

文章编号: 1000-0615(2016)06-0893-10

DOI: 10.11964/jfc.20150509873

基于最大熵模型分析西南大西洋阿根廷滑柔鱼栖息地分布

陈 芃^{1,2}, 陈新军^{1,2,3,4*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 远洋渔业协同创新中心, 上海海洋大学, 上海 201306

3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 201306;

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

摘要: 根据2008—2010年中国鱿钓船在西南大西洋海域得到的生产数据及海洋环境数据(海表面温度, sea surface temperature, SST; 海面高度sea surface height, SSH; 叶绿素-a浓度, chlorophyll-a, chl.a), 利用最大熵模型(MaxEnt)分析捕捞主渔汛期间(1—4月)阿根廷滑柔鱼的潜在栖息地分布, 同时与实际作业位置相比较, 结合海洋环境因子分析不同年份分布差异的原因。模型运算结果显示: 阿根廷滑柔鱼潜在分布区域的变化与实际作业位置变动基本一致; 南北方向上, 2008年和2009年的潜在分布区域较为广泛, 而2010年的潜在分布区域较为狭窄, 且主要分布在45°S以南的区域。Jackknife检验表明, SST是影响阿根廷滑柔鱼分布的首要环境因子, SST等温线分布可用来表征海流的强弱进而影响阿根廷滑柔鱼的分布, 其中12 °C等温线可以作为寻找渔场的一个指标。SSH等高线分布及其涡的变化也会影响到阿根廷滑柔鱼分布。chl.a只能间接地反映阿根廷滑柔鱼渔场的分布, 不能很好地作为表征其分布的环境因子。研究表明, 分析阿根廷滑柔鱼栖息地分布及其差异原因应主要观察SST和SSH的变化。

关键词: 阿根廷滑柔鱼; 栖息地; 最大熵模型; 西南大西洋

中图分类号: S 934

文献标志码: A

阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)是当今世界重要的经济头足类捕捞对象之一, 其广泛分布于22°S~54°S的西南大西洋大陆架和大陆坡海域, 其中在35°S~52°S间的资源最为丰富^[1-2]。阿根廷滑柔鱼的分布与巴西暖流和福克兰寒流有很大的关系。研究发现^[3], 其早期生活史和产卵主要发生在两海流的辐合带中; 生长、成熟及摄食则主要发生在南巴塔哥尼亚大陆架的福克兰海流区域。方舟等^[4]报道, 我国在西南大西洋公海海域的传统作业渔场在经过2008年的高产量后, 2010年的产量极低。海洋环境因素的变化导致的栖息地范围的改变可能影响了阿根廷滑柔鱼产量。目前, 基于回归的线性模型^[5-7]、基于适宜

环境因子范围的栖息地指数模型^[8-10]以及神经网络模型^[11-13]等方法被广泛应用到头足类栖息地分布的研究中, 得到了较好的实验结果, 然而这些模型的应用往往需要多年的样本数据积累。最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)作为物种分布模拟研究的方法之一, 能够基于目标物种的有限信息对未知分布作出无偏推断, 同时对于小样本的数据集也有良好的分析能力^[14-15]。因此, 本研究使用2008—2010年3年我国鱿钓船的生产数据, 利用最大熵模型分析3年捕捞渔汛期间各月阿根廷滑柔鱼的潜在栖息地分布, 并结合海洋环境因子分析不同年份分布差异的原因, 为阿根廷滑柔鱼渔场的寻找提供依据。

收稿日期: 2015-05-05 修回日期: 2016-02-05

资助项目: 国家自然科学基金(NSFC41476129; NSFC41276156); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA092303); 上海市研究生教育创新计划; 国家科技支撑计划(2013BAD13B01)

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 数据来源

阿根廷滑柔鱼渔业数据为2008—2010年我国鱿钓船在西南大西洋的生产统计资料,包括各艘渔船每日的渔获量和作业位置,来自于上海海洋大学鱿钓技术组。本研究仅分析主渔汛1—4月份的变化。各年间变化均以月份为单位进行建模分析。

研究表明,海表面温度(sea surface temperature, SST)^[2, 16]、海面高度(sea surface height, SSH)^[17]和叶绿素-a浓度(chlorophyll-a, chl.a)^[17-18]均与阿根廷滑柔鱼的分布存在关系,因此选取这3个海洋环境因子进行分析。海洋环境数据均来源于美国NOAA的OceanWatch网站 (<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/las/servlets/dataset>),时间分辨率均为月,空间分辨率分别为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 、 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 和 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$,由于输入到最大熵模型的各环境图层必须是同一分辨率以便计算,因此使用Arcgis 10.2将数据输入进行栅格叠加并求平均值全部转换成 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的空间分辨率,数据的空间范围为 $35^{\circ}\text{S} \sim 55^{\circ}\text{S}$ 和 $50^{\circ}\text{W} \sim 70^{\circ}\text{W}$ 。

1.2 数据分析方法

产量重心分析 渔获量的空间分布可以用来表达作业渔场的时空分布。因此,首先利用重心分析法按年度和月份分别算出作业渔场的产量重心,其公式^[19]:

$$X = \sum_{i=1}^j (C_i \times X_i) / \sum_{i=1}^j C_i, Y = \sum_{i=1}^j (C_i \times Y_i) / \sum_{i=1}^j C_i$$

式中, X 、 Y 分别为某一年度的产量重心位置,分别是经度和纬度; C_i 为渔区 i 的产量; X_i 为某一年度或月份渔区 i 中心点的经度; Y_i 为某一年度或月份渔区 i 中心点的纬度; j 为某一年度渔区的总个数。

对两两年份之间经度和纬度的产量重心的变动规律进行相关分析(Person法)^[20],以探寻渔场年间时空变化的差异。

最大熵模型 最大熵值模型(MaxEnt)是一种只基于“当前存在”(presence-only)的机器学习方法^[21]。模型的原理为熵最大原则,即根据不完全信息(包括物种的分布数据和环境图层),从符合限制条件的分布中选择熵最大的分布作为最优分布,作为物种潜在栖息地分布的预测^[14, 21-22]。

具体的计算方法见文献[22]。模型的运算使用软件MAXENT 3.3.3k (<http://www.cs.princeton.edu/~sch-apire/maxent>)。输入层中的物种分布数据为捕捞当月各船每日的渔获位置所在的经纬度(不包括渔获为零的点);环境图层为由Arcgis 10.2输出的捕捞当月SST、SSH和chl.a的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 空间分辨率的ASCII栅格格式数据。此外,运算过程中输入的渔获数据中有20%被随机提取出来用于模型的测试。

模型的评价 使用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)分析方法评价模型的精度。模型原理^[23]:以预测结果的每一个值作为可能的判断阈值,从而计算得到相应的灵敏度和特异度,再以假阳性率(特异度)为横坐标,以真阳性率(灵敏度)为纵坐标绘制而成,其曲线下面积(area under curve, AUC)的大小作为模型预测准确度的衡量指标,值越接近于1表示模型判断力越强。

环境因子重要性的评价 通过模型中的Jackknife检验模块,分析各月环境因子对阿根廷滑柔鱼潜在分布的贡献率,通过仅存在此环境因子和不存在此环境因子的得分大小,来评估环境因子对阿根廷滑柔鱼栖息地分布的重要性。

栖息地分布图的绘制 模型以ASCII格式文件输出每个栅格点上阿根廷滑柔鱼分布存在的概率。将该文件导入Arcgis 10.2中进行潜在栖息地分布图的绘制,将存在概率大于0.5的区域认为是阿根廷滑柔鱼的潜在分布区域。同时,绘制环境因子(SST和SSH)等值线,以探究阿根廷滑柔鱼栖息地分布与海洋环境要素的关系。各环境因子等值线的计算使用Arcgis 10.2中的空间分析工具(spatial analyst tools)中的Kriging差值模块。

2 结果

2.1 产量重心变动状况分析

经度方向上,2008年1—2月的产量重心保持在 60.50°W 附近,2月后才开始向西移动,3—4月则保持在 61.50°W 附近;2009年,从1月开始产量重心就逐渐往西部偏移,而3—4月,产量重心向东偏移了 2.09° ;2010年产量重心的变化趋势与2009年刚好相反:从1月开始产量重心就逐渐往东部偏移,而3—4月,产量重心向西偏移了 1.80° ;相关系数及其显著性检验表明:2008年的

月间产量重心变动与2009年($\gamma = -0.09$, $P = 0.91$)和2010年($\gamma = 0.03$, $P = 0.97$)都不存在显著的相关关系; 2009年月间产量重心变动与2010年($\gamma = -0.95$, $P = 0.045$)存在显著的负相关关系(图1-a)。

纬度方向上, 2008年和2009年前3个月产量重心变化大体都由北往南变动, 但是3—4月2008年的产量重心偏移不大, 而2009年4月的产量重心较前月向北偏移了 1.87° ; 2010年的产量重

心变化趋势则完全不同于前两年: 从1月开始产量重心就逐渐往北部偏移, 而3—4月产量重心向南偏移了 2.78° 。相关系数及其显著性检验表明: 2008年月间产量重心变动与2009年($\gamma = -0.44$, $P = 0.56$)和2010年($\gamma = 0.19$, $P = 0.81$)都不存在显著的相关关系; 2009年月间产量重心变动与2010年($\gamma = -0.96$, $P = 0.036$)存在显著的负相关关系(图1-b)。

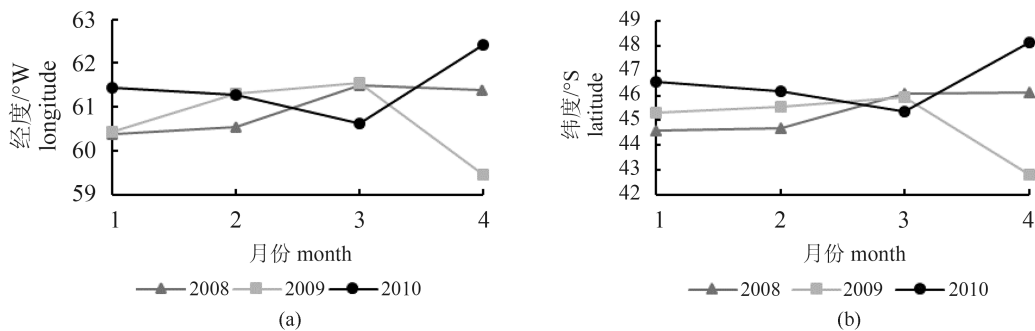


图1 2008—2010年1—4月阿根廷滑柔鱼月产量重心分布情况

Fig. 1 The distribution of monthly catch gravity for *L. argentinus* from January to April during 2008—2010

2.2 模型计算结果及评价

从最大熵模型的运算结果可看出, 阿根廷滑柔鱼潜在分布区域的变化与实际作业位置变动基本一致: 2008年1—2月, 阿根廷滑柔鱼主要分布在阿根廷大陆架的外部, 3月以后, 部分朝西南方向近岸方向移动; 2009年1—3月, 阿根廷滑柔鱼南北方向分布广泛, 直至4月才向西北方向集中至大陆架的外部; 而2010年的分布与其他两年呈现明显不同的状况: 南北方向分布狭窄, 主要分布在 45°S 以南的区域, 只有3月其栖息地才向东北方向移动至大陆架的外部; 到了4月, 又向西南方向移动甚至到达福克兰群岛南部(图2)。

利用ROC曲线获得的AUC值对模型精度进行验证, 除了2009年2月的AUC值低于0.9以外, 其他各月的训练数据和预测数据的AUC值都高于0.9甚至接近于1, 表明最大熵模型对阿根廷滑柔鱼分布的分析结果可靠(表1)。此外, 2010年各月的AUC值比另外两年同期都要高, 即2010年各月的模型精度最高。

2.3 环境因子重要性评价

根据Jackknife检验的分析结果, 在不包含某个环境因子的得分上, 不包含 $chl.a$ 的得分比不包

含SSH和不包含SST显著地要高(t 检验, $P_{SSH-chl.a} = 0.02$; $P_{SST-chl.a} < 0.01$); 不包含SSH的得分与不包含SST的得分没有显著性差异(t 检验, $P_{SSH-SST} = 0.55$)。而在只包含某个环境因子的得分上, 只包含SST的得分比只包含SSH和只包含 $chl.a$ 显著地要高(t 检验, $P_{SST-SSH} = 0.01$; $P_{SST-chl.a} = 0.03$); 只包含SSH的得分与只包含 $chl.a$ 的得分没有显著性差异(t 检验, $P_{SSH-chl.a} = 0.73$)(表2)。因此, 2008—2010年1—4月, SST是影响阿根廷滑柔鱼分布的首要因子。

3 讨论

3.1 最大熵模型及其应用

研究利用最大熵模型模拟了2008—2010年主要渔汛月份内阿根廷滑柔鱼的潜在分布区域, 产量重心变动状况及模型输出结果对比可以看出(图1, 图2), 实际作业位置及其变化与鱼种潜在分布区域的变化基本一致; 通过AUC值对模型精度进行验证(表1): 不管是模型训练数据还是测试数据, 都有可靠的分析结果, 由此表明, 最大熵模型具有较好的分析能力。一直以来, 渔情分析常常只能使用基于渔业的数据(fishery dependence data), 数据的时间和空间范围

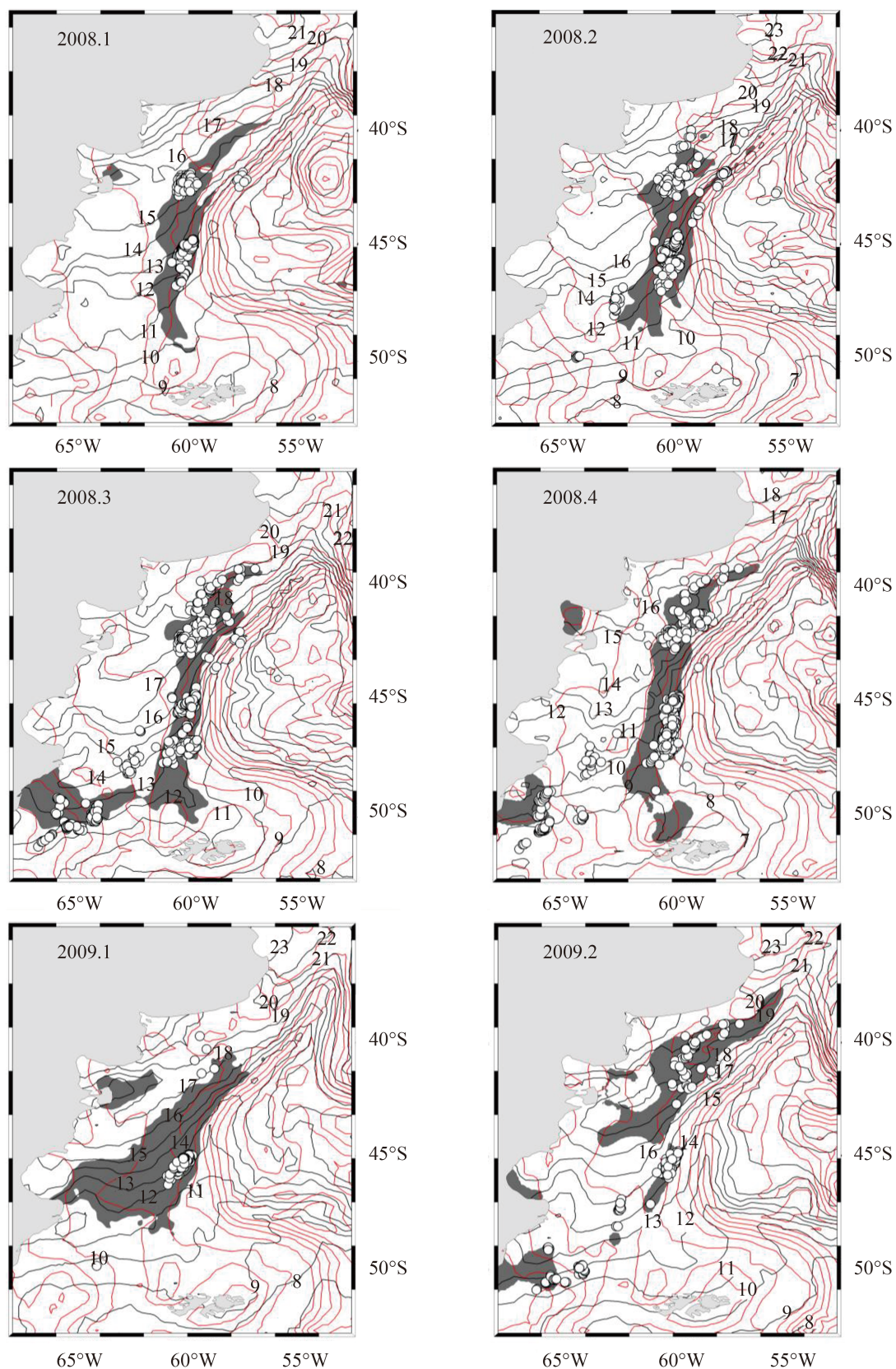
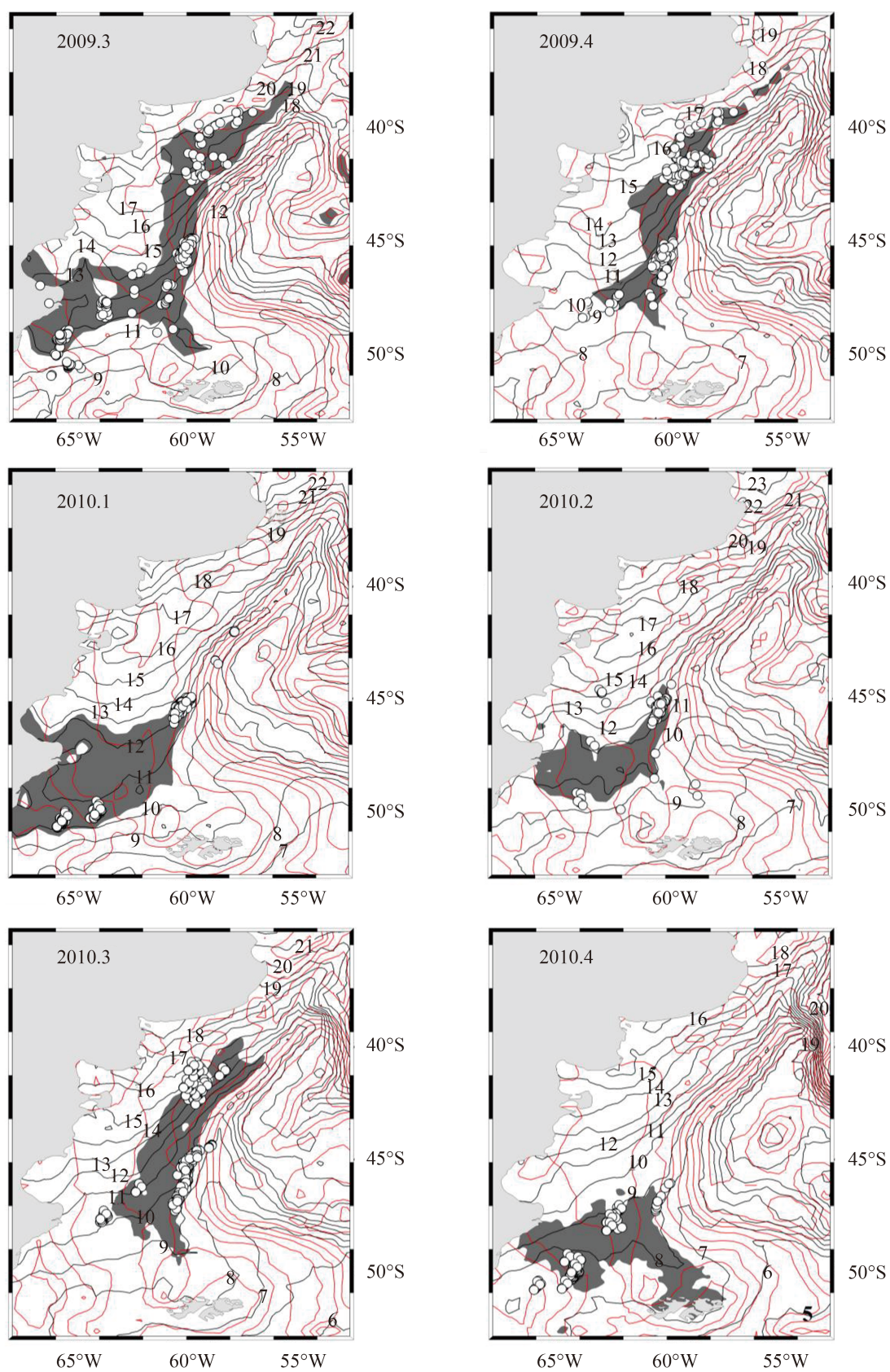


图 2 2008–2010 年 1–4 月西南大西洋阿根廷滑柔鱼潜在分布区域

Fig. 2 The potential distribution area of *L. argentinus* in the southwest Atlantic from January to April in the years of 2008, 2009 and 2010



· 续图2 ·

表 1 对阿根廷滑柔鱼分布最大熵模型的AUC值

Tab. 1 The AUC value of the maximum entropy model (MaxEnt) of the <i>L. argentinus</i> dirtubition												
月份 month	08-01	08-02	08-03	08-04	09-01	09-02	09-03	09-04	10-01	10-02	10-03	10-04
训练数据 training data	0.95	0.93	0.92	0.92	0.92	0.93	0.92	0.94	0.96	0.97	0.94	0.97
测试数据 test data	0.92	0.90	0.92	0.90	0.99	0.83	0.92	0.95	0.90	0.96	0.93	0.96

表 2 Jackknife检验结果

Tab. 2 The result of Jackknife test						
月份 month	不包含SSH without SSH	不包含SST without SST	不包含chl.a without chl.a	只包含SSH with only SSH	只包含SST with only SST	只包含chl.a with only chl.a
08-01	0.9112	1.3693	1.539	0.7564	0.5753	0.632
08-02	0.7977	0.6623	1.3135	0.3949	0.6548	0.3395
08-03	0.8069	0.6719	1.0988	0.3397	0.651	0.4072
08-04	0.923	0.9661	1.0192	0.4469	0.5809	0.6963
09-01	0.4998	0.6784	1.0487	0.4892	0.4447	0.2138
09-02	0.7503	0.7137	0.8711	0.373	0.5118	0.3904
09-03	0.6013	0.6099	1.0236	0.3771	0.5487	0.2507
09-04	0.7938	1.0297	1.31	0.5011	0.6275	0.5334
10-01	1.1325	0.6208	1.3425	0.3068	0.9932	0.4896
10-02	1.8124	1.0852	1.786	0.4491	1.3994	0.8594
10-03	1.045	1.0864	1.5328	0.6784	0.7367	0.6547
10-04	1.3114	1.0103	1.5948	0.6004	1.0575	0.5356

局限性是研究过程中的难题，而最大熵模型适用于小样本和防止结果过拟合的特点^[14, 22]正好适用于分布数据有限的物种。但是，最大熵模型的利用也有局限性：阿根廷滑柔鱼有着群体分布不同及洄游的特性^[2]，而模型利用的是当前存在的数据^[21]，模拟的结果也只能是当前捕捞群体的分布状况，不能代表整个海域阿根廷滑柔鱼的实际分布，因此最大熵模型更适合用于洄游能力较弱且群体结构单一的海洋物种。然而，我们不仅可以依据已有的研究结果加入环境因子，也可以在今后的研究中加入其他有可能影响物种分布的环境因子探究它们对其分布的影响，并以此筛选出主导因子，从而增进对物种分布与海洋环境变化关系的理解，这一点对于阿根廷滑柔鱼同样适用。

3.2 海洋环境因子与阿根廷滑柔鱼分布的关系

SST与阿根廷滑柔鱼分布的关系 渔场的变动是海洋环境变化的间接反映^[16-17]。阿根廷滑柔

鱼栖息于巴西暖流和福克兰寒流的交汇处。海流的交汇与变化通常会形成良好的渔场^[24]。Severovd等^[25]研究发现，西南大西洋SST的等温线分布可以用来表征海流锋面进而表示海流强度的变化。2008年和2009年的前2个月，阿根廷滑柔鱼在阿根廷大陆架外部都有分布，南北分布广，渔场重心偏北，而2010年则分布在45°S以南，南北分布狭窄，渔场重心偏南。与2008年前2个月相比，当年3月，在50°S附近也存在着阿根廷滑柔鱼的分布，而从等温线的分布状况看，12℃等温线也较前两个月向南偏移，同样的情况也出现在2009年的2月。而在2010年，除了1月份，12℃等温线都比前两年同期靠北，当年阿根廷滑柔鱼分布的南北范围则变得较小。阿根廷滑柔鱼作为一种暖水性种类，巴西暖流强的年份给予了其更广泛的生长及索饵的范围，12℃等温线可表示巴西暖流的强弱，从而作为寻找中心渔场的一个指标。

捕捞群体的不同洄游特性可能对模型结果产

生影响。Brunetti等^[26]将西南大西洋阿根廷滑柔鱼分成了南巴塔哥尼亚群(South Patagonic stock, SPS)、布宜诺斯艾利斯—巴塔哥尼亚群(Bonaerensis-Northpatagonic stock, BNS)、夏季产卵群(summer-spawning stock, SSS)和春季产卵群(spring-spawning stock, SpSS)4个种群, 依照其洄游特性可知, 与每年1—4月捕捞活动相关的主要是SPS和SSS种群。SPS种群其产卵和孵化在28°S~38°S海域, 随后仔稚鱼被巴西暖流向南输送进行觅食^[27], 3—4月可到达49°S~53°S海域^[2], 5—6月左右成熟之后向北洄游产卵^[1, 28]。而SSS在12月到翌年2月主要分布在42°S~46°S的布宜诺斯艾利斯—北巴塔哥尼亚的中部和外部大陆架海域, 3月之前产卵后的个体已经出现^[1]。2008年和2009年, 不管是渔场南北范围还是模型预测出的分布范围都很大, 推测是对这两个群体都有进行捕捞造成的; 而2010年, 结合前面等温线(海流强弱)与阿根廷滑柔鱼分布的关系的解释, 推测当年捕捞较多的为SPS群体, 巴西暖流过早地减弱南撤导致SSS群体洄游分布至更北的区域内, 这同时导致了当年的捕捞产量较低。陆化杰等^[29]也曾通过耳石微结构推算孵化日期判定2010年主要捕捞的是SPS群体, 这与本文的研究结果一致。2010年各月模型的精度比其他两个年份同期的模型精度都要高(表1), 估计也是由于只对一个群体进行建模导致的。

SSH和chl.a与阿根廷滑柔鱼分布的关系

在Jackknife检验得出的只包含环境因子的得分中(表2), 2008年1月和2009年1月只包含SSH的得分比另外两个环境因子都高。由图2的SSH等高线分布可知, 阿根廷滑柔鱼的潜在分布区域的北部、南部和东部都有涡的出现; 而在2010年1月、2月和4月的潜在分布区域与涡的距离较远。涡能引起上下层水的混合, 促进了饵料生物的大量繁殖, 因此成为浮游植物及海洋中上层捕食者聚集的场所^[24, 30]。宋婷婷等^[31]也认为, 涡的边缘过渡区域形成的锋面, 海流流速较大, 促使鱼类集群形成渔场。在其他头足类与海洋环境的研究中, 也有发现涡的变化对其分布的影响。有研究发现^[32], 在冷暖水涡的中间点附近捕捞的菱鳍乌贼(*Thysanoteuthis rhombus*)比在其他地方捕捞渔获量更多; Irene等^[33]在对西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)的栖息地研究中, 加入了通过海流计算出的涡动能(eddy kinetic

energy, EKE)因子, 结果表明柔鱼渔场形成也与涡有很大的关系。因此, 在今后的研究可以采用时间分辨率更高的捕捞数据和SSH数据(如周, 旬等), 具体地分析涡的变动与阿根廷滑柔鱼渔场分布变化的关系。

Jackknife检验中, 不包含chl.a的得分显著高于不包含SSH和不包含SST的, 说明chl.a不能很好地作为表征其分布的环境因子。并且chl.a的变化与海洋的环境要素如海流、涡及沿岸河流的冲淡水有关。虽然叶绿素chl.a是估算海洋生产力的基本指标, 其含量通常用于表征浮游植物生物量^[34], 但是它只能间接地反映渔场分布, 因此研究认为, 阿根廷滑柔鱼渔场寻找应主要观察SST和SSH的变化。

3.3 存在的问题和展望

本研究利用最大熵模型分析了阿根廷滑柔鱼栖息地分布与海洋环境要素的关系。但是最大熵模型是探索在满足一定限制条件(能够代表物种分布的不完整的环境信息)的情况下, 找到熵最大的概率分布(最均匀分布)作为最优分布^[35]。所以限制条件(海洋环境因子)的选取必然对模型的准确度存在影响。本文只选取了SST、SSH和chl.a进行分析。有研究发现, 海表面盐度(sea surface salinity, SSS)^[17]、水深^[36]等都会影响到阿根廷滑柔鱼的分布。因此, 今后可以将这些环境因子量化代入模型来综合分析阿根廷滑柔鱼分布的空间变化。

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: 190–194.
Wang Y G, Chen X J. The resource and biology of economic oceanic squid in the world[M]. Beijing: Ocean Press, 2005: 190–194 (in Chinese).
- [2] 陆化杰, 陈新军, 刘必林, 等. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔业生物学研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2010, 30(4): 91–98.
Lu H J, Chen X J, Liu B L, et al. Review on fishery biology of Argentinean short-finned squid *Illex argentinus* in the southwest Atlantic ocean[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2010, 30(4): 26–32 (in Chinese).
- [3] Sacau M, Pierce G J, Wang J J, et al. The spatio-temporal pattern of Argentine shortfin squid *Illex*

- argentinus* abundance in the southwest Atlantic[J]. Aquatic Living Resources, 2005, 18(4): 361–372.
- [4] 方舟, 沈锦松, 陈新军, 等. 阿根廷专属经济区内鱿钓渔场时空分布年间差异比较[J]. 海洋渔业, 2012, 34(3): 295–300.
- Fang Z, Shen J S, Chen X J, *et al.* Annual comparison of temporal and spatial distribution of fishing ground of *Illex argentinus* in the waters of exclusive economic zone of Argentina[J]. Marine Fisheries, 2012, 34(3): 295–300 (in Chinese).
- [5] 陈新军, 田思泉. 西北太平洋柔鱼资源丰度时空分布的GAM模型分析[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2006, 11(4): 295–300.
- Chen X J, Tian S Q. Temp-spatial distribution on abundance index of nylon flying squid *Ommastrephes bartrami* in the Northwestern Pacific using Generalized Additive Models[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2006, 11(4): 295–300 (in Chinese).
- [6] 唐峰华, 史赞荣, 朱金鑫, 等. 海洋环境因子对日本海太平洋褶柔鱼渔场时空分布的影响[J]. 中国水产科学, 2015, 22(5): 1036–1043.
- Tang F H, Shi Y R, Zhu J X, *et al.* Influence of marine environment factors on temporal and spatial distribution of Japanese common squid fishing grounds in the Sea of Japan[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(5): 1036–1043 (in Chinese).
- [7] 冯波, 田思泉, 陈新军. 基于分位数回归的西南太平洋阿根廷滑柔鱼栖息地模型研究[J]. 海洋湖沼通报, 2010(1): 15–22.
- Feng B, Tian S Q, Chen X J. The habitat suitability index of *illex argentinus* by using quantile regression method in the southwest Atlantic[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010(1): 15–22 (in Chinese).
- [8] Chen X J, Tian S Q, 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[J]. Fishery Bulletin, 2010, 108(1): 1–14.
- [9] 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.
- [10] Yu W, Chen X J, Yi Q, *et al.* Variability of suitable habitat of western winter-spring cohort for neon flying squid in the Northwest Pacific under anomalous environments[J]. PLoS ONE, 2015, 10(4): e0122997.
- [11] Wang J T, Yu W, Chen X J, *et al.* Detection of potential fishing zones for neon flying squid based on remote-sensing data in the Northwest Pacific Ocean using an artificial neural network[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(13): 3317–3330.
- [12] Yuan H C, Shen X Q, Chen X J. Prediction of fishing ground based on RBF neural network[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 3240–3244.
- [13] 汪金涛, 高峰, 雷林, 等. 阿根廷滑柔鱼渔场预报模型最适时空尺度和环境因子分析[J]. 中国水产科学, 2015, 22(5): 1007–1014.
- Wang J T, Gao F, Lei L, *et al.* Impacts of temporal and spatial scale as well as environmental data on fishery forecasting models for *Illex argentinus* in the southwest Atlantic[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(5): 1007–1014 (in Chinese).
- [14] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography, 2008, 31(2): 161–175.
- [15] 殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 等. 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 103–109.
- Yin X J, Zhou G S, Sui X H, *et al.* Dominant climatic factors of *Quercus mongolica* geographical distribution and their thresholds[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 103–109 (in Chinese).
- [16] Waluda C M, Rodhouse P G, Trathan P N, *et al.* Remotely sensed mesoscale oceanography and the distribution of *Illex argentinus* in the South Atlantic[J]. Fisheries Oceanography, 2001, 10(2): 207–216.
- [17] 张炜, 张健. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔场与主要海洋环境因子关系探讨[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(4): 471–475.
- Zhang W, Zhang J. A discussion about relationship between the distribution of production of *Illex argentinus* and marine environmental factors in the Southwest Atlantic Ocean[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(4): 471–475 (in Chinese).
- [18] 郑丽丽, 伍玉梅, 樊伟, 等. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔场叶绿素a分布及其与渔场的关系[J]. 海洋湖沼通报, 2011(1): 63–70.
- Zheng L L, Wu Y M, Fan W, *et al.* The distribution of chlorophyll-a and its relationship with the *Illex argentinus* fishing ground of Southwest Atlantic Ocean[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,

- 2011(1): 63–70 (in Chinese).
- [19] 陈新军, 钱卫国, 许柳雄, 等. 北太平洋150°E-165°E海域柔鱼重心渔场的年间变动[J]. 湛江海洋大学学报, 2003, 23(3): 26–32.
- Chen X J, Qian W G, Xu L X, *et al.* Comparison among annual positions of fishing grounds for *Ommastrephes bartramii* from 150°E to 165°E in the North Pacific[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2003, 23(3): 26–32 (in Chinese).
- [20] 汤银才. R语言与统计分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 260–264.
- Tang Y C. Statistical Analysis with R[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 260–264 (in Chinese).
- [21] 柳生吉, 杨健. 基于广义线性模型和最大熵模型的黑龙省林火空间分布模拟[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1620–1628.
- Liu S J, Yang J. Modeling spatial patterns of forest fire in Heilongjiang province using generalized linear model and maximum entropy model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(6): 1620–1628 (in Chinese).
- [22] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3–4): 231–259.
- [23] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365–372.
- Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, *et al.* Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(4): 365–372 (in Chinese).
- [24] 陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 149–152.
- Chen X J. Biology of Fishery Resource and Oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004: 149–152 (in Chinese).
- [25] Severov D N, Pshennikov V, Remeslo A V. Fronts and thermohaline structure of the Brazil–Malvinas Confluence System[J]. Advances in Space Research, 2012, 49(9): 1373–1387.
- [26] Brunetti N E, Elena B, Rossi G R, *et al.* Summer distribution, abundance and population structure of *Illex argentinus* on the Argentine shelf in relation to environmental features[J]. South African Journal of Marine Science, 1998, 20(1): 175–186.
- [27] Santos R A, Haimovici M. Reproductive biology of winter-spring spawners of *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) off southern Brazil[J]. Scientia Marina, 1997, 61(1): 53–64.
- [28] Arkhipkin A. Age, growth, stock structure and migratory rate of pre-spawning short-finned squid *Illex argentinus* based on statolith ageing investigations[J]. Fisheries Research, 1993, 16(4): 313–338.
- [29] 陆化杰, 陈新军. 利用耳石微结构研究西南大西洋阿根廷滑柔鱼的日龄、生长与种群结构[J]. 水产学报, 2012, 36(7): 1049–1056.
- Lu H J, Chen X J. Age, growth and population structure of *Illex argentinus* based on statolith microstructure in Southwest Atlantic Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(7): 1049–1056 (in Chinese).
- [30] Bakun A. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage[J]. Scientia Marina, 2006, 70(S2): 105–122.
- [31] 宋婷婷, 樊伟, 伍玉梅. 卫星遥感海面高度数据在渔场分析中的应用综述[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 474–480.
- Song T T, Fan W, Wu Y M. Review on the fishery analysis with satellite remote sensing sea surface height data[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(4): 474–480 (in Chinese).
- [32] 陈芑, 方舟, 陈新军. 菱鳍乌贼渔业生物学研究进展[J]. 海洋渔业, 2015, 37(2): 187–196.
- Chen P, Fang Z, Chen X J. Review on fishery biology of diamond squid (*Thysanoteuthis rhombus*)[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(2): 187–196 (in Chinese).
- [33] Alabia I D, Saitoh S I, Mugo R, *et al.* Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific[J]. Fisheries Oceanography, 2015, 24(2): 190–203.
- [34] 沈新强, 王云龙, 袁骥, 等. 北太平洋鱿鱼渔场叶绿素a分布特点及其与渔场的关系[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 118–123.
- Shen X Q, Wang Y L, Yuan Q, *et al.* Distributional characteristics of chlorophyll a and relation to the fishing ground in the squid fishing ground of the northern Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(6): 118–123 (in Chinese).
- [35] 马松梅, 张明理, 张宏祥, 等. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测孑遗植物裸木的潜在地理分布及格局[J]. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1327–1335.
- Ma S M, Zhang M L, Zhang H X, *et al.* Predicting potential geographical distributions and patterns of the relic plant *Gymnocarpus przewalskii* using Maximum

- Entropy and Genetic Algorithm for Rule-set Prediction[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(11): 1327–1335 (in Chinese).
- [36] Bazzino G, Quiñones R A, Norbis W, *et al.* Environmental associations of shortfin squid *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the Northern Patagonian Shelf[J]. Fisheries Research, 2005, 76(3): 401–416.

Analysis of habitat distribution of Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) in the southwest Atlantic Ocean using maximum entropy model

CHEN Peng^{1,2}, CHEN Xinjun^{1,2,3,4*}

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

2. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai 201306, China;

3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

Abstract: The Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) in the southwest Atlantic Ocean is one of the most important economic cephalopod targets. Chinese traditional vessels had a very low yield in 2010 after a good harvest year in 2008. According to the catch data from the Chinese commercial squid jigging vessels and the oceanographic environmental data (Sea surface temperature, SST; Sea surface height, SSH and chlorophyll-a, *chl.a*) from 2008 to 2010, the potential habitat of *I. argentinus* in the main fishing season (from January to April) was analyzed, and these results were compared to the actual catch positions. The oceanographic environmental factors were combined to find the reasons of its distribution differences in these three years. Results showed that there was nearly same trend between the change of the potential distribution areas and actual catch positions. The habitat in north and south directions in 2008 and 2009 was large compared to the year of 2010, when the region was mainly south of 45°S. The Jackknife test indicated that the SST was the most important oceanographic environmental factor influencing the distribution of *I. argentinus*. The findings suggested that the SST isotherms can represent the change of ocean currents which can affect the distribution of the *I. argentinus*. The 12 °C SST isotherm may be a good indicator to search for the fishing ground. The different fishing stocks in 2010 may have impact on the model results. The SSH contour lines, representing the change of eddies can also affect the distribution of the *I. argentinus*, while the *chl.a* can only reflect it indirectly. Consequently we suggested that it's mainly needed to observe the changes of SST and SSH when doing the squid fishing ground searching.

Key words: *Illex argentinus*; habitat; maximum entropy model; southwest Atlantic Ocean

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

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (NSFC41476129; NSFC4127615); National High Technology Research and Development Program ("863" Program) of China (2012AA092303); Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China; National Science & Technology Pillar Program (2013BAD13B01)