

厄尔尼诺和拉尼娜事件下西北太平洋柔鱼栖息地时空分布差异

周茉, 方星楠, 余为, 刘连为

Difference of spatio-temporal distribution of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean under the El Niño and La Niña events

ZHOU Mo, FANG Xingnan, YU Wei, LIU Lianwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20210403383>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[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](#)

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

上海海洋大学学报. 2019, 28(3): 456 <https://doi.org/10.12024/jsou.20181102442>

[基于不同权重栖息地模型的秘鲁外海茎柔鱼渔场分析](#)

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

上海海洋大学学报. 2020, 29(6): 878 <https://doi.org/10.12024/jsou.20191102862>

[西北太平洋柔鱼渔场重心变化及其与环境的关系](#)

Variations of gravity centers of fishing ground for neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean and its relation with marine environment

上海海洋大学学报. 2020, 29(6): 899 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190802770>

[2005—2016年中国东海鲈鱼渔场的时空分布及与海表面温度的关联](#)

Spatio–temporal distribution of chub mackerel *Scomber japonicus* in the East China Sea during 2005–2016 and its relationship with sea surface temperature

上海海洋大学学报. 2022, 31(3): 710 <https://doi.org/10.12024/jsou.20210503429>

[西北太平洋柔鱼洄游重心年际变化及预测](#)

Interannual variation and forecasting of *Ommastrephes bartramii* migration gravity in the northwest Pacific Ocean

上海海洋大学学报. 2018, 27(4): 573 <https://doi.org/10.12024/jsou.20171102171>

文章编号: 1674-5566(2022)04-0984-10

DOI:10.12024/jsou.20210403383

厄尔尼诺和拉尼娜事件下西北太平洋柔鱼栖息地时空分布差异

周 莱¹, 方星楠¹, 余 为^{1,2,3,4,5}, 刘连为⁶

(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; 6. 浙江省海洋水产研究所, 浙江 舟山 316021)

摘 要: 基于 2006—2015 年 9—11 月西北太平洋 (36°N ~ 48°N 和 150°E ~ 170°E) 海域柔鱼 (*Ommastrephes bartarmii*) 生产捕捞数据并结合关键环境因子海表面温度 (sea surface temperature, SST) 和海表面高度距平 (sea surface height anomaly, SSHA), 构建各月单因子不同权重的综合栖息地指数模型 (habitat suitability index model, HSI), 按照模型性能筛选出每月最优模型并加以验证。此外, 利用最优模型预测柔鱼栖息地适宜性程度, 并比较厄尔尼诺和拉尼娜事件下柔鱼栖息地时空分布的差异性, 评估柔鱼生境质量与资源丰度、渔场分布的关系。结果显示, 9—11 月各月最优 HSI 模型的单因子适宜性指数 (suitability index, SI) SI_{SST} 和 SI_{SSHA} 权重比例分别为 9 月 0.9:0.1、10 月 0.7:0.3、11 月 0.8:0.2, 显然每月 SST 贡献率都是最高的, 表明水温对柔鱼栖息地时空分布的影响最为关键。对比分析厄尔尼诺年份 (2009 和 2015 年) 与拉尼娜年份 (2007 和 2010 年) 柔鱼的生境质量、资源丰度和渔场纬度重心可知, 相较厄尔尼诺事件, 拉尼娜事件的发生有利于柔鱼的生存, 促使其适宜生境范围扩大, 产量提升。柔鱼偏好的水温向北移动驱使渔场位置同样北移。

关键词: 柔鱼; 西北太平洋; 栖息地指数模型; 不同权重; 厄尔尼诺; 拉尼娜

中图分类号: S 931.4 **文献标志码:** A

柔鱼 (*Ommastrephes bartarmii*) 属于 1 年短生命周期的大洋洄游性头足类, 广泛分布于北太平洋 35°N ~ 50°N 和 145°E ~ 145°W 海域内, 特别是在黑潮与亲潮的交汇区, 柔鱼资源非常丰富, 是我国鱿钓渔业的重要捕捞渔场^[1]。柔鱼每年产量约占中国西北太平洋鱿钓总产量的 65% 以上^[2]。柔鱼是一种“生态机会主义”物种, 其中心渔场与资源丰度极易受海洋环境与气候变化的影响^[3]。已有研究^[4-6]表明, 柔鱼栖息地受大中尺度气候变化如厄尔尼诺、拉尼娜事件以及局部海域环境因子如海表面温度 (sea surface temperature, SST)、海表面高度 (sea surface height, SSH)、叶绿素 a 质量浓度 (chlorophyll-a, *Chl. a*) 等显著影响。但是各因子对柔鱼栖息地适宜性的影响程度并不同, 部分研究^[7]表明 SST 是影响

柔鱼栖息地适宜性的最关键环境因子, 其他因子的影响程度相较 SST 则处于弱势地位。因此, 精确探测柔鱼的生境适宜海域对渔场开发和资源的有效利用具有重要意义。

栖息地适宜性指数模型 (habitat suitability index model, HSI) 已在大洋性柔鱼类的渔场预报中有大量应用, 该模型在描述多个环境因子的综合作用时, 可以使用连乘、几何平均、算术平均等多种计算方式^[8], 其中大多数的研究是基于平均化的 HSI 算法, 与实时动态变化渔场并不具有严格的关联, 忽略了环境因子在短期内的变化。进一步分析, 未考虑到当海洋生物随着时间的推移, 影响该物种的关键环境因子的贡献率会发生变化, 当月的关键环境要素在下月的影响作用可能会减弱或加强。柔鱼的捕捞时期集中于 7—11

收稿日期: 2021-04-09 修回日期: 2021-08-12

基金项目: 上海市人才发展资金项目 (2021078); 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); 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室开放课题 (2020KF002)

作者简介: 周 莱 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业海洋学。E-mail: mimoo1997@126.com

通信作者: 余 为, E-mail: wyu@shou.edu.cn

月,其中秋季是柔鱼重要的捕捞季节。根据以往结论,SST 和海表面高度距平(sea surface height anomaly,SSHA)是影响柔鱼资源丰度和生境质量的重要因子^[4]。因此,构建基于 SST 和 SSHA 的西北太平洋柔鱼秋季各月不同权重的栖息地模型,筛选出各月最优性能的 HSI 模型并对其进行验证。此外,对比分析厄尔尼诺和拉尼娜事件下柔鱼栖息地时空分布的差异性,评估柔鱼生境质量与资源丰度、渔场分布的关系,为柔鱼资源的开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

柔鱼渔业数据由上海海洋大学中国远洋渔业数据中心提供,数据时间范围为 2006—2015 年 9—11 月,空间范围为 36°N ~ 48°N,150°E ~ 170°E。数据包括作业位置(经度和纬度)、作业时间(年和月)、产量(t)、捕捞努力量(d)等。数据时间分辨率为月,空间分辨率为 0.5° × 0.5°。

环境数据选取 SST 和 SSHA,数据来源于夏威夷大学网站(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>),时间分辨率为月,空间分辨率为 0.1° × 0.1°,均通过插值转化为 0.5° × 0.5°,对环境数据与渔业数据进行匹配分析。

1.2 分析方法

(1)计算单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort,CPUE)。定义经纬度 0.5° × 0.5° 为一个渔区,计算 2006—2015 年 9—11 月不同渔区内的 CPUE(t/d),其计算公式^[9-10]为

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

式中: $Y_{\text{CPUE-}y\text{m}ij}$ 为一个渔区内某年某月累计 CPUE,t/d; $\sum C_{y\text{m}ij}$ 为一个渔区内某年某月累计渔获量,t; $\sum E_{y\text{m}ij}$ 为一个渔区内某年某月累计捕捞努力量,d; y 为年份; m 为月份; i 为经度; j 为纬度。

(2)构建、筛选并验证不同权重方案的 HSI 模型。依据 YU 等^[11]建立的单因子适宜性指数(suitability index,SI)模型,估算西北太平洋柔鱼渔场海域 9—11 月适宜的 SST(SI_{SST})和适宜的 SSHA(SI_{SSHA}),并利用算术加权模型(arithmetic weighted model,AWM)计算柔鱼综合栖息地适宜性指数。HSI 值在 0~1 之间波动,认定 HSI ≤ 0.2 的海域为不良栖息地,0.2 < HSI < 0.6 的海域为

普通栖息地,HSI ≥ 0.6 的海域为适宜栖息地^[11]。HSI 的计算公式如下:

$$I_{\text{HSI}} = aI_{(\text{SI-SST})} + (1-a)I_{\text{SI-SSHA}} \quad (2)$$

式中: I_{HSI} 为综合栖息地适宜性指数 HSI; $I_{\text{SI-SST}}$ 和 $I_{\text{SI-SSHA}}$ 分别为环境因子 SST 和 SSHA 的单因子适宜性指数 SI_{SST} 和 SI_{SSHA} ; a 为 SST 的权重,(1- a) 为 SSHA 的权重, a 分别取值 0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2 和 0.1,即有 9 种权重方案,下述以案例 1~案例 9 表示。

(3)筛选最优模型。通过构建 9 种不同权重方案的 HSI 模型,分别计算 2006—2014 年 9—11 月各渔区的 HSI 值,并以 0.2 为间隔划分出 5 个等级^[11],统计在不同权重模型下渔获量和捕捞努力量在各 HSI 等级内所占比例,根据捕捞努力量和渔获量的比例整体上应随 HSI 值增加而增大的原则^[12],筛选出各月的最优模型。

(4)模型验证。基于最优模型,分析不同 HSI 区间内的柔鱼产量和捕捞努力量的变化情况,同时将 2015 年 9—11 月各月的 CPUE 数据与对应最优模型预测的 HSI 空间分布图进行叠加,识别实际捕捞位置与预测的适宜栖息地在空间位置上是否高比例重合。据此验证最优模型结果的可靠性。

(5)对比异常气候事件下柔鱼栖息地的时空变化。依据 NOAA 对厄尔尼诺和拉尼娜事件的定义^[12](<http://ggweather.com/enso/oni.htm>),选择拉尼娜年份(2007 和 2010 年 9—11 月)和厄尔尼诺年份(2009 和 2015 年 9—11 月)进行对比分析。以最优模型计算厄尔尼诺年份和拉尼娜年份对应的各月平均 HSI 值,绘制 HSI 的空间分布图,分析异常气候事件下柔鱼适宜栖息地的时空变化情况。此外,通过计算柔鱼渔场和 HSI 的纬度重心(latitudinal gravity center,LATG),进一步厘清异常气候事件下渔场和适宜栖息地在纬向上的变动规律。HSI 纬度重心计算公式^[12]为

$$Y_{\text{HSI}} = \frac{\sum (y_{i,m} \times I_{\text{HSI-}i,m})}{\sum I_{\text{HSI-}i,m}} \quad (3)$$

式中: Y_{HSI} 为 HSI 的纬度重心; $y_{i,m}$ 为第 m 月 i 渔区的纬度; $I_{\text{HSI-}i,m}$ 为第 m 月 i 渔区的 HSI 值。

2 结果

2.1 最优 HSI 模型的确定

利用设定的 9 种权重方案,构建秋季各月不

同权重的 HSI 模型, 共计 27 个。分别统计 2006—2014 年不同 HSI 区间内对应的渔获量和捕捞努力量比例(表 1~3)。以表 1 为例, 案例 1 的渔获量比例随 HSI 值增加而增大: 不良生境 ($HSI \leq 0.2$) 对应的渔获量和捕捞努力量的占比最低, 分别为 3.07% 和 4.60%; 而适宜栖息地 ($HSI \geq 0.6$) 对应的渔获量和捕捞努力量的占比最大, 为 80.71% 和 75.71%, 对比其他案例占比最高。因此, 案例 1 为西北太平洋柔鱼 9 月的最优 HSI 模型, SI_{SST} 和 SI_{SSHA} 的权重比例为

0.9:0.1。以此类推, 10 月最优模型是案例 3, 权重比例为 0.7:0.3; 11 月最优模型是案例 2, 权重比例为 0.8:0.2。可以看出, 关键环境因子 SST 和 SSHA 对柔鱼栖息地的影响程度在 9—11 月存在差异, 但总体 SST 的权重显著高于 SSHA。需要说明的是, HSI 区间在 0.8~1.0 的个别案例其捕捞努力量并非最高, 但适宜 HSI 范围内 (即 $HSI \geq 0.6$) 捕捞努力量仍然占据最高比例, 也符合最优模型标准。

表 1 2006—2014 年 9 月 5 个 HSI 区间内对应的渔获量和捕捞努力量比例
Tab. 1 Percentage of catch and fishing effort within different class intervals of habitat suitability index (HSI) in September from 2006 to 2014 %

不同案例 Different case	变量 Parameters	栖息地指数的不同区间 Different class intervals of HSI				
		[0.0,0.2]	(0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0]
案例 1 Case 1	渔获量 Catch	3.07	3.61	12.61	32.20	48.51
	捕捞努力量 Effort	4.60	4.41	15.28	26.94	48.77
案例 2 Case 2	渔获量 Catch	3.37	2.38	14.73	32.58	46.94
	捕捞努力量 Effort	4.92	2.94	16.77	29.33	46.04
案例 3 Case 3	渔获量 Catch	3.18	2.41	14.89	40.42	39.10
	捕捞努力量 Effort	4.74	2.86	17.97	38.42	36.01
案例 4 Case 4	渔获量 Catch	3.13	4.80	12.09	40.86	39.12
	捕捞努力量 Effort	4.65	4.93	15.82	40.00	34.60
案例 5 Case 5	渔获量 Catch	3.06	7.99	13.54	36.55	38.86
	捕捞努力量 Effort	4.57	8.39	17.86	34.86	34.32
案例 6 Case 6	渔获量 Catch	3.12	11.03	14.77	29.56	41.52
	捕捞努力量 Effort	4.61	12.65	18.89	25.97	37.88
案例 7 Case 7	渔获量 Catch	4.15	12.80	15.05	21.67	46.33
	捕捞努力量 Effort	5.95	15.07	17.85	18.44	42.69
案例 8 Case 8	渔获量 Catch	8.29	11.99	12.33	19.96	47.43
	捕捞努力量 Effort	10.18	14.66	14.77	16.14	44.25
案例 9 Case 9	渔获量 Catch	14.19	9.17	9.58	14.49	52.57
	捕捞努力量 Effort	17.50	11.51	11.16	12.67	47.16

2.2 各月最优 HSI 模型的验证

利用各月最优 HSI 模型预测了 2015 年西北太平洋柔鱼渔场内的 HSI 值, 并将 2015 年渔业数据与预测的 HSI 值匹配来进行验证。从图 1 可以看出: 2015 年 9—10 月, 渔获量和捕捞努力量在不同 HSI 区间内所占比例随着 HSI 升高而提高; 11 月非适宜栖息地和最佳适宜栖息地范围内的渔获量和捕捞努力量所占比例极低, 低于 5%, 但较适宜栖息地 ($0.6 \leq HSI < 0.8$) 范围内捕捞努力量和产量占比高达 90% 以上。其中, 11 月最佳

生境 ($HSI \geq 0.8$) 范围内捕捞努力量占据比例较少, 这可能是渔民依据主观经验判断渔场位置, 作业位置与往年一致, 但并非代表预测的最佳生境内没有丰富的柔鱼资源, 且大部分作业位置均分布在 $HSI \geq 0.6$ 范围内。此外, 从空间分布图 (图 2) 上来看, 较高捕捞努力量基本集中于适宜栖息地范围内。因此, 筛选出的 9—11 月最优模型均能较好地预测柔鱼栖息地适宜性, 预测结果可靠。

表 2 2006—2014 年 10 月 5 个 HSI 区间内对应的渔获量和捕捞努力量比例
 Tab. 2 Percentage of catch and fishing effort within different class intervals of habitat suitability index (HSI) in October from 2006 to 2014

不同案例 Different case	变量 Parameters	栖息地指数的不同区间 Different class intervals of HSI				
		[0.0,0.2]	(0.2,0.4)	[0.4,0.6]	[0.6,0.8)	[0.8,1.0]
案例 1 Case 1	渔获量 Catch	3.36	14.32	6.45	29.87	46.00
	捕捞努力量 Effort	5.91	13.30	8.63	24.32	47.84
案例 2 Case 2	渔获量 Catch	2.27	7.81	13.37	33.07	43.48
	捕捞努力量 Effort	3.94	9.02	14.03	28.32	44.69
案例 3 Case 3	渔获量 Catch	1.85	5.36	15.77	33.83	43.19
	捕捞努力量 Effort	3.09	8.78	14.56	33.35	40.22
案例 4 Case 4	渔获量 Catch	1.88	4.07	24.56	25.18	44.31
	捕捞努力量 Effort	3.17	7.16	22.82	30.18	36.67
案例 5 Case 5	渔获量 Catch	2.05	3.72	20.43	30.23	43.57
	捕捞努力量 Effort	3.49	6.43	21.49	32.68	35.91
案例 6 Case 6	渔获量 Catch	2.17	4.21	21.30	31.42	40.90
	捕捞努力量 Effort	3.64	6.63	23.46	32.14	34.13
案例 7 Case 7	渔获量 Catch	2.31	11.07	15.62	28.53	42.47
	捕捞努力量 Effort	3.93	12.62	19.63	28.52	35.30
案例 8 Case 8	渔获量 Catch	2.77	12.71	12.68	18.45	53.39
	捕捞努力量 Effort	4.58	13.64	17.82	20.40	43.56
案例 9 Case 9	渔获量 Catch	4.51	12.41	13.76	14.97	54.35
	捕捞努力量 Effort	7.13	13.59	17.13	16.64	45.51

表 3 2006—2014 年 11 月 5 个 HSI 区间内对应的渔获量和捕捞努力量比例
 Tab. 3 Percentage of catch and fishing effort within different class intervals of habitat suitability index (HSI) in November from 2006 to 2014

不同案例 Different case	变量 Parameters	栖息地指数的不同区间 Different class intervals of HSI				
		[0.0,0.2]	(0.2,0.4)	[0.4,0.6]	[0.6,0.8)	[0.8,1.0]
案例 1 Case 1	渔获量 Catch	1.64	17.52	10.15	17.54	53.15
	捕捞努力量 Effort	3.04	14.44	12.54	21.57	48.41
案例 2 Case 2	渔获量 Catch	1.30	17.76	9.72	19.58	51.64
	捕捞努力量 Effort	2.44	14.85	11.95	24.28	46.48
案例 3 Case 3	渔获量 Catch	2.23	17.20	9.28	28.71	42.58
	捕捞努力量 Effort	3.96	13.77	12.26	30.97	39.04
案例 4 Case 4	渔获量 Catch	4.03	20.71	13.36	23.01	38.89
	捕捞努力量 Effort	6.43	16.32	17.86	23.65	35.74
案例 5 Case 5	渔获量 Catch	4.31	20.28	16.29	28.65	30.47
	捕捞努力量 Effort	7.05	15.39	21.35	25.96	30.25
案例 6 Case 6	渔获量 Catch	6.36	20.31	15.90	30.74	26.69
	捕捞努力量 Effort	9.19	16.22	20.27	28.62	25.70
案例 7 Case 7	渔获量 Catch	12.99	22.44	14.00	21.81	28.76
	捕捞努力量 Effort	16.45	19.05	13.69	22.36	28.45
案例 8 Case 8	渔获量 Catch	14.69	22.28	15.63	18.12	29.28
	捕捞努力量 Effort	18.84	18.40	15.00	18.31	29.45
案例 9 Case 9	渔获量 Catch	22.02	16.36	14.75	21.43	25.44
	捕捞努力量 Effort	26.64	12.80	13.62	18.66	28.28

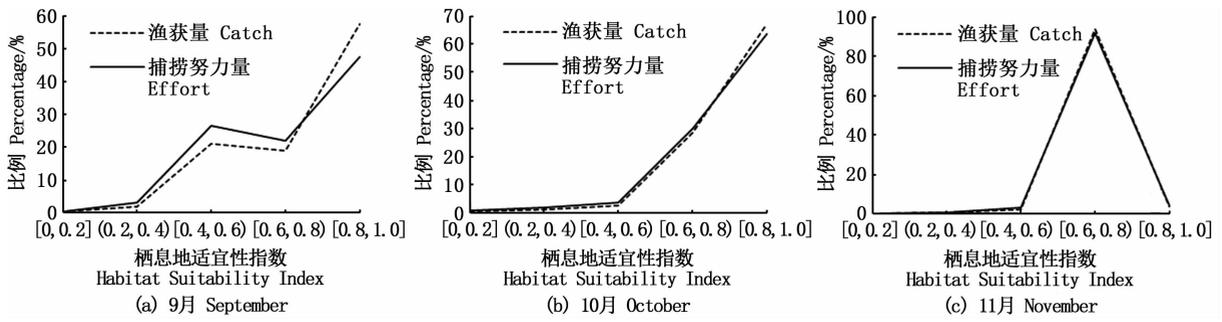


图1 基于最优模型估算的 2015 年产量与捕捞努力量在不同 HSI 区间内的占比
 Fig. 1 Percentage of catch and fishing effort within different class intervals of habitat suitability index (HSI) in 2015 based on the best HSI model

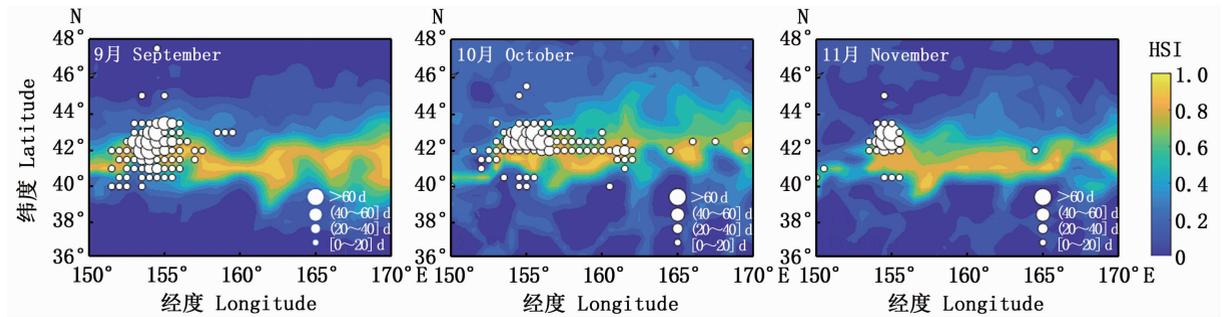


图2 2015 年 9—11 月栖息地适宜性指数与捕捞努力量叠加图

Fig. 2 Predicted habitat suitability index (HSI) from September to November in 2015 overlaid with effort

2.3 不同气候年份下柔鱼适宜栖息地的时空变化

由图 3 和表 4 可以看出,西北太平洋柔鱼适宜栖息地不同气候年份下的时空分布差异较大。总体上柔鱼适宜栖息地分布在 42°N 海域,而相对于厄尔尼诺年份(2009 和 2015 年),拉尼娜年份(2007 和 2010 年)柔鱼的适宜栖息地空间占比更大,分布范围在东西向有所延伸且纬度方向扩散至 44°N 附近。对于 $HSI \geq 0.8$ 的栖息地,该现象更明显。此外,对比其他年份,2009 年适宜栖息地的分布极具缩小,2015 年秋季各月 $HSI \geq 0.9$ 的海域较少,尤其在 11 月几乎消失,而 2010 年 11 月柔鱼适宜栖息地面积显著扩张。从月份来看:厄尔尼诺年份 9—11 月柔鱼生境质量逐渐下降,9 月适宜栖息地面积最高,11 月最少;拉尼娜年份 9—11 月柔鱼适宜生境范围差异不大,10 月适宜栖息地空间占比最少。

2.4 异常气候事件下 CPUE 和 LATG 对栖息地变化的响应

从图 4 可以看出,生境适宜性程度的变化与 CPUE 变化一致:拉尼娜年份的柔鱼平均 HSI 明显高于厄尔尼诺年份的 HSI,相对应年份的 CPUE 呈现一致变化趋势。此外,适宜栖息地的纬度重心与实际捕捞的纬度位置变化趋势一致:拉尼娜事件导致柔鱼适宜栖息地的纬度位置比在厄尔尼诺事件下更偏北,同样地,实际捕捞位置在拉尼娜事件下向北偏移。

绘制厄尔尼诺和拉尼娜年份 9—11 月柔鱼最适宜 SST (即 $SI_{SST} = 1$ 时, $SST_{Sept} = 17.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $SST_{Oct} = 15.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $SST_{Nov} = 12.84\text{ }^{\circ}\text{C}$) 等值线的空间分布(图 5)。对比发现:11 月柔鱼最适宜的 SST 等值线位置明显比 9—10 月的位置偏北;且拉尼娜年份柔鱼偏好的 SST 纬度位置相对厄尔尼诺年份向北偏约 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 。

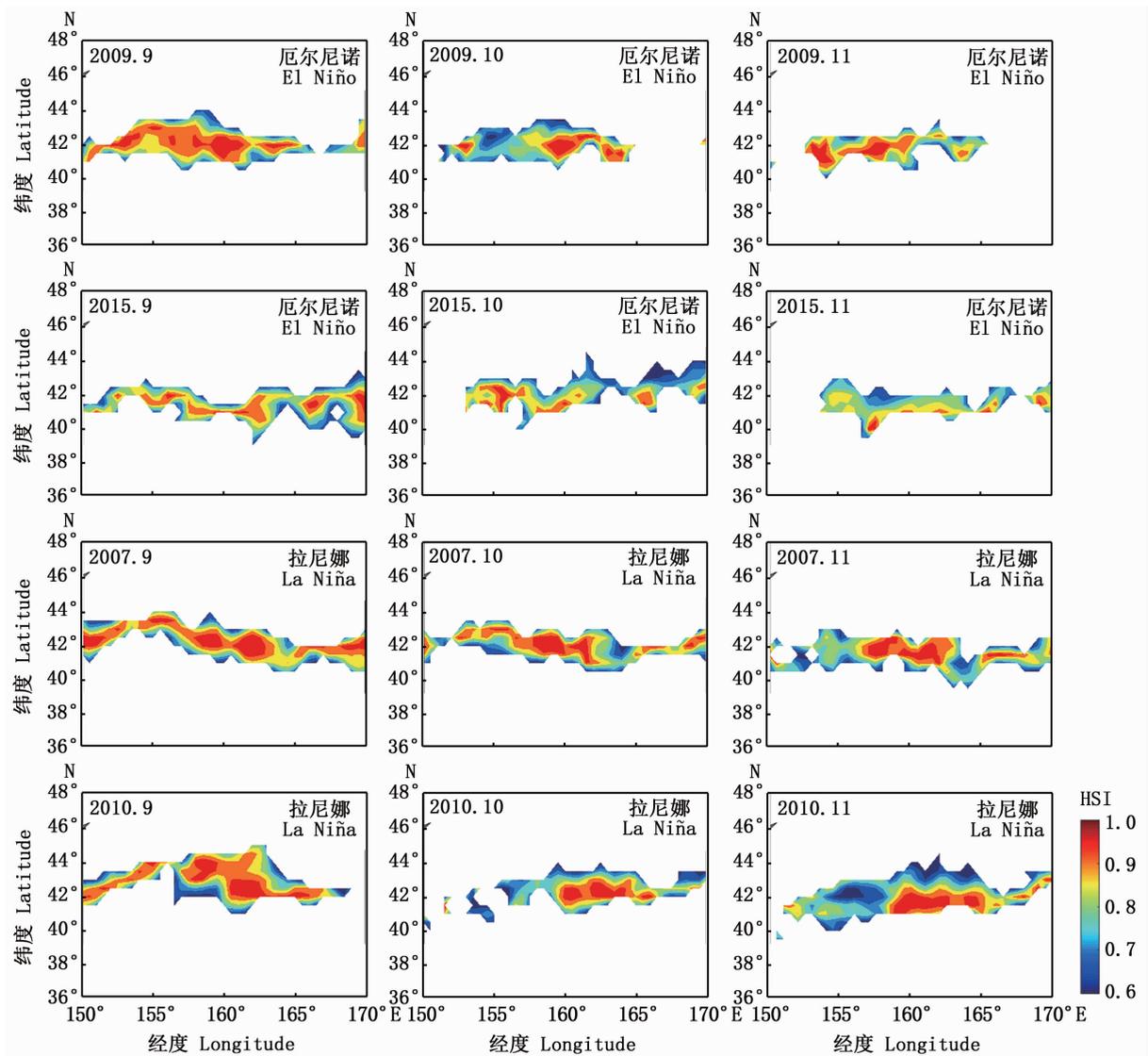


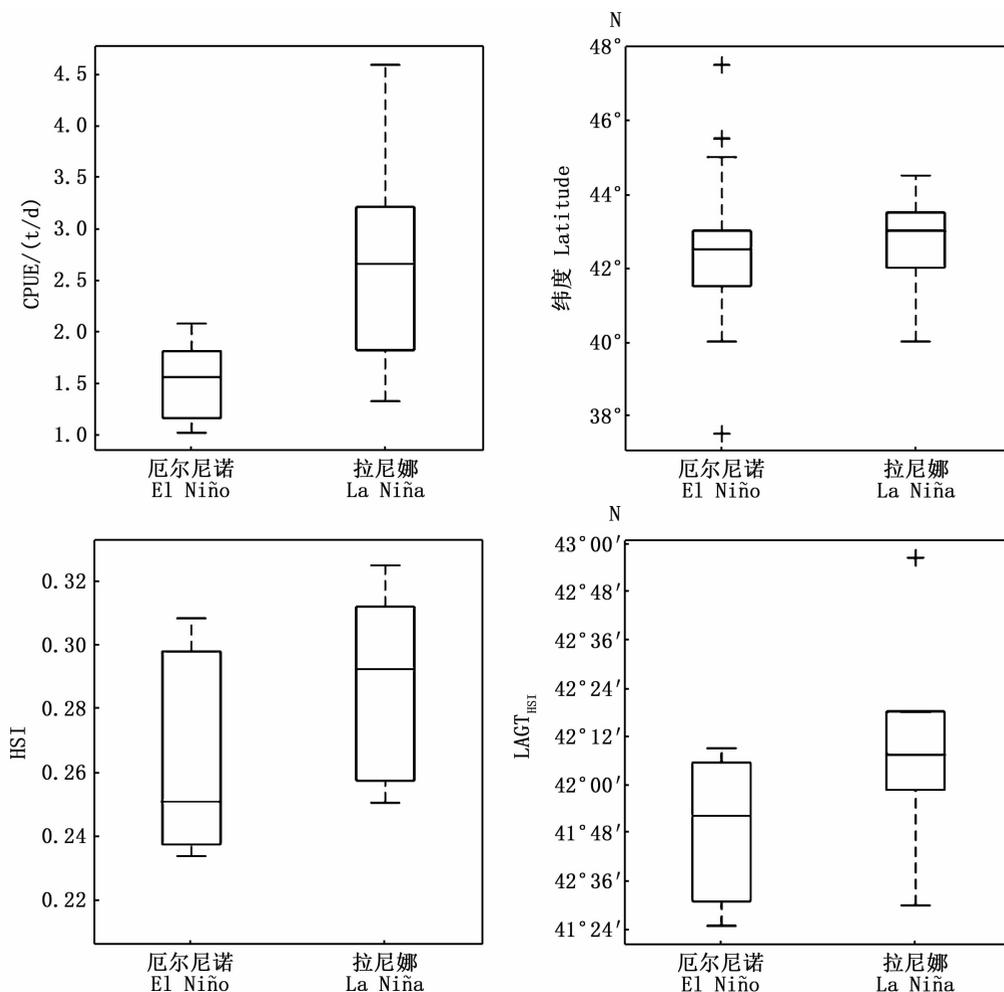
图3 厄尔尼诺年份(2009和2015年)与拉尼娜年份(2007和2010年)
9—11月柔鱼适宜栖息地($HSI \geq 0.6$)空间分布图

Fig. 3 Spatial distributions of suitable habitat ($HSI \geq 0.6$) of *O. bartarmii* in El Niño years (2009 and 2015) and La Niña years (2007 and 2010) from September to November

表4 厄尔尼诺年份(2009和2015年)与拉尼娜年份(2007和2010年)
9—11月柔鱼适宜栖息地($HSI \geq 0.6$)空间面积占比

Tab. 4 Spatial area ratio of suitable habitat ($HSI \geq 0.6$) of *O. bartarmii* in El Niño years (2009 and 2015) and La Niña years (2007 and 2010) from September to November %

年份 Year	9月 September	10月 October	11月 November
2009	16.20	12.88	11.12
2015	16.59	15.02	12.20
2007	16.78	15.22	16.78
2010	16.78	14.24	18.93



“+”. 异常值。
“+”. Outlier.

图4 厄尔尼诺和拉尼娜年份下的柔鱼 CPUE 和栖息地适宜性指数 (HSI) 以及实际作业的纬度位置的平均值和适宜栖息地的纬度重心 ($LATG_{HSI \geq 0.6}$)

Fig. 4 Habitat suitability index (HSI) and catch per unit effort (CPUE), average value of the latitude of fishing position and latitudinal gravity centers (LATG) of suitable HSI of *Ommastrephes bartarmii* in El Niño and La Niña years

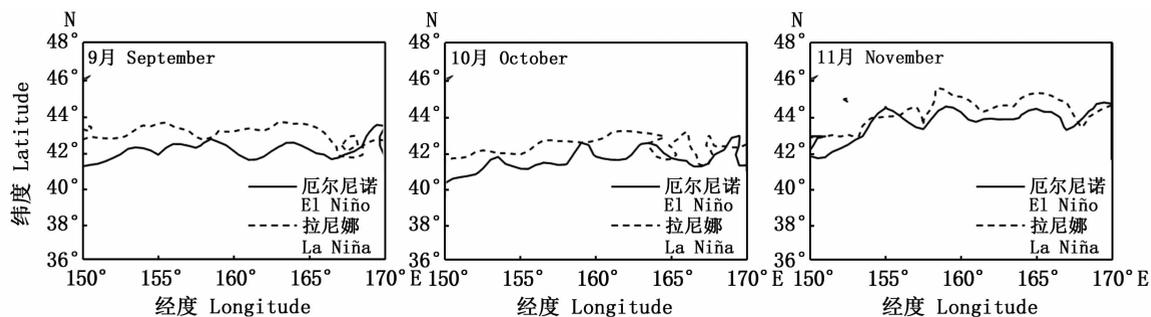


图5 厄尔尼诺和拉尼娜年份9—11月柔鱼最适宜 SST 等值线的空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of the contour lines of optimal sea surface temperature of *O. bartarmii* in El Niño and La Niña years from September to November

3 讨论

HSI 模型是由美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署提出的用于描述鱼类和野生动物栖息地质量的框架模型^[13],现已广泛应用于头足类生境质量与海洋环境及气候之间的相关研究中。在头足类栖息地模型的研究中,将所有单因子的 SI 模型综合计算出 HSI 的方法有很多种,其中算术平均法(arithmetic mean model, AMM)被广泛使用。例如:CHEN 等^[14]利用 SST、SSHA、海洋表面盐度(sea surface salinity, SSS)和 *Chl. a* 等 4 种环境数据对西北太平洋柔鱼栖息地进行了研究,将不同的环境变量进行组合,分别用 AMM 和几何平均法(geometric mean model, GMM)构建 HSI 模型,利用赤池信息准则(Akaike's information criterion, AIC)选择最佳栖息地模型,结果表明:结合 SST、SSHA 和 *Chl. a* 等 3 种环境因子的 AMM 模型能更好地预测柔鱼的适宜生境。温健等^[15]利用 SST 和光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)两种关键环境因子,构建基于 AMM 的柔鱼综合栖息地热点预测模型,其验证结果表明此模型可有效预测西北太平洋柔鱼的栖息地热点海域。然而,利用 AMM 计算而得的 HSI 是一个平均化的指标,无法体现各环境因子对栖息地的影响存在差异性,进而影响模型的预测性能。为了消除这种平均化的不利影响, YU 等^[11]利用 2006—2014 年 9—11 月 SST、PAR、SSHA 等 3 种环境因子搭建出 10 种不同权重的 HSI 模型,按照栖息地模型理论筛选出最优模型,3 种环境因子的权重为 0.8:0.1:0.1,并以 2015 年实际生产数据叠加预测的 HSI 空间分布图进行验证,其结果表明最优模型验证成功。在此研究中考虑到了各因子的影响差异,但对于最优模型的搭建其时空尺度以年为单位,而本文延伸该研究将 SST 和 SSHA 作为关键环境因子构建了 9—11 月每月 9 种不同权重 HSI 模型,共计 27 种,按照模型性能筛选出每月最优模型并加以验证:最优模型的权重方案 9 月为 0.9:0.1、10 月为 0.7:0.3、11 月为 0.8:0.2。分别利用 2015 年实际生存数据进行验证,结果(图 1 和图 2)显示 3 个最优模型均通过检验。

柔鱼生境质量的动态变化与海洋环境的动态变化关联密切,本文研究成果显示 2 种环境因

子对柔鱼生境质量的影响程度在 9—11 月出现浮动,尤其在 10 月,SSHA 的影响程度明显提升,推测原因:图 5 显示,9—11 月西北太平洋柔鱼最适宜 SST 位置向北偏移,同时 10—11 月是性成熟个体向南进行产卵洄游的高峰期。柔鱼偏好的 SST 位置北移以及种群向南进行生殖洄游使得 SST 对其生境的影响程度有所削弱。此外,10—11 月柔鱼洄游路径对应黑潮和亲潮混合区域,该区域内存在繁多复杂变化的涡旋,对柔鱼产生明显的影响,柔鱼偏好于冷涡,对应 SSHA 较低,因此海面高度对柔鱼影响相应增加。尽管 SST 对柔鱼生境质量的影响程度存在变动,但在 3 种最优模型中 SST 始终占据主导地位,可以看出,水温是影响柔鱼群体最为关键的环境因子,这与以往研究^[15-17]相符。究其原因,主要是温度会直接影响柔鱼的摄食、生长、洄游和趋光反应等生活习性^[18],从而影响柔鱼的产量、渔场的形成以及栖息环境的适宜性。

柔鱼生境的时空分布对气候变化具有显著响应。在年代际时间尺度上,太平洋年际涛动(PDO)冷暖位相的转换对西北太平洋柔鱼栖息地产生明显的影响,在 PDO 暖期会产生更大范围的适宜栖息地,且适宜栖息地位置偏南,而 PDO 冷期则相反^[19]。在年际及月际时间尺度上,已有研究^[16,20]表明 ENSO 事件对于柔鱼的生境与渔场变动产生重要影响,相比厄尔尼诺事件,柔鱼更适应拉尼娜事件下的气候条件,易产生更大范围的适宜栖息地,纬度位置偏北,而厄尔尼诺现象会使柔鱼适宜环境范围缩减。本文同样对比分析了厄尔尼诺年份(2009 和 2015 年)以及拉尼娜年份(2007 和 2010 年)柔鱼生境与其资源丰度、渔场纬度重心的关系,结果表明拉尼娜的发生有利于柔鱼的生存,促使其适宜生境范围扩大,产量提升,渔场位置向北有所偏移,与以往研究相符。

本文侧重于以月为单位搭建西北太平洋柔鱼栖息地的最优模型,以此在前人研究的基础上进一步提高模型的预测精度,验证结果表明模型预测性能较为可靠,但仍存在一定的局限性:本文选择的环境因子较少,影响柔鱼生境的环境因子复杂多样且相互作用。例如,影响柔鱼生长摄食的饵料丰度可用 *Chl. a* 或海洋净初级生产力(net primary productivity, NPP)量化后作为关键环

境因子输入模型,SSS 也会对柔鱼产生影响^[21]。此外,当前针对头足类和鱼类栖息地时空变动的研究集中于大中尺度的年代际、年间和月间的变化,很显然,头足类生物作为短周期生命物种在更小的时空尺度上也会出现明显变化,为探究柔鱼资源及其栖息环境在中小尺度上的时空变化,也应引入短期产生剧烈变化且极为重要的海洋动力环境因子,如中尺度涡,可将其量化后作为指标搭建栖息地模型,目前缺少在此方面的详细研究,这是一个值得深入研究且可行性较强的科学问题。

参考文献:

- [1] 程家骅, 黄洪亮. 北太平洋柔鱼渔场的环境特征[J]. 中国水产科学, 2003, 10(6): 507-512.
CHENG J H, HANG H L. Relationship between environment characters and *Ommastrephes bartrami* fishing ground in the north Pacific [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10(6): 507-512.
- [2] 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 bartrami*)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 bartrami* with SST-based habitat suitability modelling in northwestern Pacific [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(6): 707-713.
- [3] 解明阳, 陈新军. 基于不同阶数灰色系统模型的北太平洋柔鱼资源丰度预测[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(4): 755-762.
XIE M Y, CHEN X J. Prediction of abundance index of *Ommastrephes bartrami* in the north Pacific Ocean based on different order grey system models [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(4): 755-762.
- [4] CHEN X J, LIU B L, CHEN Y. A review of the development of Chinese distant-water squid jigging fisheries [J]. Fisheries Research, 2008, 89(3): 211-221.
- [5] CHEN X J, ZHAO X H, CHEN Y. Influence of El Niño/La Niña on the western winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) in the northwestern Pacific Ocean [J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(6): 1152-1160.
- [6] YU W, CHEN X J, YI Q, et al. A review of interaction between neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) and oceanographic variability in the north Pacific Ocean [J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(4): 739-748.
- [7] GONG C X, CHEN X J, GAO F, et al. Importance of weighting for multi-variable habitat suitability index model: A case study of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartrami* in the northwestern Pacific Ocean [J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(2): 241-248.
- [8] 龚彩霞. 基于栖息地指数的西北太平洋柔鱼渔获量估算[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
GONG C X. Estimating potential yield for neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) in the northwest Pacific Ocean based on habitat suitability index model [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [9] 解明阳, 陈新军. 基于灰色系统理论的西北太平洋柔鱼 CPUE 关联聚类分析[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(3): 536-545.
XIE M Y, CHEN X J. Correlation clustering analysis of CPUE of neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) in the northwest Pacific based on grey system theory [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(3): 536-545.
- [10] CAO J, CHEN X J, CHEN Y. Influence of surface oceanographic variability on abundance of the western winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartrami* in the NW Pacific Ocean [J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 381: 119-127.
- [11] YU W, CHEN X J, ZHANG Y, et al. Habitat suitability modelling revealing environmental-driven abundance variability and geographical distribution shift of winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartrami* in the northwestern Pacific Ocean [J]. ICES Journal of Marine Science, 2019, 76(6): 1722-1735.
- [12] 余为. 西北太平洋柔鱼冬春生群对气候与环境变化的响应机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
YU W. Response mechanism of winter-spring cohort of neon flying squid to the climatic and environmental variability in the northwestern Pacific Ocean [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [13] MADDOCK I. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 373-391.
- [14] 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 bartrami*) in the northwestern Pacific Ocean [J]. Fishery Bulletin-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2010, 108(1): 1-14.
- [15] 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 bartrami* in the northwestern Pacific Ocean based on the sea surface temperature and photosynthetically active radiation [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 456-463.
- [16] YU W, CHEN X J, YI Q, et al. Spatio-temporal distributions and habitat hotspots of the winter-spring cohort of neon flying

- squid *Ommastrephes bartramii* in relation to oceanographic conditions in the northwest Pacific Ocean [J]. Fisheries Research, 2016, 175: 103-115.
- [17] 刘瑜. 西北太平洋柔鱼和秋刀鱼对海洋动力环境的响应机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- LIU Y. Study on the response mechanism of squid and pacific saury to marine dynamic environment in the northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [18] 陈新军, 田思泉, 许柳雄. 西北太平洋海域柔鱼产卵场和作业渔场的水温年间比较及其与资源丰度的关系[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(2): 168-175.
- CHEN X J, TIAN S Q, XU L X. Analysis on changes of surface water temperature in the spawning and feeding ground of *Ommastrephes bartramii* and its relationship with abundance index in the northwestern Pacific Ocean [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(2): 168-175.
- [19] YU W, WEN J, CHEN X J, et al. Trans-Pacific multidecadal changes of habitat patterns of two squid species[J]. Fisheries Research, 2021, 233: 105762.
- [20] 易倩, 余为, 陈新军. 西北太平洋柔鱼栖息地适宜性变动研究[J]. 海洋渔业, 2019, 41(3): 257-265.
- YI Q, YU W, CHEN X J. Habitat suitability variations of *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(3): 257-265.
- [21] 魏广恩, 陈新军. 北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)资源渔场研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2016, 36(6): 114-122.
- WEI G E, CHEN X J. Review on neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) resources and fishing ground in the north Pacific Ocean [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2016, 36(6): 114-122.

Difference of spatio-temporal distribution of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean under the El Niño and La Niña events

ZHOU Mo¹, FANG Xingnan¹, YU Wei^{1,2,3,4,5}, LIU Lianwei⁶

(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, Shanghai 201306, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 6. Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang, Zhoushan 316021, Zhejiang, China)

Abstract: According to the fisheries data of *Ommastrephes bartarmii* combined with the sea surface temperature (SST) and sea surface height anomaly (SSHA) data obtained from 36°N to 48°N, 150°E to 170°E in northwest Pacific Ocean from September to November, 2006 – 2015, monthly habitat suitability index models (HSI) were established based on key marine environmental factors of different weighting scenarios, and monthly optimal model was selected and verified according to the model performance. Furthermore, the optimal HSI models predicted the habitat suitability, and the impacts of El Niño and La Niña on habitat suitability of *O. bartramii* are also compared, and the relationship between habitat quality and abundance, distribution are evaluated. The results showed that the weighting proportion of SI_{SST} and SI_{SSHA} of the monthly optimal HSI models from September to November were as follows: 0.9:0.1 in September, 0.7:0.3 in October, and 0.8:0.2 in November. Obviously, the contribution of SST was the highest, indicating that SST was the most important factor for spatial and temporal distribution of habitat. Moreover, comparing the impacts of El Niño years (2009 and 2015) and La Niña years (2007 and 2010) on habitat suitability, stocks abundance and latitudinal gravity center of fishing ground of *O. bartramii*, it is found that the La Niña events were more beneficial to the survival of *O. bartramii* than the El Niño events, and the suitable habitat area also increased the catch. Suitable SST moved north, resulting in a northward shift of fishing ground location as well.

Key words: *Ommastrephes bartarmii*; northwest Pacific Ocean; habitat suitability index model; different weight; El Niño; La Niña