

文章编号: 1674-5566(2020)06-0878-11

DOI:10.12024/jso.20191102862

基于不同权重栖息地模型的秘鲁外海茎柔鱼渔场分析

冯志萍¹, 余 为^{1,2,3,4,5}, 陈新军^{1,2,3,4,5}, 刘必林^{1,2,3,4}, 张 忠¹

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 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: 根据 2006—2014 年春季(9—11 月)、夏季(12 月—翌年 2 月)、秋季(3—5 月)和冬季(6—8 月)秘鲁外海茎柔鱼渔获数据, 结合 3 个关键海洋环境因子: 海表面温度(sea surface temperature, SST)、海表面高度(sea surface height, SSH)和净初级生产量(net primary production, NPP), 利用不同权重方案的栖息地适宜性指数模型分析秘鲁外海茎柔鱼渔场分布。利用捕捞努力量与 SST、SSH 和 NPP 建立适宜性指数(suitability index, SI)模型, 采用算术加权法建立综合栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型, 依据渔获量和捕捞努力量的比例比较不同权重的 HSI 模型, 选择不同季度的最优模型, 并用 2015 年的数据进行验证。结果显示, 茎柔鱼 CPUE 和渔场纬度重心(latitudinal gravity centers of fishing ground, LATG)呈现显著的年际和季节变化。在年际变化上, CPUE 基本在 2~7 t/d 浮动, 纬度重心基本维持在 10°S~18°S; 在季度变化上, 冬春季的 CPUE 高, 渔场纬度重心偏向北部海域, 夏季, CPUE 随着纬度重心的南移而增加, 与春季相比, 栖息地南移 1.5°, CPUE 增加 6.7%, 秋季渔场纬度重心最靠南, CPUE 最低。不同季度的最优栖息地模型中的权重方案不同, 冬春季最优模型权重方案为模型 9, 权重最高的环境因子是 SST; 夏季最优模型权重方案为模型 7, SST、SSH 和 NPP 权重相等; 秋季最优模型权重方案为模型 3, 权重最高的是 SSH。以上结果表明环境因子在每个季度中对秘鲁外海茎柔鱼的栖息地影响程度不同。春夏秋冬各季度最优模型预测的精度分别为 84.68%、78.56%、72.74% 和 68.70%。本研究有利于了解不同季度时间尺度下环境因子对秘鲁外海茎柔鱼的影响情况, 为指导鱿钓渔业生产提供科学依据。

关键词: 茎柔鱼; 栖息地模型; 环境因子; 渔场纬度重心

中图分类号: S 931.4 **文献标志码:** A

茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)是世界上重要的经济头足类, 广泛分布在加利福尼亚 37°N 至智利 45°S 的东太平洋海域^[1-2]。和其他头足类一样, 茎柔鱼是短生命周期种类, 栖息环境的变化对其种群资源的分布具有明显的影响^[3]。我国鱿钓船于 2001 年开始在秘鲁外海作业, 作业范围为 8°S~20°S, 到 2004 年在该海域生产的鱿钓船达到 100 余艘, 总年渔获产量超过 20 万 t, 茎柔鱼已成为我国鱿钓船的重要捕捞对象^[4]。

栖息地适宜性指数(habitat suitability index,

HSI)最早由美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署于 20 世纪 80 年代初提出^[5], 其模型用来模拟生物体对其周围栖息环境要素的反应, 广泛应用于物种管理和鱼类分布等领域^[6-8]。HSI 模型可以描述栖息地特征, 评估栖息地条件, 并进一步确定物种在不同气候和环境条件下栖息环境的偏好^[9], 是表征鱼类资源空间分布与海洋环境关系的重要手段之一^[10]。胡振明等^[5]根据海洋环境数据和渔获数据, 曾对秘鲁外海茎柔鱼进行栖息地适宜性指数建模分析; 易炜

收稿日期: 2019-11-21 修回日期: 2020-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901405); 国家自然科学基金青年科学基金(41906073); 上海市自然科学基金(19ZR1423000); 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位计划项目(0810000243); 上海市“浦江人才”计划项目(18PJI404100)

作者简介: 冯志萍(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业海洋学。E-mail: 1098899451@qq.com

通信作者: 余 为, E-mail: wyu@shou.edu.cn

等^[11]利用不同环境因子权重分析东海鲈鱼 (*Scomber japonicus*) 的栖息地,但国内外还未报道秘鲁外海茎柔鱼栖息地的季节性分布及与环境的关系。本文根据 2006—2015 年我国鱿钓船在秘鲁外海茎柔鱼的生产统计数据,结合海表面温度(sea surface temperature, SST)、海表面高度(sea surface height, SSH)和净初级生产力(net primary production, NPP)等 3 个环境因子,分析渔获量(catch)、捕捞努力量(fishing effort)以及单位捕捞努力量渔获量(catch per unit of effort, CPUE)与环境因子的关系,建立不同季节及不同权重的栖息地适宜性指数模型,并选择最优模型预测茎柔鱼栖息地,为茎柔鱼渔情预报和渔业管理等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

茎柔鱼捕捞数据来源于上海海洋大学鱿钓技术组,时间为 2006—2015 年,数据信息包括作业经纬度、作业时间、渔获量和捕捞努力量。其中,2006—2014 年的渔业数据用于模型构建,2015 年数据用于模型验证。

海洋环境数据包括海表面温度(SST)、海表面高度(SSH)和净初级生产力(NPP),时间为 2006—2015 年春季(9—11 月)、夏季(12 月—翌年 2 月)、秋季(3—5 月)和冬季(6—8 月),共计 40 个季度,数据覆盖了秘鲁海区茎柔鱼渔场海域,其空间分布范围为 8°S ~ 20°S、95°W ~ 75°W (图 1)。SST 的数据来源于美国 NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/oisst/data-access>),海表面高度(SSH)的数据来源于 AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>),净初级生产力(NPP)数据来源于 VGPM (<https://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity>),将所有环境数据空间分辨率均转化为 0.5° × 0.5°,并与渔业数据相匹配。

1.2 分析方法

1.2.1 CPUE 和渔场纬度重心计算

计算 2006—2015 年单位捕捞努力量渔获量(CPUE)和渔场纬度重心(latitudinal gravity centers of fishing ground, LATG),并对 2006—2015 年的 CPUE 进行逐年平均和季度平均。其中,CPUE 和 LATG 的计算公式为

$$Y_{\text{CPUE-ysij}} = \frac{\sum C_{\text{ysij}}}{\sum E_{\text{ysij}}} \quad (1)$$

$$G_{\text{LATG-gs}} = \frac{\sum (L_{\text{gs}} \times Y_{\text{gs}})}{\sum Y_{\text{gs}}} \quad (2)$$

式中: $\sum C_{\text{ysij}}$ 为某一渔区内某年某季度累计渔获量,t; $\sum E_{\text{ysij}}$ 为某一渔区内某年某季度累计捕捞努力量,d; y 为年份, s 为季度, i 为经度, j 为纬度; L_{gs} 为某一渔区的作业纬度; Y_{gs} 为某一渔区的单位捕捞努力量渔获量; g 为渔区, s 为季度。

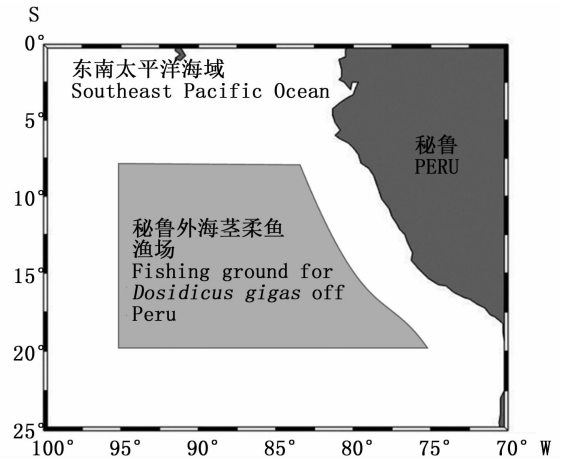


图 1 我国秘鲁海区茎柔鱼鱿钓渔场作业地理位置分布图

Fig. 1 Geographical distribution of Chinese squid-jigging fishery for *Dosidicus gigas* off Peru

1.2.2 栖息地模型构建

捕捞努力量通常用于表征鱼类出现或鱼类的利用情况^[12-14],本研究将 2006—2014 年的环境数据和渔业数据相结合,在不同权重模型下计算各年份各季度的综合栖息地适宜性指数 HSI 的值,并预测 2015 年秘鲁外海茎柔鱼的栖息地适宜面积。利用 2006—2014 年的捕捞努力量数据分别与 SST、SSH、NPP 计算适宜性指数(suitability index, SI),研究假定在每一经纬度相对应的季度中最高捕捞努力量为秘鲁外海茎柔鱼资源分布最多的海域,SI 值为 1;捕捞努力量为 0 时,则认为是茎柔鱼资源分布最少的区域,SI 值为 0^[15-16]。以计算的 SI 值为基础建立的单一环境因子 SI 模型计算公式参考 YU 等^[17]的计算方法。

在已建立好的单一环境因子 SI 模型基础上,赋予环境因子以不同的权重(权重设置方案见表 1)^[9],建立不同权重模型下的综合栖息地适宜性

指数 HSI 模型, 并进行比较。其中, HSI 模型的计算公式如下:

$$I_{\text{HSI}} = W_{\text{SST}} \times I_{\text{SI-SST}} + W_{\text{SSH}} \times I_{\text{SI-SSH}} + W_{\text{NPP}} \times I_{\text{SI-NPP}} \quad (3)$$

式中: W_{SST} 、 W_{SSH} 、 W_{NPP} 分别为 SST、SSH、NPP 的 SI 模型的权重值。

表 1 海表面温度 (SST)、海表面高度 (SSH)、净初级生产力 (NPP) 的不同权重方案

Tab. 1 Different scenarios for the weights of sea surface temperature (SST), sea surface height (SSH) and net primary production (NPP)

不同权重模型设计 Scenarios	海表面温度权重值 W_{SST}	海表面高度权重值 W_{SSH}	净初级生产力权重值 W_{NPP}
模型 1	0	1	0
模型 2	0	0	1
模型 3	0.1	0.8	0.1
模型 4	0.1	0.1	0.8
模型 5	0.25	0.5	0.25
模型 6	0.25	0.25	0.5
模型 7	0.333	0.333	0.333
模型 8	0.5	0.25	0.25
模型 9	0.8	0.1	0.1
模型 10	1	0	0

1.2.3 模型验证与筛选

根据上述建立的不同权重下的 HSI 模型, 分别计算 2006—2014 年各年份各季度的 HSI 值, 其范围为 0 ~ 1。将其划分为 5 个等级, 分别为 0 ~ 0.2、0.2 ~ 0.4、0.4 ~ 0.6、0.6 ~ 0.8 和 0.8 ~ 1.0^[15,18], 并认为 $\text{HSI} \geq 0.6$ 的海域为茎柔鱼的适宜栖息地。分别统计在不同权重模型下渔获量和捕捞努力量在不同 HSI 间隔内所占比例, 对比找出春夏秋冬 4 个季度的最优 HSI 模型。利用 Matlab 绘制 2015 年春夏秋冬各季度在最优模型下的 HSI 空间分布图, 并与实际的 CPUE 相叠加, 验证各季度的最优模型在渔场分布预测中的可行性大小。

2 结果

2.1 CPUE 和 LATG 年际和季节变化

从图 2 中可以看出, CPUE 和 LATG 呈现显著的年际和季节性变化。在年际尺度上, CPUE 基本在 2 ~ 7 t/d 浮动, 纬度重心基本维持在 10°S ~ 18°S 变化; 在季节尺度上, 春季的 CPUE 和纬度重心呈现负相关关系, CPUE 较高, 平均值为 4.5 t/d, 纬度重心位于渔场最北部海域, 其值为 13.2°S。冬季两者的变化与春季的变化趋势相同, 纬度重心南移即栖息地向南移动, CPUE 相

对减少, 平均值为 4.4 t/d。夏季, CPUE 随着纬度重心的南移而增加, 与春季相比, 栖息地南移 1.5°, CPUE 增加 6.7%。秋季的纬度重心最南, 为 15.4°S, CPUE 却最小为 3.9 t/d, 变化趋势与冬春季相同, CPUE 和纬度重心之间也呈负相关关系。

2.2 HSI 模型比较

通过建构的 2006—2014 年春夏秋冬 4 个季度的 40 个模型(表 2 ~ 5), 统计各个 HSI 区间内的产量和捕捞努力量比例(比例越高, 代表模型预测性能越好)时发现, 每个季度对应的最优模型存在差异, 即环境因子 SST、SSH、NPP 在每个季度中的影响权重不同。研究发现, 春季最优模型权重方案为模型 9, 权重比例最高的环境因子是 SST; 夏季最优模型权重方案为模型 7, SST、SSH 和 NPP 所占的权重比例均等; 秋季最优模型权重方案为模型 3, 权重比例最高的是 SSH; 冬季与春季相同。比较 4 个季度的最优模型可以发现, 在最优模型下 HSI 在 0.6 ~ 1.0 经格内的捕捞努力量的比例最高, 且在 0 ~ 0.2 经格内捕捞努力量的比例较低, 但每个季度的最优模型中最高权重的环境因子不同, 使得 HSI 值在不同季度下的空间分布不同, 即栖息地适宜性面积大小不同。

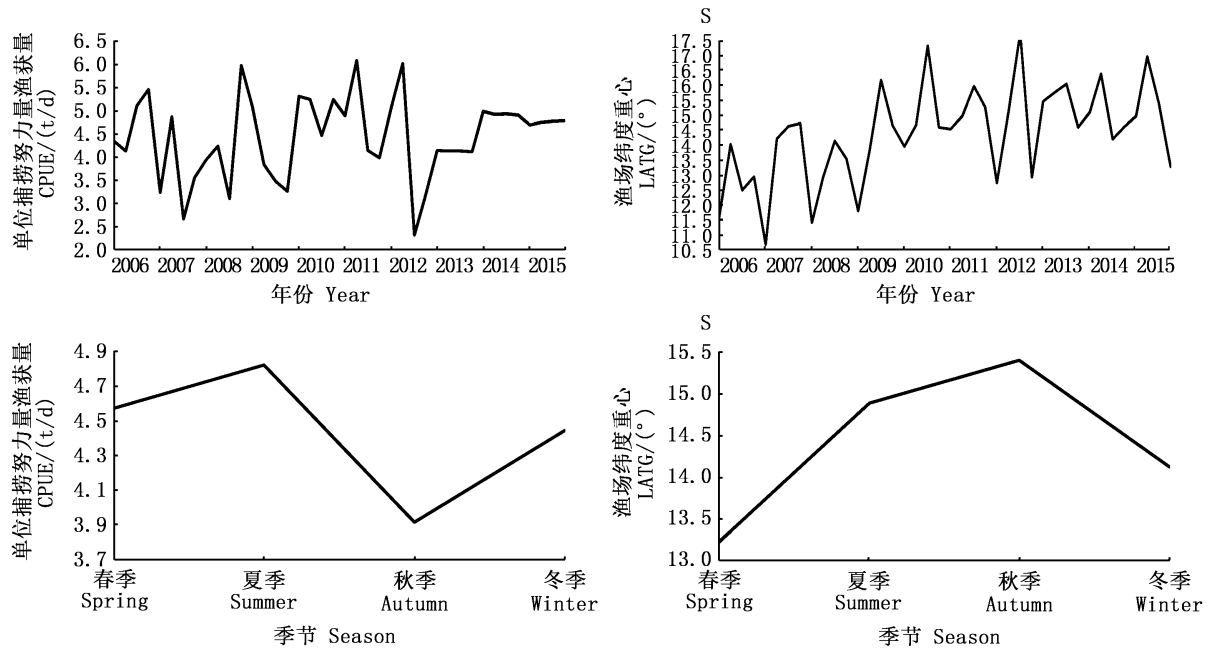


图2 CPUE 和 LATG 年际与季节变化

Fig. 2 Interannual and seasonal changes in CPUE and LATG

表2 2006—2014 年春季不同权重栖息地模型预测的 HSI 各区间内对应的渔获量和捕捞努力量百分比

Tab. 2 Percentage of catch and effort at different HSI class intervals sourced from different weighting models in the spring from 2006 to 2014

HSI	模型 1 Case 1		模型 2 Case 2		模型 3 Case 3		模型 4 Case 4		模型 5 Case 5	
	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort
(0.0,0.1]	8.56%	12.45%	8.90%	8.10%	0.23%	0.44%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%
(0.1,0.2]	4.22%	4.12%	4.30%	3.70%	1.76%	3.01%	4.54%	3.92%	0.00%	0.01%
(0.2,0.3]	4.77%	4.42%	5.92%	4.81%	10.24%	13.09%	9.28%	8.21%	0.81%	1.21%
(0.3,0.4]	6.44%	5.75%	4.27%	3.60%	8.53%	7.21%	5.83%	4.95%	4.70%	5.61%
(0.4,0.5]	5.21%	4.52%	7.25%	5.99%	5.78%	5.10%	6.42%	6.12%	12.30%	12.86%
(0.5,0.6]	8.59%	7.88%	6.21%	5.49%	8.64%	7.89%	7.40%	5.88%	13.25%	13.51%
(0.6,0.7]	10.91%	10.51%	6.95%	6.41%	17.06%	16.40%	9.70%	9.27%	20.13%	18.70%
(0.7,0.8]	10.63%	10.02%	14.99%	15.78%	7.20%	6.65%	18.52%	18.66%	20.93%	18.14%
(0.8,0.9]	14.51%	14.34%	9.17%	10.69%	24.83%	22.67%	19.96%	21.86%	20.60%	20.78%
(0.9,1.0]	26.15%	25.98%	32.03%	35.43%	15.74%	17.55%	18.35%	21.12%	7.28%	9.18%
HSI	模型 6 Case 6		模型 7 Case 7		模型 8 Case 8		模型 9 Case 9		模型 10 Case 10	
	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort
(0.0,0.1]	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
(0.1,0.2]	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	0.26%	0.32%
(0.2,0.3]	0.37%	0.25%	0.15%	0.20%	0.16%	0.19%	0.24%	0.30%	4.49%	4.65%
(0.3,0.4]	11.12%	10.27%	1.30%	1.63%	0.56%	0.90%	4.88%	5.17%	1.35%	1.64%
(0.4,0.5]	6.32%	6.93%	12.43%	12.36%	3.67%	4.80%	3.71%	5.07%	6.19%	7.54%
(0.5,0.6]	9.32%	8.11%	11.56%	11.22%	17.77%	16.95%	6.46%	6.60%	9.23%	9.01%
(0.6,0.7]	19.12%	17.35%	25.37%	25.57%	22.42%	20.46%	15.50%	14.71%	8.65%	8.71%
(0.7,0.8]	30.82%	31.21%	28.56%	25.74%	30.52%	30.40%	22.54%	20.25%	15.70%	14.23%
(0.8,0.9]	14.81%	15.97%	13.21%	14.25%	18.35%	18.20%	36.14%	35.69%	17.41%	16.18%
(0.9,1.0]	8.12%	9.90%	7.43%	9.03%	6.53%	8.10%	10.50%	12.19%	36.72%	37.72%

表3 2006—2014年夏季不同权重栖息地模型预测的HSI各区间内对应的渔获量和捕捞努力量百分比

Tab.3 Percentage of catch and effort at different HSI class intervals sourced from different weighting models in the summer from 2006 to 2014

HSI	模型1 Case 1		模型2 Case 2		模型3 Case 3		模型4 Case 4		模型5 Case 5	
	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort
(0.0,0.1]	0.11%	0.22%	1.85%	2.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%
(0.1,0.2]	1.41%	1.46%	2.39%	2.71%	0.09%	0.31%	1.46%	1.87%	0.00%	0.00%
(0.2,0.3]	5.37%	5.17%	4.13%	4.43%	0.89%	0.97%	4.59%	4.82%	0.20%	0.56%
(0.3,0.4]	6.91%	7.07%	7.09%	7.05%	8.64%	8.94%	3.71%	4.08%	3.27%	3.82%
(0.4,0.5]	13.67%	13.84%	12.07%	12.17%	7.07%	7.71%	11.33%	11.25%	6.34%	7.88%
(0.5,0.6]	12.77%	11.31%	4.65%	5.33%	16.61%	15.82%	9.64%	10.35%	12.21%	11.71%
(0.6,0.7]	11.43%	11.36%	9.14%	8.62%	17.55%	16.08%	10.58%	10.55%	26.41%	26.81%
(0.7,0.8]	8.41%	8.80%	10.35%	10.44%	14.78%	15.16%	14.35%	14.54%	26.85%	24.29%
(0.8,0.9]	13.66%	13.46%	12.99%	13.23%	20.65%	21.14%	18.50%	18.02%	13.91%	13.94%
(0.9,1.0]	26.26%	27.31%	35.33%	33.89%	13.73%	13.87%	25.83%	24.52%	10.81%	10.99%
HSI	模型6 Case 6		模型7 Case 7		模型8 Case 8		模型9 Case 9		模型10 Case 10	
	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort
(0.0,0.1]	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.30%	3.44%
(0.1,0.2]	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.81%	1.48%	7.52%	9.52%
(0.2,0.3]	0.78%	1.36%	0.43%	0.59%	0.72%	1.42%	9.92%	11.62%	2.63%	3.02%
(0.3,0.4]	4.20%	4.72%	3.55%	4.75%	5.21%	6.67%	4.85%	5.30%	6.24%	6.98%
(0.4,0.5]	7.71%	8.29%	6.04%	6.99%	9.38%	10.01%	8.19%	8.73%	5.78%	6.01%
(0.5,0.6]	14.39%	15.27%	11.42%	12.70%	9.02%	10.07%	3.26%	3.75%	1.65%	2.04%
(0.6,0.7]	15.22%	16.12%	22.61%	22.25%	11.26%	11.21%	4.51%	4.60%	3.91%	4.26%
(0.7,0.8]	20.66%	18.59%	27.37%	24.48%	20.21%	19.21%	6.14%	6.20%	5.42%	5.17%
(0.8,0.9]	24.99%	23.49%	17.79%	17.29%	30.72%	28.27%	27.58%	25.86%	11.31%	10.84%
(0.9,1.0]	12.05%	12.16%	10.79%	10.92%	13.48%	13.15%	34.74%	32.46%	52.23%	48.72%

表4 2006—2014年秋季不同权重栖息地模型预测的HSI各区间内对应的渔获量和捕捞努力量百分比

Tab.4 Percentage of catch and effort at different HSI class intervals sourced from different weighting models in the autumn from 2006 to 2014

HSI	模型1 Case 1		模型2 Case 2		模型3 Case 3		模型4 Case 4		模型5 Case 5	
	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort
(0.0,0.1]	0.72%	0.95%	11.01%	14.07%	0.12%	0.14%	2.05%	2.42%	0.05%	0.04%
(0.1,0.2]	2.41%	2.87%	3.54%	4.06%	1.33%	1.74%	7.45%	9.54%	0.00%	0.02%
(0.2,0.3]	6.07%	6.63%	4.51%	3.40%	1.57%	1.93%	4.78%	5.84%	2.29%	2.71%
(0.3,0.4]	8.53%	9.76%	3.67%	2.87%	7.54%	8.05%	7.57%	5.53%	2.42%	2.77%
(0.4,0.5]	3.24%	4.83%	6.26%	5.67%	9.29%	11.10%	4.49%	4.27%	5.08%	5.58%
(0.5,0.6]	6.78%	6.52%	7.02%	6.37%	7.41%	8.92%	6.36%	6.17%	20.74%	19.86%
(0.6,0.7]	10.83%	10.34%	4.61%	5.37%	10.59%	9.39%	13.19%	11.55%	22.33%	22.61%
(0.7,0.8]	10.24%	10.76%	12.90%	13.57%	19.14%	18.41%	12.09%	13.13%	20.37%	20.33%
(0.8,0.9]	12.65%	12.40%	10.07%	10.38%	23.81%	21.93%	18.01%	19.64%	16.22%	16.54%
(0.9,1.0]	38.54%	34.95%	36.41%	34.25%	19.20%	18.38%	24.00%	21.91%	10.49%	9.54%
HSI	模型6 Case 6		模型7 Case 7		模型8 Case 8		模型9 Case 9		模型10 Case 10	
	捕捞量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort
(0.0,0.1]	0.05%	0.04%	0.05%	0.04%	0.05%	0.04%	0.14%	0.19%	15.50%	12.00%
(0.1,0.2]	1.82%	2.02%	0.38%	0.38%	1.09%	1.10%	17.06%	13.17%	7.91%	5.64%
(0.2,0.3]	3.21%	3.40%	2.09%	2.37%	1.25%	1.32%	6.20%	4.36%	2.82%	2.45%
(0.3,0.4]	7.36%	7.83%	4.75%	4.17%	15.43%	11.40%	3.97%	3.68%	3.49%	3.74%
(0.4,0.5]	11.97%	11.87%	14.82%	13.19%	9.23%	8.57%	3.55%	3.68%	1.69%	1.53%
(0.5,0.6]	10.88%	9.50%	13.01%	12.86%	9.53%	9.66%	3.31%	3.61%	5.32%	5.78%
(0.6,0.7]	13.88%	13.99%	17.66%	19.65%	9.14%	11.97%	6.25%	6.34%	5.63%	5.65%
(0.7,0.8]	17.64%	19.98%	18.61%	19.43%	21.32%	23.88%	15.13%	17.52%	12.15%	12.79%
(0.8,0.9]	22.91%	22.68%	20.01%	20.16%	24.00%	23.54%	26.61%	29.22%	17.54%	17.88%
(0.9,1.0]	10.28%	8.71%	8.61%	7.75%	8.96%	8.51%	17.78%	18.22%	27.95%	32.53%

表 5 2006—2014 年冬季不同权重栖息地模型预测的 HSI 各区间内对应的渔获量和捕捞努力量百分比

Tab. 5 Percentage of catch and effort at different HSI class intervals sourced from different weighting models in the winter from 2006 to 2014

HSI	模型 1 Case 1		模型 2 Case 2		模型 3 Case 3		模型 4 Case 4		模型 5 Case 5	
	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort
(0.0,0.1]	11.45%	10.76%	18.04%	16.87%	3.79%	2.53%	6.35%	4.61%	3.32%	2.05%
(0.1,0.2]	12.36%	11.24%	4.48%	4.70%	6.00%	6.11%	10.68%	11.41%	2.08%	1.49%
(0.2,0.3]	8.36%	8.07%	6.54%	5.48%	13.41%	12.48%	6.64%	6.22%	3.50%	3.21%
(0.3,0.4]	8.48%	8.64%	4.31%	4.50%	11.75%	11.43%	6.45%	5.62%	7.79%	8.91%
(0.4,0.5]	7.23%	7.72%	2.88%	2.70%	11.94%	12.08%	4.97%	4.96%	20.76%	18.86%
(0.5,0.6]	10.84%	10.07%	5.21%	5.57%	10.58%	10.00%	5.22%	5.81%	15.24%	15.76%
(0.6,0.7]	8.73%	8.73%	5.23%	5.75%	11.39%	12.27%	6.02%	6.86%	13.93%	13.25%
(0.7,0.8]	6.52%	7.68%	9.98%	11.12%	6.73%	7.93%	15.23%	15.27%	13.95%	14.83%
(0.8,0.9]	11.25%	11.49%	8.76%	8.17%	14.80%	14.30%	24.39%	22.61%	13.35%	14.44%
(0.9,1.0]	14.80%	15.59%	34.56%	35.14%	9.61%	10.85%	14.06%	16.64%	6.09%	7.21%
HSI	模型 6 Case6		模型 7 Case 7		模型 8 Case 8		模型 9 Case 9		模型 10 Case 10	
	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort	渔获量 Catch	捕捞努力量 Effort
(0.0,0.1]	3.78%	2.41%	3.28%	2.01%	3.23%	1.99%	4.09%	2.53%	4.29%	3.43%
(0.1,0.2]	3.27%	2.14%	2.68%	1.73%	3.61%	2.04%	4.80%	3.85%	4.69%	3.11%
(0.2,0.3]	4.76%	5.34%	2.52%	2.23%	2.33%	2.66%	0.49%	0.55%	0.51%	0.50%
(0.3,0.4]	7.84%	8.83%	5.48%	6.60%	3.00%	3.23%	3.46%	3.44%	3.70%	3.85%
(0.4,0.5]	10.74%	9.95%	9.09%	9.58%	8.97%	7.95%	10.84%	8.75%	11.44%	9.28%
(0.5,0.6]	8.96%	9.21%	21.36%	20.17%	17.03%	18.07%	7.61%	7.55%	7.94%	7.50%
(0.6,0.7]	22.25%	20.80%	21.69%	20.22%	17.87%	17.04%	8.14%	9.41%	4.19%	4.78%
(0.7,0.8]	16.38%	16.50%	12.79%	13.01%	19.67%	19.36%	16.22%	16.58%	9.45%	10.49%
(0.8,0.9]	15.80%	16.93%	15.27%	17.46%	17.02%	18.83%	26.51%	25.96%	15.83%	15.37%
(0.9,1.0]	6.21%	7.90%	5.86%	6.99%	7.27%	8.82%	17.84%	21.37%	37.96%	41.69%

2.3 模型验证及筛选结果

利用 2006—2014 年数据构建的最优 HSI 模型预测 2015 年秘鲁茎柔鱼适宜栖息地,并用 2015 年渔业数据进行验证和筛选,结果如图 3 和图 4。从图 3 可以看出:春季秘鲁茎柔鱼适宜的栖息地面积明显大于夏季、秋季和冬季,大致分布在 $15^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{S}$ 和 $75^{\circ}\text{W} \sim 85^{\circ}\text{W}$;夏季,适宜栖息地大致分布在 $13^{\circ}\text{S} \sim 17^{\circ}\text{S}$ 和 $85^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$ 附近;秋季栖息地适宜面积最小,且适宜栖息地集中分布在小范围内,总体上位于 $18^{\circ}\text{S} \sim 19^{\circ}\text{S}$ 的 3 个中心附近;冬季适宜栖息地大致分布在 $15^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{S}$, $78^{\circ}\text{W} \sim 85^{\circ}\text{W}$ 的范围内。由图 4 可以看出:春夏秋冬 4 个季节比例均随着 HSI 值的增加而增加,且在不利栖息地内比例较低,而适宜的栖息地内比例最高,说明各季节基于不同权重方案的最优 HSI 模型预测性能均能较好预测茎柔鱼适宜栖息地。

3 讨论与分析

茎柔鱼是一种短生命周期的大洋性头足类,

其通常的适宜海表面温度范围是 $15 \sim 20^{\circ}\text{C}$,在南半球进行高密度集群时的表层水温为 $17 \sim 23^{\circ}\text{C}$ ^[19]。所以,SST 对茎柔鱼的生长、繁殖、洄游等会产生直接的影响,从而影响茎柔鱼的集群位置,导致渔场分布发生变化。目前已有多个学者对茎柔鱼栖息地变动与海洋环境因子之间的关系展开研究。例如:ROBINSON 等^[20]通过研究加利福尼亚海湾茎柔鱼的资源量,认为其渔获量的增加与水温变冷有关;汪金涛等^[21]建立了预测茎柔鱼资源丰度的模型,认为海表面温度是显著影响 CPUE 的环境因子之一。研究表明水温是影响茎柔鱼栖息地的显著因素,实际上水温对茎柔鱼栖息地的影响程度呈正态分布,所以随时间变化,其影响程度是不同的。茎柔鱼资源分布主要受加利福尼亚海流、秘鲁海流和赤道逆流的影响,分布在秘鲁海流的上升区^[22],海流的上升和下降会导致 SSH 发生变化^[12],海流上升会使得海底一些富集营养的生物上升到茎柔鱼的分布区,促进其生长和繁殖,从而形成良好的渔场。茎柔鱼的行动迅捷,垂直移动的能力很强,因此在

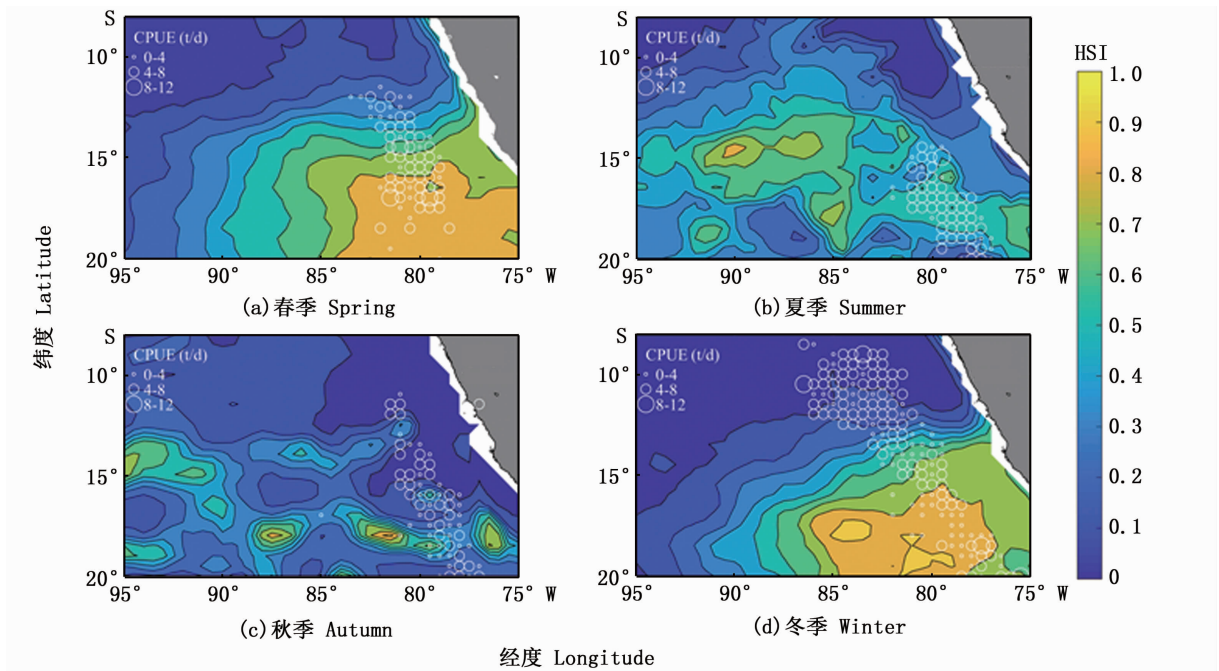


图3 2015年各季节栖息地适宜性指数与CPUE值叠加图

Fig. 3 Spatial distribution of CPUE overlapped with the HSI values in each season in 2015

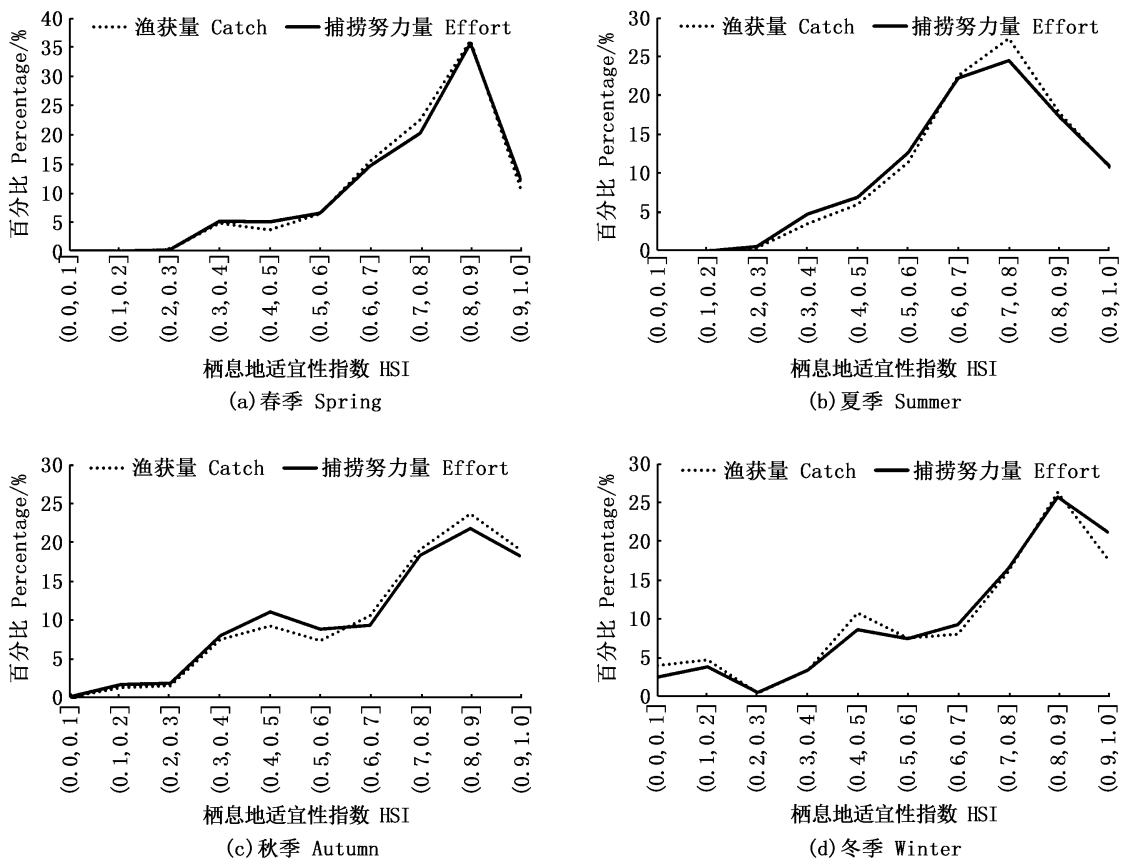


图4 2015年各季节不同栖息地适宜性指数区间内产量和捕捞努力量比重

Fig. 4 The percentages of catch and fishing effort at different HSI class intervals in each season in 2015

其生活的各个阶段中都表现出很强的食性。研究表明,秘鲁水域茎柔鱼胃含物 70.2% 为灯笼鱼科 (Myctophidae), 对于 NPP 含量高的区域, 浮游生物及灯笼鱼科数量多, 茎柔鱼分布相对较多, 形成良好的渔场^[22]。例如, 余为等^[23] 认为适宜的光和有效辐射面积的增加会使得茎柔鱼有利的栖息地面积增加, 但其影响也随时间的变化而发生变化。因此, 本文选取 SST、SSH 和 NPP 这 3 个环境因子研究秘鲁外海茎柔鱼的渔场分布与环境因子的关系是可行的。

HSI 模型是在由单一环境因子建立的 SI 模型的基础上建立的, 表示的是环境因子整体对栖息地的影响情况。由于每个环境因子对栖息地的影响程度不同, 所以在建立 HSI 模型时赋予每一环境因子以不同的权重, 从而分析在不同季度下各环境因子变量对栖息地的影响情况。本文根据不同的权重比例构建了不同的 HSI 模型, 利用 2006—2014 年的数据计算 HSI 在不同季度和不同模型下的鱼获量与捕捞努力量的百分比, 选择 HSI > 0.6 时的鱼获量和捕捞努力量的百分比, 通过比较和分析选择每个季度的最优模型, 并用 2015 年的数据进行验证。结果显示春季最优的是模型 9, 预测的精度是 84.68%, 在此权重模型中, SST 所占的权重指数最高为 0.8; 夏季最

优的是模型 7, 预测的精度是 78.56%, SST、SSH 和 NPP 的权重指数均为 0.333; 秋季最优的是模型 3, 预测的精度是 72.74%, 在此权重模型中, SSH 所占的权重指数最高为 0.8; 冬季最优的是模型 9, 预测的精度是 68.70%, 在此权重模型中, SST 所占的权重指数最高为 0.8。研究表明, 在 HSI 模型中考虑了各环境因子的权重后, 各季度预测精度得到提高, 这在胡贯宇等^[24] 对阿根廷滑柔鱼栖息地研究和蒋瑞等^[25] 对秋冬季智利竹筴鱼栖息地研究也有类似的情况。因此, 不同季度的环境因子对秘鲁外海茎柔鱼渔场分布的影响程度不同。在不同季度的最优模型下计算出的 HSI 的空间分布如图 5 所示, 从 HSI 分布的季度变化来看, 茎柔鱼的适宜栖息地分布大致在 15°S ~ 20°S, 80°W ~ 85°W 的范围内。在春季和冬季的最优模型中, SST 的权重贡献率是最大的, 栖息地适宜指数的分布范围也是最大的; 在夏季的最优模型中, SST 的权重和 SSH 相同, 栖息地适宜指数的分布范围相对减少; 在秋季的最优模型中, SSH 的权重贡献率最大, 而栖息地适宜指数的分布范围却是最少的, 表明栖息地适宜面积与水温有很大的关系, 且随着水温权重的增加而增大, 这可能与茎柔鱼主要分布在秘鲁上升流区有很大的关系。

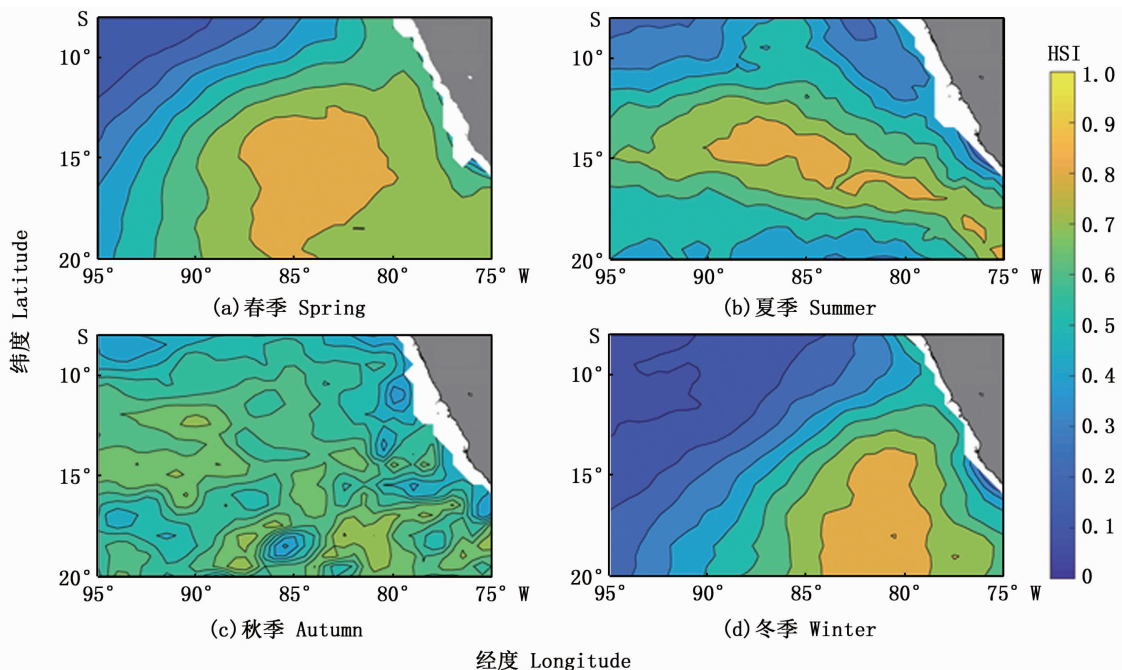


图 5 不同季度的最优模型计算出的 2006—2015 年秘鲁外海茎柔鱼 HSI 值的空间分布
 Fig. 5 Spatial distribution of HSI values of Peru *Dosidicus gigas* from 2006 to 2015 calculated by the optimal model of different quarters

在实际生产中,渔场的分布往往受多种环境因子的影响,例如叶绿素的浓度和水温的垂直结构、海表面盐度等都会对渔场的分布产生一定程度的影响。同时,茎柔鱼在不同生长阶段所分布的范围不同,成体的茎柔鱼大多分布在较深的水域中。此外,还可能会受到气候事件,如强拉尼娜事件会使柔鱼适宜面积增大,渔获量增多,而超强的厄尔尼诺则会导致柔鱼减产^[26]。所以,在以后的研究中,可以尝试加入更多的影响渔场分布的因子,包括生物因素和非生物因素,以建立更加完善和综合的栖息地适宜性模型,为渔业资源的合理开发和利用提供更为合理的依据。

参考文献:

- [1] 董正之. 世界大洋经济头足类生物学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991: 17-19.
DONG Z Z. The world's oceanic economy cephalopod biology [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1991: 17-19.
- [2] 徐冰, 陈新军, 钱卫国, 等. 秘鲁外海茎柔鱼渔场时空分布分析[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(11): 43-47.
XU B, CHEN X J, QIAN W G, et al. Spatial and temporal distribution of fishing ground for *Dosidicus gigas* in the offshore waters of Peru[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(11): 43-47.
- [3] 陈新军, 陆化杰, 徐冰, 等. 秘鲁外海茎柔鱼资源渔场研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 2-10.
CHEN X J, LU H J, XU B, et al. Review on the fishery of the *Dosidicus* squid resource off Peru[M]. Beijing: Science Press, 2008: 2-10.
- [4] 陈新军, 赵小虎. 秘鲁外海茎柔鱼产量分布及其与表温关系的初步研究[J]. 上海海洋大学学报, 2006, 15(1): 65-70.
CHEN X J, ZHAO X H. Preliminary study on the catch distribution of *Dosidicus gigas* and its relationship with sea surface temperature in the offshore waters of Peru [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2006, 15(1): 65-70.
- [5] 胡振明, 陈新军, 周应祺, 等. 利用栖息地适宜指数分析秘鲁外海茎柔鱼渔场分布[J]. 海洋学报, 2010, 32(5): 67-75.
HU Z M, CHEN X J, ZHOU Y Q, et al. Forecasting fishing ground of *Dosidicus gigas* based on habitat suitability index off Peru[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(5): 67-75.
- [6] 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[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(6): 707-713.
CHEN X J, LIU B L, TIAN S Q, et al. Forecasting the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* with SST-based habitat suitability modelling in northwestern Pacific [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(6): 707-713.
- [7] MADDOCK I. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 373-391.
- [8] GORE J A, HAMILTON S W. Comparison of flow-related habitat evaluations downstream of low-head weirs on small and large fluvial ecosystems[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1996, 12(4/5): 459-469.
- [9] YU W, GUO A, ZHANG Y, et al. Climate-induced habitat suitability variations of chub mackerel *Scomber japonicus* in the East China Sea[J]. Fisheries Research, 2018, 207: 63-73.
- [10] 陈新军, 龚彩霞, 田思泉, 等. 基于栖息地指数的西北太平洋柔鱼渔获量估算[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(4): 29-33.
CHEN X J, GONG C X, TIAN S Q, et al. Estimated catch of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) based on habitat suitability index in northwest Pacific Ocean [J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(4): 29-33.
- [11] 易炜, 郭爱, 陈新军. 不同环境因子权重对东海鲈鱼栖息地模型的影响研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(12): 90-97.
YI W, GUO A, CHEN X J. A study on influence of different environmental factors weights on the habitat model for *Scomber japonicus*[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(12): 90-97.
- [12] ANDRADE H A, GARCIA C A E. Skipjack tuna fishery in relation to sea surface temperature off the southern Brazilian coast[J]. Fisheries Oceanography, 1999, 8(4): 245-254.
- [13] 陈新军, 陆化杰, 刘必林, 等. 利用栖息地指数预测西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔场[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(3): 431-438.
CHEN X J, LU H J, LIU B L, et al. Forecasting fishing ground of *Illex argentinus* by using habitat suitability model in the southwest Atlantic [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(3): 431-438.
- [14] BERTRAND A, JOSSE E, BACH P, et al. Hydrological and trophic characteristics of tuna habitat; consequences on tuna distribution and longline catchability[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59(6): 1002-1013.
- [15] 方学燕, 陈新军, 丁琪. 基于栖息地指数的智利外海茎柔鱼渔场预报模型优化[J]. 广东海洋大学学报, 2014, 34(4): 67-73.
FANG X Y, CHEN X J, DING Q. Optimization fishing ground prediction models of *Dosidicus gigas* in the high sea off Chile based on habitat suitability index [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2014, 34(4): 67-73.
- [16] MOHRI M. Seasonal changes in Bigeye tuna fishing areas in relation to the oceanographic parameters in the Indian Ocean

- [J]. Journal of National Fisheries University, 1999, 47 (2): 43-54.
- [17] YU W, CHEN X J, ZHANG Y. Seasonal habitat patterns of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peruvian waters[J]. Journal of Marine Systems, 2019, 194: 41-51.
- [18] 余为, 陈新军. 印度洋西北海域鳶乌贼 9-10 月栖息地适宜指数研究[J]. 广东海洋大学学报, 2012, 32(6): 74-80.
- YU W, CHEN X J. Analysis on habitat suitability index of *Sthenoteuthis oualaniensis* in northwestern Indian Ocean from September to October [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2012, 32(6): 74-80.
- [19] 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: 240-264.
- WANG Y G, CHEN X J. The resource and fishery of world oceanic economic squid[M]. Beijing: Ocean Press, 2005: 240-264.
- [20] ROBINSON C J, GÓMEZ-GUTIÉRREZ J, DE LEÓN D A S. Jumbo squid (*Dosidicus gigas*) landings in the Gulf of California related to remotely sensed SST and concentrations of chlorophyll a (1998 - 2012) [J]. Fisheries Research, 2013, 137: 97-103.
- [21] 汪金涛, 陈新军, 高峰, 等. 基于环境因子的东南太平洋茎柔鱼资源补充量预报模型研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(6): 1185-1191.
- WANG J T, CHEN X J, GAO F, et al. Fish recruitment forecasting for *Dosidicus gigas* based on multi-environmental factors in the southeastern Pacific [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(6): 1185-1191.
- [22] 陈新军, 龚彩霞, 田思泉, 等. 栖息地理论在海洋渔业中的应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2019: 82-90.
- CHEN X J, GONG C X, TIAN S Q. Application of habitat theory in marine fisheries[M]. Beijing: Ocean Press, 2019: 82-90.
- [23] 余为, 陈新军. 东南太平洋秘鲁海域光合有效辐射对茎柔鱼资源丰度和空间分布的影响研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(11): 97-105.
- YU W, CHEN X J. Influences of photosynthetically active radiation on abundance and distribution of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the southeast Pacific Ocean off Peru [J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(11): 97-105.
- [24] 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[J]. 海洋学报, 2015, 37(8): 88-95.
- HU G Y, CHEN X J, WANG J T. Forecasting fishing ground of *Illex argentinus* based on different weight habitat suitability index in the southwestern Atlantic [J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(8): 88-95.
- [25] 蒋瑞, 陈新军, 雷林, 等. 秋冬季智利竹筴鱼栖息地指数模型比较[J]. 水产学报, 2017, 41(2): 240-249.
- JIANG R, CHEN X J, LEI L, et al. A comparative study on habitat suitability index of *Trachurus murphyi* during autumn and winter [J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(2): 240-249.
- [26] 温健, 陆鑫一, 陈新军, 等. 基于海表温度和光合有效辐射的西北太平洋柔鱼冬春生群体栖息地热点预测[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 456-463.
- WEN J, LU X Y, CHEN X J, et al. Predicting the habitat hot spots of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean based on the sea surface temperature and photosynthetically active radiation [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 456-463.

Analysis of fishing ground of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the southeast Pacific Ocean off Peru based on weighting-based habitat suitability index model

FENG Zhiping¹, YU Wei^{1,2,3,4,5}, CHEN Xinjun^{1,2,3,4,5}, LIU Bilin^{1,2,3,4}, ZHANG Zhong¹

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

Abstract: According to the fisheries data of *Dosidicus gigas* off Peru in the spring (August to October), summer (November to January), autumn (February to April) and winter (May to July) from 2006 to 2014, combined with three key marine environmental factors: sea surface temperature (SST), sea surface height (SSH), and net primary production (NPP), habitat suitability index models (HSI) with different weighting scenarios were employed to predict the fishing ground distribution of *Dosidicus gigas* off Peru. The relationship between catch per unite effort (CPUE) and SST as well as SSH and NPP was used to establish a suitability index (SI) model for each factor, and the arithmetic weighting method was applied to develop an integrated HSI model. Based on the proportions of catch and effort at each HSI class interval from the different weighted HSI models, the optimal models for different seasons were selected. The HSI model was validated by the data from 2015. The results showed that, the CPUE and the latitude gravity center of fishing ground (LATG) showed significant interannual and seasonal changes. In terms of interannual changes, CPUE basically fluctuated between 2 and 7 t/d, and the LATG basically ranged from 10°S to 18°S. On the seasonal change, CPUE in winter and spring was high, and the LATG was located in the northward regions on the fishing ground. In summer, the CPUE increased with the southward shift of the LATG. Compared with spring, the habitat moved 1.5° southwards and the CPUE increased by 6.7%. The change trend in autumn was the same as in winter and spring. The weighting schemes of the optimal habitat model in different seasons were different. The optimal weighting scheme of the spring was Case 9; the environmental factor with the highest weight was SST; the optimal weighting scheme of the summer was Case 7, and SST, SSH, and NPP weights were equivalent; the optimal weighting scheme for the autumn was Case 3, and the highest weighting was SSH. The above results indicated that the environmental factors had different impacts on the habitats of the *Dosidicus gigas* off Peru in each season. The accuracy of habitat predictions for each season was 84.68%, 78.56%, 72.74%, and 68.70%. It was helpful to understand the impacts of environmental factors on *Dosidicus gigas* stocks off Peru at different seasons, providing a scientific basis for the distant-water operations of Chinese squid-jigging fisheries.

Key words: *Dosidicus gigas*; habitat suitability index model; environmental variable; Latitudinal gravity center of fishing ground