
	u	-4.622	-4.485	-4.349	-4.471	-3.319
100 m 海水温度 T_{100}	a	1625.169	2524.857	2498.248	1622.894	804.219
	b	-0.118	-0.218	-0.233	-0.074	-0.104
	u	9.188	4.822	3.748	5.398	6.619

P 值均小于 0.0001, 由 b 和 u 值计算各环境因子 SI 值(公式 2)。

2.2 模型选择与模型参数

利用不同的 SI 来源(渔获量和捕捞努力量)的环境因子 SI 值和综合栖息地指数 HSI , 在约束条件(公式 3)限制下进行逐步回归, 构建 7~11 月的渔预报模型。对模型进行检验, 调整后相关系数见表 3($P < 0.001$)。

由表 3 可知, 当以渔获量作为 SI 来源构建模型时, 各月调整后相关系数在 0.724~0.853 之间, 全年平均值为 0.777, 均大于以捕捞努力量为 SI 来源的模型, 表明以渔获量为基础的模型拟合结果更为准确。

其中, 7~9 月以及 11 月的模型剔除了作用不显著的变量(7 月为 SI_{InGrad} , 8、9 月均为 SI_{SST} , 11 月为 $SI_{InChl-a}$); 而在 10 月的模型中, 4 个解释因子均得到保留。经 t 检验, 各解释变量 P 值均小于 0.05。各月份模型中解释变量的系数和均为 1 且都为正值, 符合事先的约束条件。 $RESTRICT$ 值均不显著, 表明约束条件对模型的解释能力无明显影响。所有模型中方差膨胀因子(VIF)均小于 10, 说明解释变量之间不存在多重共线性现象, 从而不会影响到回归模型参数的正确估计。最大参数估计值和最大第 II 类平方和的变量随季节有所变化, 7 月为 SI_{T100} 和 $SI_{InChl-a}$, 8 月均为 SI_{T100} , 9 月为 $SI_{InChl-a}$, 10 月均为 SI_{T100} , 而 11 月均为 SI_{SST} (表 4)。

表 3 基于 2 种不同 SI 来源的模型拟合优度

Tab.3 The goodness-of-fit of models based on 2 different SI sources

SI 来源 Source of SI	调整后相关系数 Adjusted correlation coefficient					
	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	全年平均 Annual average
渔获量 Catch	0.853	0.773	0.789	0.745	0.724	0.777
捕捞努力量 Fishing effort	0.485	0.606	0.566	0.564	0.477	0.540

表 4 回归模型的各项参数估计

Tab.4 Parameter estimation of regression model

月份 Month	变量 Variable	参数估计值 Parameter estimation	标准误差 Standard error	t 统计量 t -Statistic	P 值 P value	第 II 类平方和 Type II SS	方差膨胀因子 VIF
7 月 July	SI_{SST}	0.258	0.075	3.450	0.001	1.328	5.635
	SI_{T100}	0.436	0.074	5.890	0.000	3.864	4.386
	$SI_{InChl-a}$	0.306	0.049	6.270	0.001	4.372	1.575
	RESTRICT	0.824	2.667	0.310	0.758	0.011	
8 月 August	SI_{T100}	0.477	0.053	8.940	0.000	9.179	1.222
	SI_{InGrad}	0.381	0.067	5.700	0.000	3.731	3.246
	$SI_{InChl-a}$	0.142	0.068	2.090	0.038	0.501	2.783
	RESTRICT	2.835	2.278	1.240	0.214	0.178	
9 月 September	SI_{T100}	0.268	0.077	3.500	0.001	1.335	4.288
	SI_{InGrad}	0.234	0.047	4.950	0.000	2.666	0.908
	$SI_{InChl-a}$	0.498	0.084	5.890	0.000	3.783	5.436
	RESTRICT	2.783	2.103	1.320	0.187	0.191	
10 月 October	SI_{SST}	0.153	0.067	2.290	0.023	0.635	2.237
	SI_{T100}	0.365	0.083	4.420	0.000	2.367	4.866
	SI_{InGrad}	0.206	0.058	3.520	0.001	1.503	2.074
	$SI_{InChl-a}$	0.276	0.080	3.440	0.001	1.433	4.890
	RESTRICT	-4.352	2.493	-1.750	0.081	0.369	
11 月 November	SI_{SST}	0.401	0.072	5.590	0.000	3.478	1.669
	SI_{T100}	0.289	0.098	2.940	0.004	0.958	4.683
	SI_{InGrad}	0.310	0.070	4.410	0.000	2.159	3.353
	RESTRICT	-0.641	1.998	-0.320	0.750	0.011	

2.3 2014年预报结果检验

将2014年7~11月的环境数据分别输入模型,计算该海域柔鱼渔场的HSI值,与各月的相对渔获量值进行叠加,结果见图1。其中,各月渔获量的相对值高低采用四分位数的级别来表示(1~4级依次增高)。

结果显示,综合适宜度指数高值在7月处于40°N左右,主要分布在155°E以西和160°E以东两块水域,实际生产主要在西部的高HSI值区;8月预报渔场向东北方向移动,与实际渔场移动方向一致,9月的预报和实际渔场面积均达到最大;10~11月渔场向西南方向移动。总体上看,HSI相对较大值(暖色)区域和实际渔场的位置大体接近或重合,二者的移动方向在空间上具有一致性。统计结果见表5,2014年HSI>0.7的渔区(高质量栖息地)的产量占全年总产量的49.06%,而低质量栖息地的渔区(HSI<0.3)中的渔获量的占比不足10%。从分月产量分布看,7~10月产量

占比随着HSI 3个级别(栖息地质量由低到高)依次递增,而11月HSI介于低和高质量栖息地之间的产量百分比最高,达42.12%,说明该月预报效果相对稍差。

3 讨论

西北太平洋柔鱼属于外洋性高度洄游的头足类。在渔汛初期,柔鱼向北或东北洄游,进入黑潮与亲潮交汇区,8~10月主要分布在亲潮前锋区域及其周边水域。10~11月后,柔鱼随着亲潮冷水团的扩展向南洄游(陈新军,1995),其渔场分布、变动与海洋生物、物理因子关系极其密切(Chen *et al.*, 1999; Ichii *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2014; 余为等, 2015)。本研究虽未直接使用环境因子建立模型,但模型中某个环境SI变量的存在与否以及系数大小的变动,在一定程度上也代表了环境因子对渔场影响程度的变化。研究表明,在不同月份不同环境因子对渔场分布的作用也有所差异。

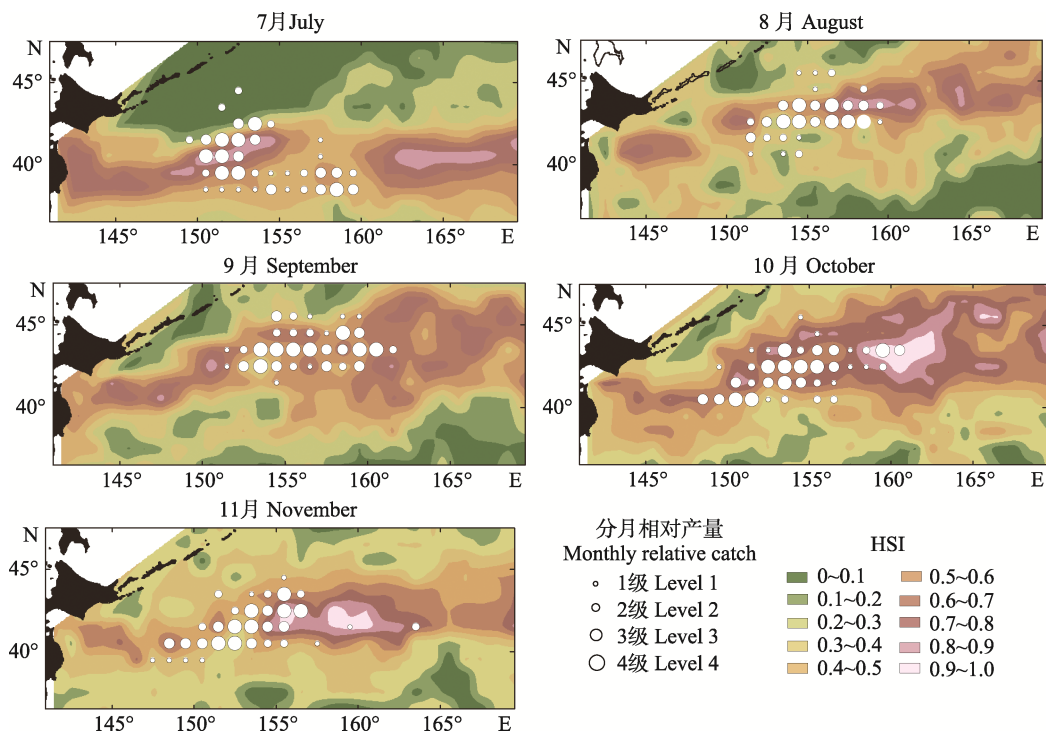


图1 2014年实际作业渔场与HSI模型预报结果比较

Fig.1 The comparison of practical fishing grounds and predicted ones based on HSI model

表5 2014年实际产量在不同HSI级别中所占比例

Tab.5 Proportion of practical catch for different levels of HSI in 2014 (%)

HSI 级别 HSI level	实际渔获产量占比 Proportion of practical total catch					全年 Full year
	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	11月 November	
0~0.3	6.77	16.10	4.48	0.01	22.69	9.06
0.4~0.7	34.75	33.68	47.53	45.02	42.12	41.88
0.7~1	58.49	50.23	47.99	54.97	35.19	49.06

3.1 不同季节的环境因子重要性分析

研究表明, SST 对柔鱼渔场的分布影响显著(陈新军, 1995; Tian *et al.*, 2009), 但由于柔鱼具有垂直洄游现象, 一般白天栖息水层较深, 因此, 深层水温结构在渔场形成中起到了重要的作用(王尧耕等, 2005)。超声波发射器得到的信号显示, 西部冬春生种群白天(日出 1 h 后到日落 1 h 前)较高频率的栖息深度应为 120 m 左右(酒井等, 2016), 而 0~100 m 温度梯度是影响渔获量主要因子之一(陈新军等, 2004)。村田等(1983)认为, 北太平洋 170°E 以西海域的主要分布水域, 6~8 月 100 m 水深的水温与柔鱼渔场有密切关系: 其中, 6 月位于黑潮暖水分支的 10°C 等温线, 7 月和 8 月位于黑潮分支与亲潮前锋之间的 5°C 等温线附近。表 4 显示, 7、8 和 10 月 SI_{T100} 系数在模型中具有最大权重或最高的第 II 类平方和, 表明了 100 m 水深温度的 SI 对 HSI 的起到了最重要作用, 也间接反映了该水层水温对渔场的较大影响, 这与之前的学者所得出的结论一致。同时, 从模型参数表中也可发现, 尽管 100 m 水深温度在几乎整个渔汛期中都起到了重要的作用, 但当进入 11 月后, 其作用有所减弱(表 4)。该月与 SST 相关的 SI 成为影响综合适应度指数的最重要因子。11 月以后亲潮势力增强, 柔鱼会随着亲潮的南下而向南洄游, 因此, 在渔汛后期, 亲潮 SST 的特征等值线应成为确定渔场位置的重要参考指标。

柔鱼在夏秋季索饵洄游阶段, 渔场位置主要处于黑潮锋面附近; 而到了冬季的产卵洄游阶段, 中心渔场集中于亲潮的锋面或暖水团中(陈新军, 1995; 余为等, 2015)。由此可知, 柔鱼渔场与水温的锋面关系相当密切。本研究显示, 除 7 月外, 柔鱼的综合适应度指数都与海表温度梯度 SI 显著相关($P < 0.001$), 说明锋面对柔鱼的汇聚作用明显。另一方面, 因 Chl-*a* 浓度与柔鱼饵料生物密切相关(余为等, 2015), 因此, 其对渔场的作用也不可忽略。从柔鱼产量与 Chl-*a* 浓度的关系来看, 柔鱼渔发期 Chl-*a* 含量分布集中, 并呈偏态分布(王文宇等, 2003)。在本研究中, 7~10 月模型中与 Chl-*a* 相关的 SI 变量均表现为显著($P < 0.05$), 也印证了这一点。而到了 11 月, 随着水温降低, 模型中与 Chl-*a* 浓度相关的 SI 变量因不显著而在逐步回归中剔除。Wang 等(2010)研究表明, 11 月北太平洋叶绿素平均浓度在整个渔汛期中处于最高水平, 叶绿素分布较均匀。同时, 进入 10、11 月后, 随着海水混合的增加和层化的减弱, 对于某些鱼类[(如秋刀鱼(*Cololabis saira*))]来说, 决定渔场位置和洄游路

线的主要因子不再是食物, 而是生理忍耐温度(Saitoh *et al.*, 1986)。可能正是由于以上原因, 使得该月份的叶绿素浓度不再成为影响柔鱼分布的显著因子, 取而代之的是与海水温度相关的环境因子。

3.2 模型的检验精度问题

2014 年的检验结果虽能在一定程度上体现出本模型的预报效果, 但与前人的相关研究比较, 预报精度并无明显提高, 究其原因可能有以下三方面: (1)环境指标的选择不同。本研究采用了海表温度、叶绿素浓度、SST 梯度和 100 m 水深温度 4 个因子构建模型, 过去类似研究中所涉及的环境指标还包括表层或次表层盐度(SSS)、海面高度(SSHA)等(Chen *et al.*, 2010; Igarashi *et al.*, 2013), 环境指标的不同导致了预报能力的差异。(2)空间分辨率的设定问题。考虑到 Argo 数据的空间分辨率较低, 本研究以 $1^\circ \times 1^\circ$ 为空间单位构建了模型, 而过去研究多采用 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Tian *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010)。较低的空间分辨率会损失更多的有用环境细节信息, 从而降低了模型的预报能力。(3)空间上固定的约束权重系数。陈新军等(2007)研究表明, 不同海域柔鱼分布的适宜环境会随着空间位置的改变而发生变化。如在 150°E 以西海域, 柔鱼的最适 SST 为 13~18°C, 150°~165°E 海域为 14~18°C, 165°~180°E 海域为 11~14°C。而本模型在整个渔场范围内都采用了固定的约束权重系数, 从而导致某些月份预报结果与实际生产位置有所偏离。

3.3 与其他模型比较

鱼类通常会受多个环境因子的影响, 因此, 将多个适宜度指数相结合, 计算其综合的适宜度指数, 其物理意义明确, 相对于神经网络、支持向量机等黑盒模型, 更便于直接对海洋环境与渔场关系做出合理解释。传统渔业 HSI 的应用研究中, 不同环境的 SI 权重值通常由渔业专家知识获得, 但该方法带有一定的主观判断成分(Prager *et al.*, 1990)。冯永玖等(2014)通过遗传算法自动优化鱼类 HSI 的建模并获取参数, 但该模型复杂性和建模难度均较高。本研究通过带约束条件的回归, 计算出各个环境因子 SI 的不同权重, 从而体现出各个栖息地变量的相对重要性, 过程相对容易。

另一方面, 本研究中由于考虑了回归系数的约束条件, 使该模型在应用中也受到了一定的限制。如果参数 RESTRICT 值过大, 就有可能影响模型的参数估计的正确性。同时, 解释变量间的多重共线性问题也是值得注意的一点。尤其是当观测数量相对解释变

量不大时,问题可能更为突出。在这种情况下,可结合 Lasso 回归等方法,消除多重共线性带来的负面影响,从而对回归系数给出更为稳健的估计(易雨君等, 2013)。

综上所述,本研究在前人 HSI 模型已有成果的基础上,利用带约束的线性回归方法,获得了不同环境 SI 的最佳权重组合和参数估计,构建了西北太平洋柔鱼渔场的 HSI 预报模型,具有一定的实用性。研究表明,该方法不仅有利于分析不同环境因子对渔场生成的重要性,而且也降低 HSI 模型结构的复杂度提供了一种有效手段。

参 考 文 献

- Alabia ID, Saitoh S, Mugo R, *et al.* Identifying pelagic habitat hotspots of neon flying squid in the temperate waters of the central North Pacific. *PLoS One*, 2015a, 10(11): e0142885
- Alabia ID, Saitoh S, Mugo R, *et al.* Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific. *Fisheries Oceanography*, 2015b, 24(2): 190–203
- Bain MB, Bain JL. Habitat suitability index models: Coastal stocks of striped bass. U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, 1982, FWS/OBS–82/10.1.29
- Brooks RP. Improving habitat suitability index models. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25(1): 163–167
- Cao J, Chen X, Tian S. A Bayesian hierarchical DeLury model for stock assessment of the west winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwest Pacific Ocean. *Bulletin of Marine Science*, 2014, 91(1): 1–13
- Chen CS, Chiu TS. Abundance and spatial variation of *Ommastrephes bartramii* (Mollusca: Cephalopoda) in the eastern North Pacific observed from an exploratory survey. *Acta Zoologica Taiwanica*, 1999, 10(2): 135–144
- Chen CS, Chiu TS. Variations of life history parameters in two geographical groups of the neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, from the North Pacific. *Fisheries Research*, 2003, 63(3): 349–366
- Chen X, Li G, Feng B, *et al.* Habitat suitability index of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) from July to September in the East China Sea. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(1): 93–102
- Chen X, Tian S, Chen Y, *et al.* A modeling approach to identify optimal habitat and suitable fishing grounds for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean. *Fishery Bulletin*, 2010, 108(1): 1–14
- Chen X, Tian S, Guan W. Variations of oceanic fronts and their influence on the fishing grounds of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(4): 45–54
- Chen XJ, Cao J, Liu BL, *et al.* Stock assessment and management of *Ommastrephes bartramii* by using a Bayesian Schaefer model in the Northwestern Pacific Ocean. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(10): 1572–1581 [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. *水产学报*, 2011, 35(10): 1573–1581]
- Chen XJ, Liu BL, Tian SQ, *et al.* Forecasting the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* with SST-based habitat suitability modelling in Northwestern Pacific. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(6): 707–713 [陈新军, 刘必林, 田思泉, 等. 利用基于表温因子的栖息地模型预测西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)渔场. *海洋与湖沼*, 2009, 40(6): 707–713]
- Chen XJ, Tian SQ. Effects of SST and temp-spatial factors on abundance of neon flying squid *Ommastrephes bartrami* in the Northwestern Pacific using generalized additive models. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007(2): 104–133 [陈新军, 田思泉. 利用 GAM 模型分析表温和时空因子对西北太平洋海域柔鱼资源状况的影响. *海洋湖沼通报*, 2007(2): 104–113]
- Chen XJ, Xu LX. Analysis of relationship between fishing ground of *Ommastrephes bartrami* and surface water temperature and its vertical distribution from 150°E to 165°E in the Northwestern Pacific. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2004(2): 36–44 [陈新军, 许柳雄. 北太平洋 150°E ~ 165°E 海域柔鱼渔场与表温及水温垂直结构的关系. *海洋湖沼通报*, 2004(2): 36–44]
- Chen XJ. An approach to the relationship between the squid fishing ground and water temperature in the Northwestern Pacific. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1995, 4(3): 181–185 [陈新军. 西北太平洋柔鱼渔场与水温因子的关系. *上海水产大学学报*, 1995, 4(3): 181–185]
- Chen XJ. Fisheries resources and oceanography. Beijing: China Ocean Press, 2015 [陈新军. 渔业资源与渔场学. 北京: 海洋出版社, 2015]
- Cui XS, Tang FH, Zhang H, *et al.* The establishment of Northwest Pacific *Ommastrephes bartramii* fishing ground forecasting model based on naive Bayes method. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(2): 37–43 [崔雪森, 唐峰华, 张衡, 等. 基于朴素贝叶斯的西北太平洋柔鱼渔场预报模型的建立. *中国海洋大学学报*, 2015, 45(2): 37–43]
- Cui XS, Tang FH, Zhou WF, *et al.* Fishing ground forecasting model of *Ommastrephes bartramii* based on support vector machine (SVM) in the Northwest Pacific. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(5): 1–7 [崔雪森, 唐峰华, 周为峰, 等. 基于支持向量机的西北太平洋柔鱼渔场预报模型构建. *南方水产科学*, 2016, 12(5): 1–7]
- Ding Q, Chen XJ, Wang JT. Comparison habitat suitability index model of *Illex argentinus* and its application into fishing ground forecasting. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(3): 8–13 [丁琪, 陈新军, 汪金涛. 阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*) 适宜栖息地模型比较及其在渔场预报中的应用. *渔业科学进展*, 2015, 36(3): 8–13]
- Fan JT, Chen ZZ, Zhang J, *et al.* *Sthenoteuthis oualaniensis* fishing grounds analysis based on marine environmental factors and different weight coefficients in the Zhongsha

- and Xisha Islands, South China Sea. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(4): 57–63 [范江涛, 陈作志, 张俊, 等. 基于海洋环境因子和不同权重系数的南海中沙西沙海域鸢乌贼渔场分析. *南方水产科学*, 2016, 12(4): 57–63]
- Feng B, Chen XJ, Xu LX. Study on distribution of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean based on habitat suitability index. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(6): 805–812 [冯波, 陈新军, 许柳雄. 应用栖息地指数对印度洋大眼金枪鱼分布模式的研究. *水产学报*, 2007, 31(6): 805–812]
- Feng YJ, Chen XJ, Yang XM, *et al.* HSI modeling and intelligent optimization for fishing ground forecasts using a genetic algorithm. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4333–4346 [冯永玖, 陈新军, 杨晓明, 等. 基于遗传算法的渔情预报 HSI 建模与智能优化. *生态学报*, 2014, 34(15): 4333–4346]
- Gong CX, Chen XJ, Gao F, *et al.* Review on habitat suitability index in fishery science. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(2): 260–269 [龚彩霞, 陈新军, 高峰, 等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(2): 260–269]
- Hu GY, Chen XJ, Wang JT. Forecasting fishing ground of *Illex argentinus* based on different weight habitat suitability index in the southwestern Atlantic. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(8): 88–95 [胡贯宇, 陈新军, 汪金涛. 基于不同权重的栖息地指数模型预报阿根廷滑柔鱼中心渔场. *海洋学报*, 2015, 37(8): 88–95]
- Ichii T, Mahapatra K, Sakai M, *et al.* Life history of the neon flying squid: Effect of the oceanographic regime in the North Pacific Ocean. *Marine Ecology Progress*, 2009, 378: 1–11
- Igarashi H, Awaji T, Ishikawa Y, *et al.* Development of a habitat suitability index model for neon flying squid by using 3-D ocean reanalysis product and its practical use. *JAMSTEC Report of Research and Development*, 2014, 18: 89–101
- Murata M, Ishii M, Shingu C. Seasonal changes in location and water temperature of the fishing grounds by Jigging fishery for flying Squid, *Ommastrephes bartrami*(LESUEUR), with some considerations on migration and occurrence of the fishing ground. *Bulletin of the Hokkaido Regional Fisheries Research Laboratory, Fisheries Agency*, 1983(48): 53–77 [村田守, 石井正, 新宫千臣. アカイカの釣漁場の位置と水温の季節変化、並びに回遊と漁場形成に関する若干の考察. *水産庁北海道区水産研究所研究報告*, 1983(48): 53–77]
- Nigmatullin ChM, Nesis KN, Arkhipkin AI. A review of the biology of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae). *Fisheries Research*, 2001, 54(1): 9–19
- Pi QL, Hu JY. Analysis of sea surface temperature fronts in the Taiwan Strait and its adjacent area using an advanced edge detection method. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(7): 1008–1016
- Prager MH, Fabrizio MC. Comparison of logistic regression and discriminant analyses for stock identification of anadromous fish, with application to striped bass (*Morone saxatilis*) and american shad (*Alosa sapidissima*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1990, 47(8): 1570–1577
- Pringle RM, Rayner AA. *Generalized inverse matrices with applications to statistics*. London: Griffin, 1971
- Ren ZH, Chen XJ, Fang XY. Forecasting fishing grounds of *Thunnus alalunga* in the eastern Pacific based on habitat suitability index. *Marine Fisheries*, 2014, 36(5): 385–395 [任中华, 陈新军, 方学燕. 基于栖息地指数的东太平洋长鳍金枪鱼渔场分析. *海洋渔业*, 2014, 36(5): 385–395]
- Saitoh S, Kosaka S, Iisaka J. Satellite infrared observations of Kuroshio warm-core rings and their application to study of Pacific saury migration. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1986, 33(11–12): 1601–1615
- Sakai M, Kato Y. Research on *Ommastrephes bartrami* migration action for HSI model [EB/OL]. [2016-11-21] <https://www.jamstec.go.jp/drc/j/recca/akaika/H23seika/H23seika2.1.5.pdf> [酒井光夫, 加藤慶樹. HSI モデルのためのアカイカの回遊行動調査[EB/OL] [2016-11-21] <https://www.jamstec.go.jp/drc/j/recca/akaika/H23seika/H23seika2.1.5.pdf>
- Tang FH, Fan W, Wu YM, *et al.* Seasonal changes of relationship between marine environment and squid fishing resources in North Pacific Ocean. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3): 242–249 [唐峰华, 樊伟, 伍玉梅, 等. 北太平洋柔鱼渔场资源与海洋环境关系的季节性变化. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(3): 242–249]
- Tian S, Chen X, Chen Y, *et al.* Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartrami* in the northwestern Pacific Ocean. *Fisheries Research*, 2009a, 95(2–3): 181–188
- Tian S, Chen X, Chen Y, *et al.* Standardizing CPUE of *Ommastrephes bartrami* for Chinese squid-jigging fishery in Northwest Pacific Ocean. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009b, 27(4): 729–739
- Vinagre C, Fonseca V, Cabral H, *et al.* Habitat suitability index models for the juvenile soles, *Solea solea*, and *Solea senegalensis*, in the Tagus estuary: Defining variables for species management. *Fisheries Research*, 2006, 82(1–3): 140–149
- Wang WY, Zhou CH, Shao QQ, *et al.* An application of RS/GIS on study on the migration dynamics of *Ommastrephes bartrami*. *High Technology Letters*, 2003, 13(11): 90–93 [王文宇, 周成虎, 邵全琴, 等. RS/GIS 支持下的柔鱼中心渔场时空动态迁移研究. *高技术通讯*, 2003, 13(11): 90–93]
- Wang WY, Zhou CH, Shao QQ, *et al.* Remote sensing of sea surface temperature and chlorophyll-*a*: Implications for squid fisheries in the north-west Pacific Ocean. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(17–18): 4515–4530
- Wang YG, Chen, XJ. *The resource and biology of economic oceanic squid in the world*. Beijing: China Ocean Press, 2005 [王尧耕, 陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业. 北京: 海洋出版社, 2005]
- Yatsu A, Tanaka H, Mori J. Population structure of the neon

- flying squid, *Ommastrephes bartramii*, in the North Pacific Ocean. In: Okutani T. Contributed papers to international symposium on large pelagic squids. Tokyo: Japan Marine Fishery Resources Research Center, 1998: 31–48
- Yi MH, Guan WJ, Chen XJ. The relationship between CPUE and fish abundance based on ideal free distribution theory: Take the large light purse seine fishery of mackerel in Yellow Sea and East China Sea as an example. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(4): 325–330 [易明华, 官文江, 陈新军. 基于理想自由分布理论对CPUE与渔业资源关系的探讨——以我国近海鲐灯光围网渔业为例. 大连水产学院学报, 2009, 24(4): 325–330]
- Yi YJ, Cheng X, Zhou J. Research progress in habitat suitability assessment methods. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(5): 887–893 [易雨君, 程曦, 周静. 栖息地适宜度评价方法研究进展. 生态环境学报, 2013, 22(5): 887–893]
- Yu W, Chen XJ. Analysis of environmental conditions and their influence on the abundance of neon flying squid in the Northwest Pacific Ocean. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5032–5039 [余为, 陈新军. 西北太平洋柔鱼栖息地环境因子分析及其对资源丰度的影响. 生态学报, 2015, 35(15): 5032–5039]

(编辑 马瑾艳)

The Construction of Habitat Suitability Index Forecast Model of *Ommastrephes bartramii* Fishing Ground Based on Constrained Linear Regression

CUI Xuesen^①, ZHOU Weifeng, TANG Fenghua, DAI Yang,
ZHANG Shengmao, CHENG Tianfei

(Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization of Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090)

Abstract Neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) is an important commercial fishing target for China in Northwest Pacific. Accurate prediction of fishing grounds can improve the squid production capacity. The present study selected historical catch and fishing effort data of Chinese squid-jigging fishery from 2005 to 2013 as suitability index (SI) sources. SI curves were created through nonlinear regression based on 4 environmental factors, including sea surface temperature (SST), chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*), SST gradient (Grad) and the temperature of 100 m water layer (T_{100}) from Argo float dataset. On the premise of given constrained conditions, two habitat suitability index (HSI) models were constructed based on catch and fishing effort. Non-significant explanatory variables in the model were eliminated *via* the stepwise regressions. By comparing the goodness-of-fit of two models, catch-based model provided higher accuracy than fishing effort-based one. The adjusted correlation coefficients were 0.853 ($P<0.001$), 0.773 ($P<0.001$), 0.789 ($P<0.001$), 0.745 ($P<0.001$) and 0.724 ($P<0.0001$) from July to November, respectively. The weight coefficients of SI for environmental factors were in accord with the constraint and seasonally varied. In particular, the SI of T_{100} played the most important role in the HSI score in the main fishing season (July, August and October) while the SI of SST was the major factor to affect HSI in November. The forecast experiment of HSI model was carried out with environmental factors in 2014. Spatial position of forecasted fishing grounds were consistent with actual ones, and catch in high HSI (>0.7) regions accounted for 49.06% of the total catch, while catch in low HSI (<0.3) regions accounted for only 9.06% of the total catch. These findings indicate that the HSI model is able to predict neon flying squid fishing grounds in Northwest Pacific.

Key words *Ommastrephes bartramii*; Northwest Pacific; Constrained conditions; Habitat suitability index (HSI)

① Corresponding author: CUI Xuesen, E-mail: cui1012@sh163.net