

春季南海鳶乌贼栖息地时空分布及其年际差异分析

范江涛¹, 余 为^{2,3}, 马胜伟¹, 陈作志¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部北海渔业开发重点实验室, 广东 广州 510300

2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306

3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306

摘要: 根据2014—2017年春季南海鳶乌贼 (*Sthenoteuthis oualaniensis*) 渔业数据以及海表面温度 (Sea surface temperature, SST)、叶绿素a浓度 (Chlorophyll-a, Chl-a) 和海面高度 (Sea surface height, SSH) 3个关键环境因子, 构建栖息地指数 (Habitat suitability index, HSI) 模型以厘清春季南海鳶乌贼栖息地的时空分布规律, 并分析各年栖息地时空分布差异及其成因。结果发现, 春季南海鳶乌贼渔场环境呈现SST和SSH北低南高、Chl-a沿岸高而远海低的分布特征; 鳶乌贼适宜栖息地主要分布在110°E—119°E, 栖息地的分布与3个环境因子的空间分布显著相关; 2014—2017年HSI空间距平值呈逐年下降趋势, 且在空间上具有显著年际差异, 同时空间分布具有显著的经、纬度差异; 适宜环境范围逐年缩小, 导致鳶乌贼适宜栖息地面积呈现下降趋势。研究表明, 春季南海鳶乌贼栖息地的时空分布与渔场环境因子显著相关, 其年际差异可由各年环境因子的时空分布来解释。

关键词: 鳶乌贼; 栖息地; 资源评估; 年际差异; 南海

中图分类号: S 931.41

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Spatio-temporal variability of habitat distribution of *Sthenoteuthis oualaniensis* in South China Sea and its interannual variation

FAN Jiangtao¹, YU Wei^{2,3}, MA Shengwei¹, CHEN Zuozhi¹

1. South China Sea Fisheries Research Institute/Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

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

Abstract: Based on the fishery data of *Sthenoteuthis oualaniensis* and three critical environmental factors including sea surface temperature (SST), Chlorophyll-a (Chl-a) and sea surface height (SSH), we developed an integrated habitat suitability index (HSI) model to examine the spatio-temporal distribution of potential habitat of *S. oualaniensis* in the South China Sea in spring and clarify the law of the spatio-temporal distribution of habitat of the fish. Results show that the SST and SSH on the fishing ground of *S. oualaniensis* were lower in the northern waters but higher in the southern waters. The Chl-a concentration was higher in the coastal waters but lower in the pelagic waters. The suitable habitats of *S. oualaniensis* in spring mainly distributed in the regions between 110°E and 119°E, and its spatial location was consistent of the overlapping areas among the suitable environ-

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD0901405); 广东省重点领域研发计划项目 (2020B1111030001); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41906073); 上海市自然科学基金项目 (19ZR1423000); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (2020TD05, 2021SD01)

作者简介: 范江涛 (1987—), 男, 助理研究员, 硕士, 从事渔业资源与渔场研究。E-mail: fjt@scsfri.ac.cn

通信作者: 陈作志 (1978—), 男, 研究员, 博士, 从事渔业海洋学研究。E-mail: zzchen2000@163.com

mental ranges of the above-mentioned three factors. Besides, the HSI anomaly from 2014 to 2017 decreased gradually and showed interannual variability in space. Annually suitable range of each environmental factor exhibited a decreasing trend, and the unfavorable range of each environmental factor showed an increasing trend, leading to the contracted suitable habitats and enlarged unfavorable habitats for *S. oualaniensis*. The longitudinal and latitudinal distribution of suitable habitats of *S. oualaniensis* also showed significant interannual variability from year to year. The results indicate that the habitats of *S. oualaniensis* are closely associated with the environmental factors on their fishing ground; the variability of spatial and temporal of potential habitat hotspots can be explained by the spatio-temporal distribution of environmental conditions.

Key words: *Sthenoteuthis oualaniensis*; Habitat; Stock assessment; Interannual variation; South China Sea

鳶乌贼 (*Sthenoteuthis oualaniensis*) 是广泛分布于热带和亚热带的头足类, 在海洋食物网中处于承上启下的中间位置, 被大型海洋动物所捕食, 同时摄食小型鱼类和甲壳类, 在海洋生态系统中具有重要的生态价值^[1-2]。鳶乌贼具有重要的经济价值, 其资源在印度洋和太平洋最为丰富, 在我国南海海域, 鳶乌贼资源潜力同样巨大, 有关研究表明, 鳶乌贼可捕捞量最高可达 2×10^6 t^[3]。目前鳶乌贼已被中国 (包括台湾省)、菲律宾、日本等多个国家进行商业化捕捞, 成为头足类渔业的重要组成部分^[3]。与其他头足类一致, 鳶乌贼生命周期仅 1 年, 短生命周期的生活史特征决定其种群对不同时空尺度的气候和海洋环境变化极为敏感, 资源丰度和空间分布受到环境条件的显著影响^[4-6]。已有研究表明, 南海海域鳶乌贼渔场的时空分布受到海表温度 (Sea surface temperature, SST)、叶绿素 *a* 浓度 (Chlorophyll-*a*, Chl-*a*)、海表面高度 (Sea surface height, SSH) 等环境因子的显著影响^[7-8]。

目前国内外学者针对南海鳶乌贼的生物学习性 (生长、繁殖、摄食和洄游等) 及其资源开发等的研究相对深入^[2,9], 而探索其栖息地的时空分布规律及其年际变化的研究则较少。海洋鱼类栖息地评估对于认知渔业种群动态及其资源的有效管理具有重要作用^[10]。南海外海作为鳶乌贼潜在的重要栖息地, 有必要科学评估其栖息地分布特征及其与环境的关联。栖息地指数 (Habitat suitable index, HSI) 模型最初被用来寻找陆生动物栖息地, 随着 HSI 技术的发展, 目前已广泛应用于探测大洋鱼类的栖息地、评估气候和海洋环境变化对栖息地时空变动的影响^[11-12]。本文根据 2014—2017 年春季南海鳶乌贼渔业数据, 选择对鳶乌贼种群变动尤为重要的 3 个关键环境因子 (SST、Chl-*a* 和 SSH), 通过构建 HSI 模型, 厘清春季南海鳶乌贼栖息地的时空分布规律, 并分析各年栖息地时空分布差异及其成因。

1 材料与方法

1.1 材料

鳶乌贼的渔业数据来自南海渔业战略研究中心的生产监控数据, 时间尺度为月, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 年份为 2014—2017 年, 数据包含作业经、纬度, 作业时间和作业次数等信息。研究范围主要分布在 110°E — 119°E , 5°N — 16°N 南海外海海域。

海洋环境数据包括 SST、Chl-*a* 和 SSH, 数据时间采用 2014—2017 年春季 (3—5 月) 数据, 时间分辨率为月。数据覆盖鳶乌贼作业渔场海域, 数据空间分辨率均由 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 通过插值转化为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。环境数据均来源于夏威夷大学网站 (<http://ap-drc.soest.hawaii.edu/data/data.php>)。

1.2 分析方法

1) 将 2014—2017 年春季 (3—5 月) 鳶乌贼渔场范围内的 SST、Chl-*a* 和 SSH 分别进行季节平均, 绘制各环境因子的空间分布图, 从季节的时间尺度分析各环境因子的春季气候态空间分布规律。

2) 构建鳶乌贼的 HSI 模型。利用鳶乌贼作业次数在各环境变量不同范围内的频率分布, 估算各环境区间内鳶乌贼的适宜性 (Suitable index, SI)。利用估算的 SI 和各个环境变量分段区间值拟合 SI 曲线。SI 与环境变量的关系可通过正态函数分布法定量分析, 各环境变量的分布函数分别表示为^[13]:

$$SI_{\text{SST}} = \exp [a \times (\text{SST} - b)^2] \quad (1)$$

$$SI_{\text{Chla}} = \exp [a \times (\text{Chla} - b)^2] \quad (2)$$

$$SI_{\text{SSH}} = \exp [a \times (\text{SSH} - b)^2] \quad (3)$$

式中: *a* 和 *b* 为模型中估算的参数; SST、Chl-*a* 和 SSH 为对应环境变量值。其中 SI=0 时, 代表该海域的环境条件最为不利; 而 SI=1 时, 代表环境条件最有利; SI>0.6 的海域认定为对应环境因子的适宜范围。

利用算术平均法 (Arithmetic mean method, AMM)^[6,14] 计算鳶乌贼综合 HSI, 计算公式为:

$$HSI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SI_{SST} + SI_{Chla} + SI_{SSH}) \quad (4)$$

式中: SI_{SST} 、 SI_{Chla} 和 SI_{SSH} 为基于各环境因子预测的 SI; n 为环境因子个数。综合栖息地适宜性指数介于 0~1, 认定 $HSI \leq 0.2$ 和 $HSI \geq 0.6$ 的海域分别为鳶乌贼不利栖息地和适宜栖息地^[15]。利用 2014—2017 年的渔业数据和环境数据构建 HSI 模型, 模型构建后加入 2017 年渔业数据对 HSI 预测模型进行测试和交叉验证, 统计每个 HSI 区间内鳶乌贼的作业次数比例。

3) 利用上述构建的 HSI 模型计算 2014—2017 年春季鳶乌贼渔场内的 HSI, 并将各年值进行平均, 绘制气候态 HSI 分布图, 重点标出适宜栖息地的空间分布, 探索春季鳶乌贼的适宜栖息地空间分布特征。此外, 绘制基于 SST、Chl-*a* 和 SSH 的适宜 SI 的空间分布, 观测 3 个环境因子对应适宜 SI 区域的重叠范围, 探索各环境因子分布规律对鳶乌贼适宜栖息地空间分布的影响。

4) 计算 2014—2017 年春季各年 HSI 距平值并绘制空间分布图, 分析各年鳶乌贼栖息地适宜性在空间上的变化情况。同时计算各年各环境因子的适宜和不利范围占渔场的比例, 以及估算各年鳶乌贼适宜栖息地和不利栖息地比例, 对比并分析鳶乌贼栖息地的年际变化及其成因。

5) 计算 2014—2017 年春季各年鳶乌贼适宜栖息地在经、纬度上的分布频次, 对比各年栖息地分布的变化差异。此外, 绘制 2014—2017 年春季鳶乌贼最适宜温度和 $HSI=0.8$ 的等值线, 对比分析鳶乌贼适宜栖息地的空间分布差异及其成因。

2 结果

2.1 鳶乌贼渔场各环境因子的空间变化

2014—2017 年春季南海鳶乌贼渔场 SST、Chl-*a* 和 SSH 的季节性分布见图 1。春季南海鳶乌贼渔场内 SST 具有北部海域偏低、南部海域偏高的特征, 特别是在 12°N 以北越南沿岸海域水温低于 25 °C, 10°N 以南海域水温普遍在 28 °C 以上。Chl-*a* 则呈现沿岸高、远海低的分布特征。SSH 与 SST 呈现相同的分布趋势, 具有北低南高的规律, SSH 在 14°N 以北海域低于 45 cm, 而在 14°N

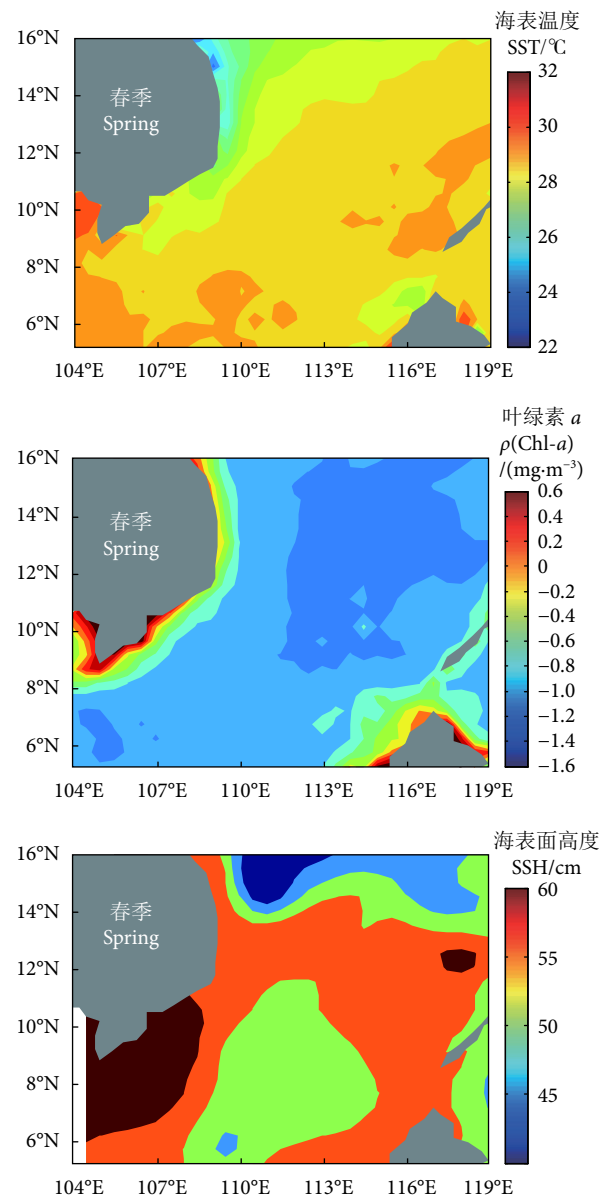


图1 2014—2017年春季南海鳶乌贼渔场海表面温度、叶绿素*a*和海面高度的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of SST, Chl-*a* and SSH on fishing ground of *S. oualaniensis* in South China Sea in spring of 2014–2017

以南海域普遍高于 50 cm。

2.2 鳶乌贼栖息地模型结果

利用正态和偏正态函数拟合基于作业次数和各环境因子统计关系的春季 SI 曲线 (图 2)。结果显示, 各环境因子的 SI 模型其参数变量均通过显著性检验 ($P < 0.001$), 估算和拟合的 SI 匹配性较高。以 0.1 为间隔计算每个 HSI 区间内鳶乌贼的作业次数比例对模型进行验证, 结果发现随着 HSI 间隔的增大, 作业次数比例随之增加。作业次数在不适宜的 HSI 间隔内 (0~0.1 和 0.1~0.2) 所占比例相对较少, 在适宜的 HSI 间隔内 ($HSI > 0.6$) 所占比例

相对较高,而作业次数比例在 0.8~0.9 和 0.9~1.0 间隔内相对减少(图 3)。表明本文构建的 HSI 模型预测性能较好。

2.3 春季鸢乌贼适宜栖息地的分布

绘制 2014—2017 年春季鸢乌贼适宜栖息地的气候态分布(图 4),发现鸢乌贼适宜栖息地主要分布在 110°E—119°E,分布主要集中在 2 个区域,分别为 108°E—116°E、5°N—13°N 和 113°E—119°E、13°N—16°N。此外,鸢乌贼不同环境因子的适宜范围具有不同的分布区域,而适宜栖息地的空间位置与 3 个环境因子适宜范围的重叠位置重合,说明其栖息地分布与 3 个环境因子的空间分布显著

相关。

2.4 鸢乌贼春季栖息地时空分布的年际变化

根据 2014—2017 年各年春季 HSI 距平值的空间分布(图 5),可以看出 2014 年鸢乌贼渔场范围内 HSI 大部分呈增加趋势,且在北部 12°N—16°N 呈现显著增加趋势(距平值>0.2),而分布在东南海域的 HSI 略微降低。2015 年渔场内 HSI 在北部降低较为明显(距平值<-0.1),西南部 HSI 可见明显增加。2016 年西南部海域 HSI 降低,北部海域 HSI 略微降低,东南部以及越南沿岸部分海域 HSI 可见增加,但增加幅度不高。2017 年鸢乌贼渔场内 HSI 降幅较为明显(距平值<-0.1),只有东部部分

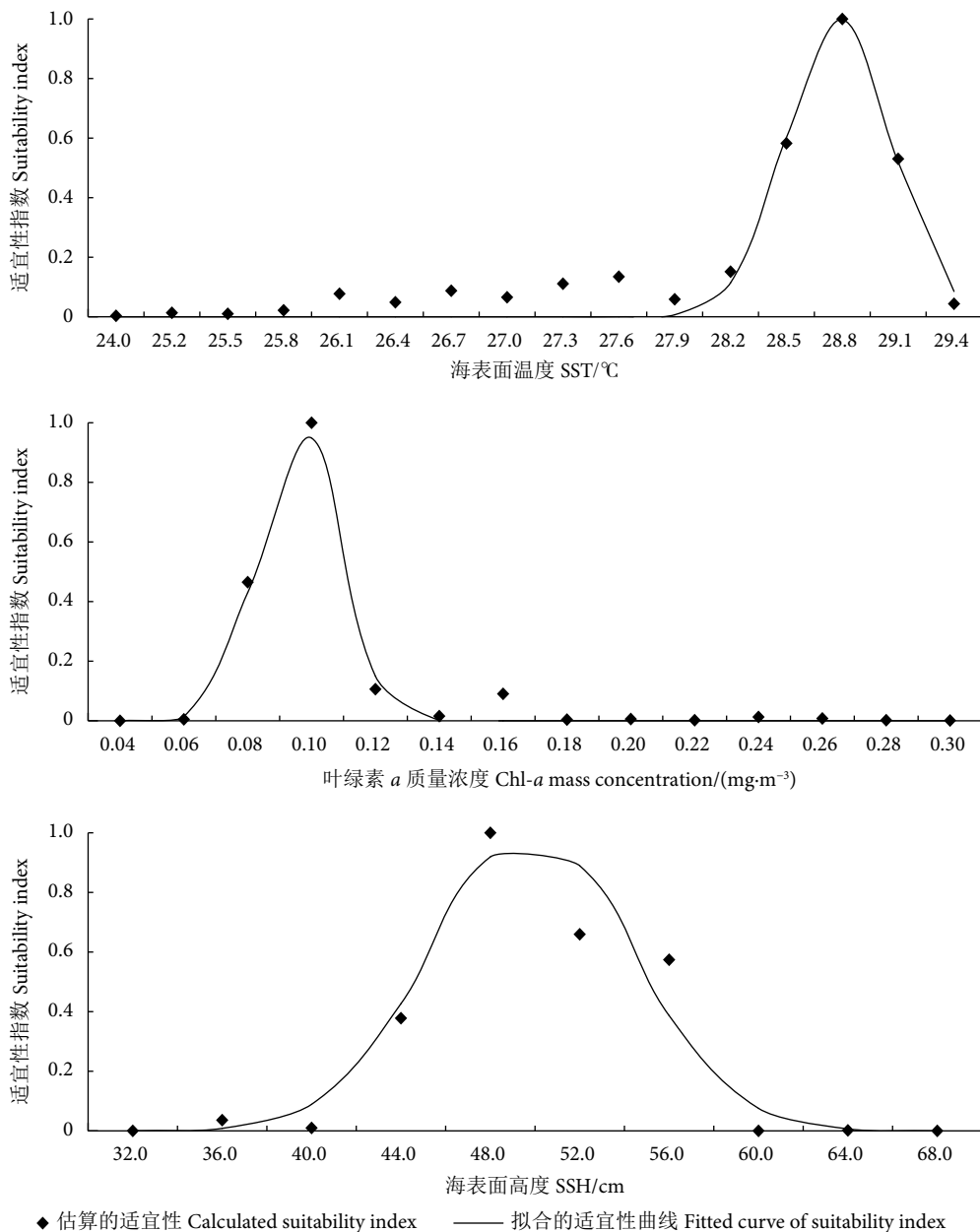


图2 基于海表面温度、叶绿素 a 和海面高度拟合的适宜性指数曲线

Fig. 2 Fitted suitability index curves based on SST, Chl- a and SSH

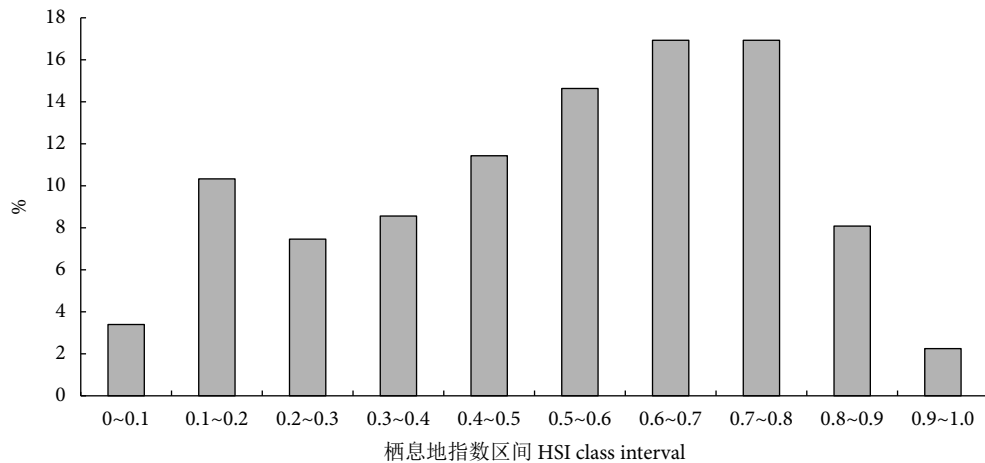
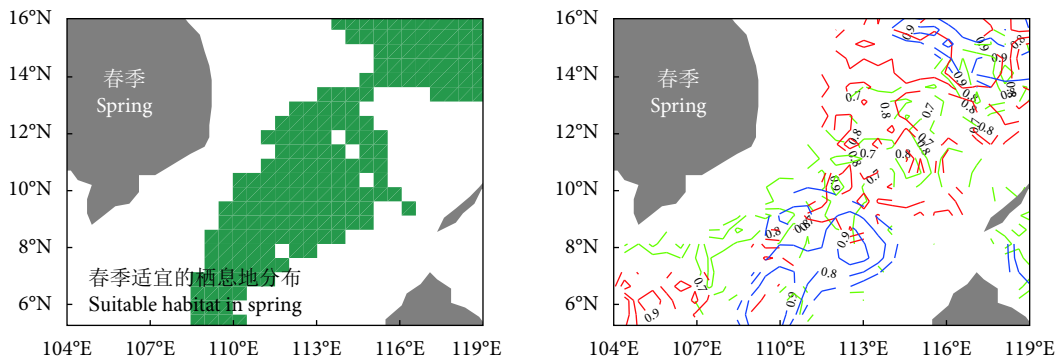


图3 不同栖息地指数区间内南海鳶乌贼作业频次所占比例

Fig. 3 Percentage of fishing occurrence for different class interval of HSI of *S. oualaniensis* in South China Sea

右图中圆圈表示基于 3 个环境因子的适宜性重叠范围。

The circles in the right panel indicate the overlapped areas for the SI values of the three environmental factors.

图4 2014—2017年春季南海鳶乌贼适宜栖息地分布(左)以及基于海表面温度(绿线)、叶绿素 a (红线)和海面高度(蓝线)的适宜性空间分布(右)

Fig. 4 Suitable habitat distribution of *S. oualaniensis* in South China Sea in spring of 2014–2017 (left) and spatial distribution of suitability based on SST (green line), Chl- a (red line) and SSH (blue line) (right)

海域 HSI 略微增加。对比 HSI 距平值的空间分布, HSI 具有逐年下降趋势, 且在空间上具有显著年际差异。

对比各年适宜环境范围和不利环境范围大小(图 6), 可以发现各年适宜环境范围呈现下降趋势, 而不利环境范围逐年增加, 适宜和不利的 SST 和 Chl- a 变化趋势更为明显。与适宜环境范围变化相对应, 鳶乌贼适宜栖息地呈逐年下降趋势, 2014 年适宜栖息地面积最高, 2015 和 2016 年次之, 2017 年最少; 同时, 较差栖息地面积分别呈现显著增加趋势。

图 7 和图 8 为 2014—2017 年各年鳶乌贼适宜栖息地 ($HSI > 0.6$) 在经度和纬度上的空间分布, 可以看出适宜栖息地空间分布具有显著的年际差异。2014 年鳶乌贼适宜栖息地主要分布在 109°E — 117°E

内, 2015 年栖息地在 109°E 以东海域分布较为平均, 而 2016 和 2017 年适宜栖息地在经度上明显向东移动, 在 109°E 以西海域内基本很少有分布。2014 年鳶乌贼适宜栖息地在纬度上分布较为均匀且广泛, 2015 年南部海域栖息地分布相对多, 但北部海域同样分布了部分适宜的栖息地。2016 和 2017 年具有向南移动的趋势, 适宜栖息地在南部海域分布较为广泛。绘制 2014—2017 各年鳶乌贼最适宜的水温等值线, 可以发现最适宜的水温等值线位置呈现显著的年际差异, 在西北-东南方向振荡且逐年相对移动, 而 $HSI=0.8$ 的等值线同样明显向东北移动(图 9)。

3 讨论

利用 HSI 模型预测大洋性鱼类的栖息地是近

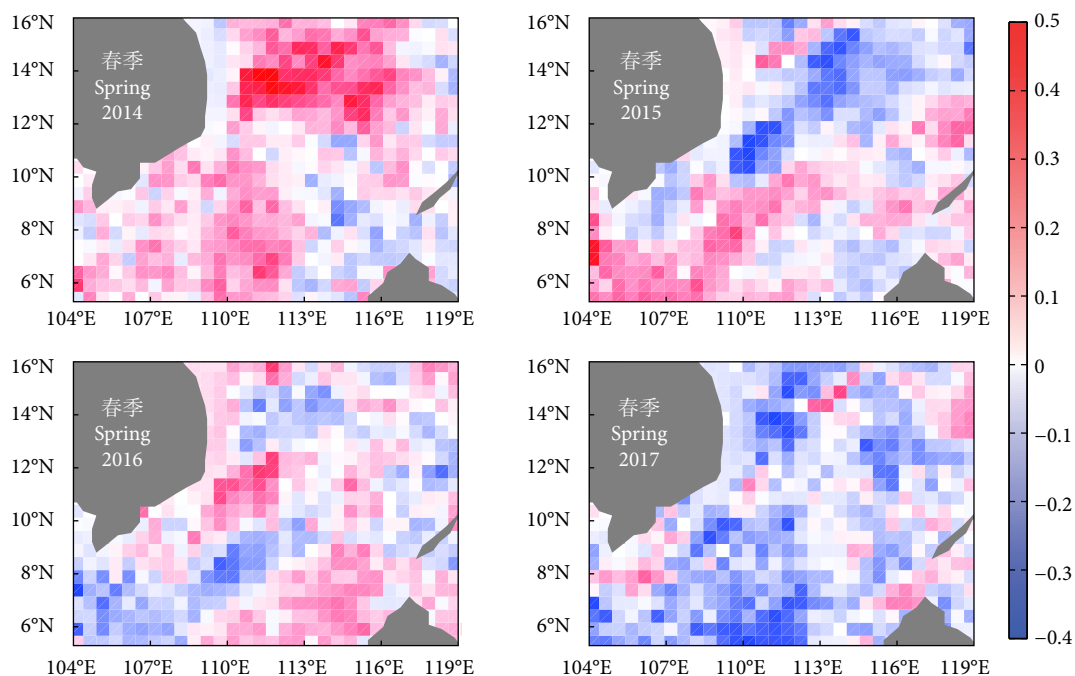


图5 2014—2017年各年春季南海鳶乌贼栖息地指数距平值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of anomaly of HSI of *S. oualeniensis* in South China Sea in spring of 2014–2017

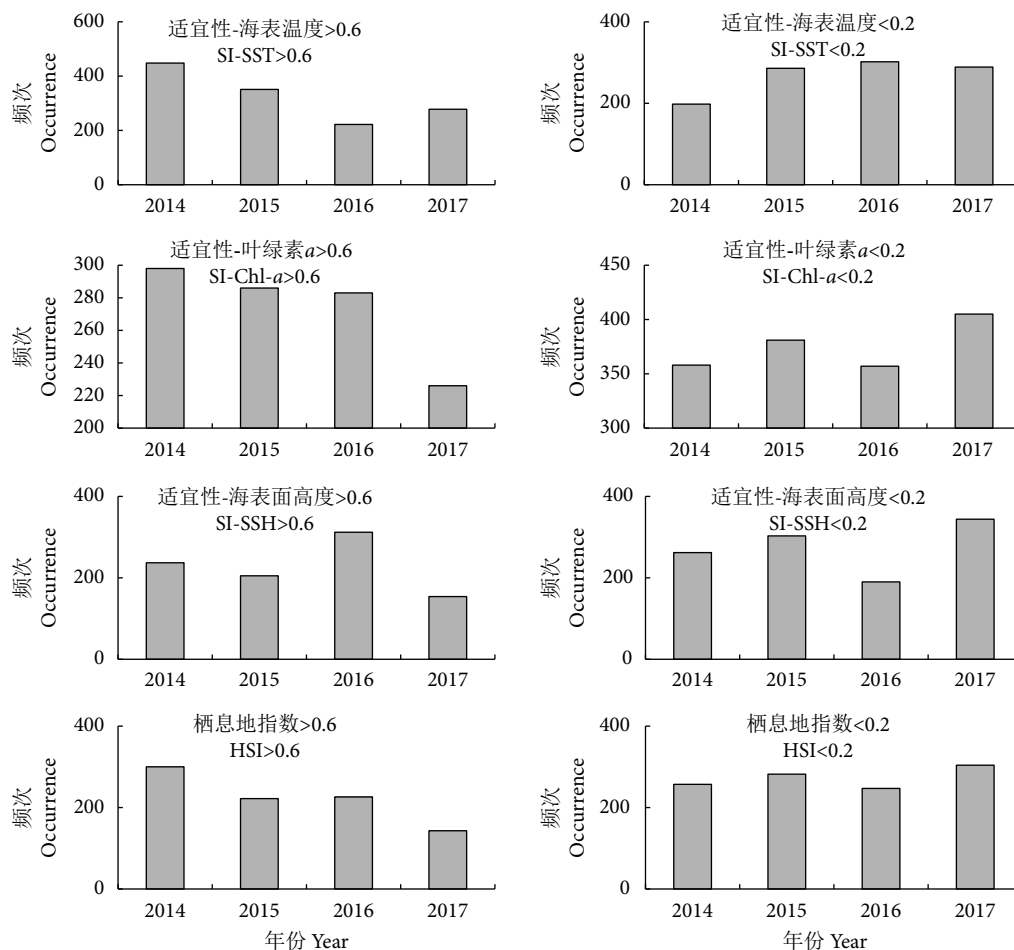


图6 2014—2017年各年春季南海鳶乌贼渔场内基于海表面温度、叶绿素 a 和海面高度的适宜和不适宜范围以及适宜栖息地和不适宜栖息地范围

Fig. 6 Range of suitable (SI>0.6) and unfavorable (SI<0.2) of SI based on SST, Chl- a and SSH and suitable (HSI>0.6) and unfavorable (HSI<0.2) habitats of *S. oualeniensis* in South China Sea in spring of 2014–2017

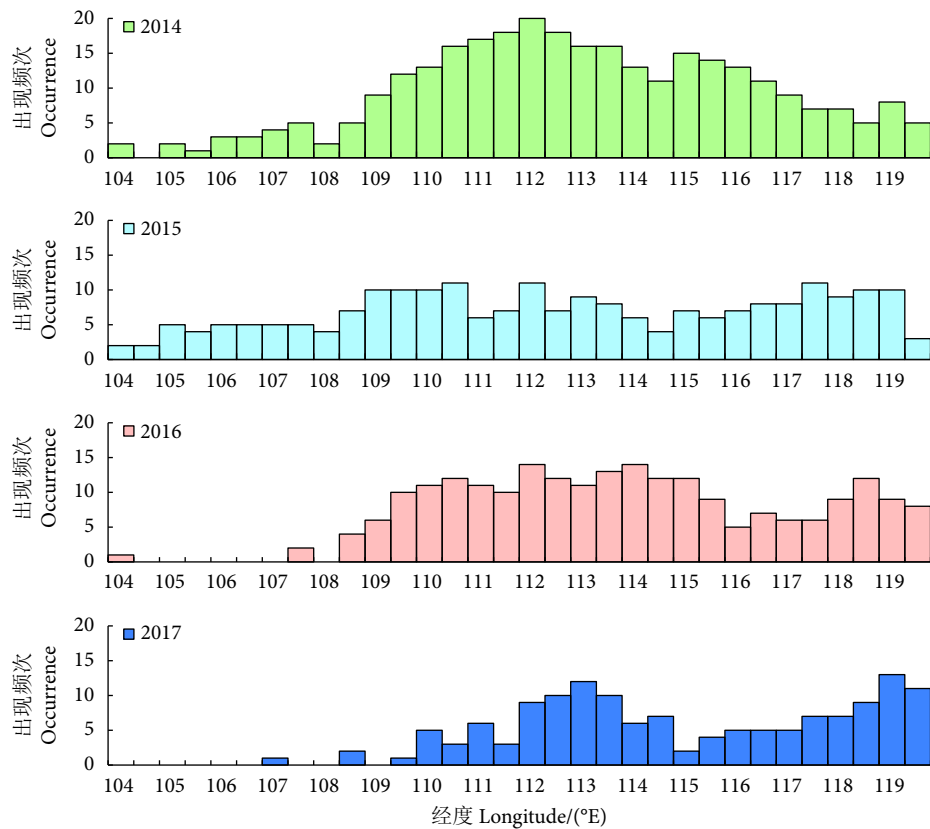


图7 2014—2017年各年春季南海鸛乌贼渔场内适宜栖息地在经度上的分布频次

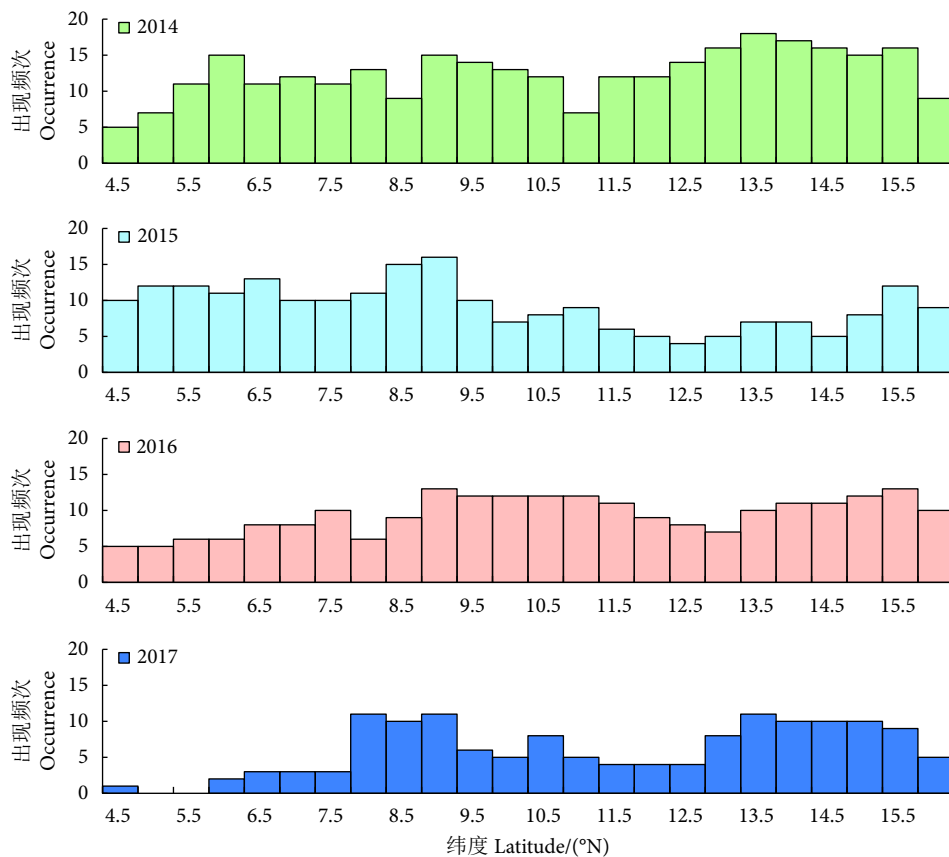
Fig. 7 Occurrence of suitable habitats of *S. oualaniensis* in South China Sea in spring of 2014–2017 in longitude

图8 2014—2017年各年春季南海鸛乌贼渔场内适宜栖息地在纬度上的分布频次

Fig. 8 Occurrence of suitable habitats of *S. oualaniensis* in South China Sea in spring of 2014–2017 in latitude

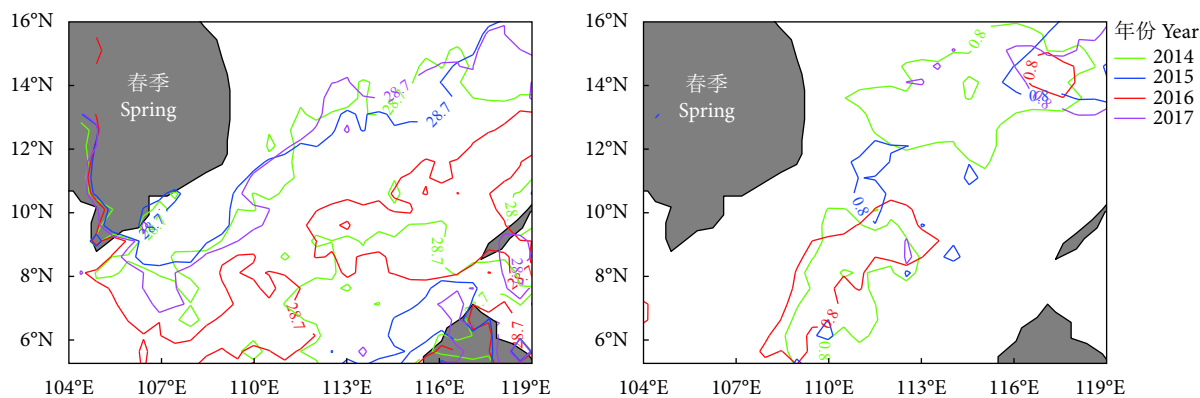


图9 2014—2017年春季各年南海鳾乌贼最适宜温度等值线分布(左)和栖息地指数=0.8的等值线分布(右)

Fig. 9 Spatial distribution of isoline of most suitable SST (left) and isoline of habitat suitability index equal to 0.8 (right) on fishing ground of *S. ovalaniensis* in South China Sea in spring of 2014–2017

年来渔业研究的热点,但由于HSI模型预测准确度受到模型输入参数的影响,其预测结果的准确性和可靠性需要慎重评估^[16]。一般来说,选用不同的HSI模型结构计算适宜性指数,其结果也会随着模型结构而发生变化^[17]。对于本文中构建的HSI模型,展开以下几点论述:1)本文HSI输入环境因子选用SST、Chl-*a*和SSH这3个环境因子,主要是基于前人研究结果显示上述因子对南海鳾乌贼的资源丰度和渔场的空间分布具有显著影响,这些因子是影响鳾乌贼栖息地时空分布的重要因素^[7-8],是模型输入的关键因素;2)本文研究鳾乌贼渔业与环境关系时,选用作业次数作为主要指标与各因子进行统计分析并拟合SI曲线。对于鱿钓渔业来说,以往学者做过类似的栖息地模型研究,特别是针对大洋性鱿鱼类包括西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)^[18]、东南太平洋茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)^[13]及阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)^[19]等,所有研究结果均指示基于单位捕捞努力量渔获量的HSI模型可能会低估鱿鱼类栖息地的适宜性,而基于作业次数的HSI模型则具备更好的预测效果^[20];3)计算综合HSI具有多类方法,例如几何平均法(Geometric mean model, GMM)、连续乘法(Continued product model, CPM)、最小/大值法(Minimum/maximum model, Minm/Mamm)等,但算术平均法相对于其他算法更具优势,因此被越来越多地应用到估算最终的HSI^[12],本文的模拟和验证结果同样显示,AMM模型结果具有较好的预测性,能用来模拟春季南海鳾乌贼的栖息地适宜性。

南海鳾乌贼栖息地空间分布模式具有显著时空变化,且与海洋环境显著相关。范江涛等^[21]利用

科考船走航数据以及SST、Chl-*a*、SSH和盐度4个环境因子构建了不同季节的栖息地模式,认为不同季节环境因子对鳾乌贼栖息地的变动贡献率不同,需要考虑季节变化因素。余景等^[22]指出西沙-中沙海域春季鳾乌贼的分布与SST和Chl-*a*相互关联,适宜的SST和Chl-*a*分别介于27~28.5℃和0.10~0.13 mg·m⁻³。谢恩阁等^[23]对南海外海鳾乌贼资源丰度进行标准化研究,结果显示3—5月鳾乌贼高丰度值出现时,3个环境因子范围为:SST介于26~30.5℃,Chl-*a*介于0.06~0.13 mg·m⁻³,SSH介于60~75 cm。本文基于拟合的SI曲线显示最适SST为28.7°,最适Chl-*a*为0.1 mg·m⁻³,最适SSH为53.6 cm,这与前人的研究结论基本一致,但在前人研究基础上得出了各环境因子更为准确的最适值。此外,春季是南海鳾乌贼的主要繁殖季节^[2],此季节海洋环境的变化对其资源补充量的影响较大,南海鳾乌贼的适宜栖息地主要分布在外海海域,且其空间位置与3个环境因子有利海域的重叠区域吻合,可以看出春季鳾乌贼的栖息地空间分布受到海洋环境的显著影响,是关键环境因子综合影响的结果,并不由单个环境因子决定。

此外,春季南海鳾乌贼栖息地的时空分布呈现出显著的年际变化。本研究显示2014—2017年春季南海鳾乌贼栖息地适宜性呈现逐年下降的特征,且各年适宜栖息地在经、纬度分布上有显著差异。究其原因,是由于适宜的环境范围逐年下降,导致适宜的栖息地面积减小,而不利的栖息地面积增加,在空间分布上出现了明显的变动差异。2014—2017年春季栖息地适应性指数的距平值呈逐年下降的趋势,特别是2017年大部分区域均小于-0.1,从不同年份各因子的适宜范围与区域来看,SST

和 Chl-*a* 的变动趋势比 SSH 的变动更为明显, 对栖息地适应性的解释度较高, 这也与南海独特的海洋理化环境有关^[21-22]。头足类对环境具有敏感性, 一般栖息于适宜的环境中。而环境不适宜生存或生长时, 其种群会随着环境的变化迁移到适宜的环境中^[24]。因此, 可以从适宜的环境范围时空变动来探测其有利的栖息地变化规律。前人研究均发现, 大洋性头足类栖息地的季节和年际变动与不同环境因子的适宜范围有极大的相关性, 最终决定了其栖息地的空间位置分布^[13,25]。2014 和 2017 年春季均为正常气候年份, 但这两年春季鳶乌贼的栖息地空间位置出现了显著差异, 这可能与局部海洋环境变化有关。而 2015 和 2016 年春季南海鳶乌贼栖息地适宜性下降, 且有利的栖息地面积缩减, 不利的栖息地面积增加, 这可能与这两年发生了厄尔尼诺事件有关, 有研究指出厄尔尼诺等异常气候事件发生时不利于南海海域鳶乌贼的生存^[26], 未来研究需要对这 4 个年份的环境差异做进一步深入分析, 结合气候变化规律综合得出栖息地年际差异的成因。

参考文献:

- [1] 龚玉艳, 詹凤娉, 杨玉滔, 等. 南海鳶乌贼摄食习性的初步研究 [J]. 南方水产科学, 2016, 12(4): 80-87.
- [2] 范江涛, 冯雪, 邱永松, 等. 南海鳶乌贼生物学研究进展 [J]. 广东农业科学, 2013, 40(23): 122-128.
- [3] 张鹏, 杨齐, 张旭丰, 等. 南海金枪鱼和鳶乌贼资源开发现状及前景 [J]. 南方水产, 2010, 6(1): 68-74.
- [4] 刘玉, 王雪辉, 杜飞雁, 等. 基于耳石微结构的南海鳶乌贼日龄和生长研究 [J]. 热带海洋学报, 2019, 38(6): 62-73.
- [5] 刘必林, 陈新军, 钟俊生. 采用耳石研究印度洋西北海域鳶乌贼的年龄、生长和种群结构 [J]. 大连水产学院学报, 2009, 24(3): 206-212.
- [6] 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.
- [7] 晏磊, 张鹏, 杨炳忠, 等. 南海鳶乌贼产量与表温及水温垂直结构的关系 [J]. 中国水产科学, 2016, 23(2): 469-477.
- [8] ZHOU W F, XU H Y, LI A Z, et al. Comparison of habitat suitability index models for purpleback flying squid (*Sthenoteuthis oualaniensis*) in the open South China Sea[J]. Appl Ecol Environ Res, 2019, 17(2): 4903-4913.
- [9] 陆化杰, 童玉和, 刘维, 等. 厄尔尼诺年春季中国南海中沙群岛海域鳶乌贼的渔业生物学特性 [J]. 水产学报, 2018, 42(6): 912-921.
- [10] YI Y, CHENG X, YANG Z, et al. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: a review of aquatic habitat suitability models[J]. Renew Sust Energ Rev, 2017, 68(1): 748-762.
- [11] HIRZEL A H, LAY G L, HELFER V, et al. Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences[J]. Ecol Model, 2006, 199(2): 142-152.
- [12] 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 [J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(2): 260-269.
- [13] YU W, CHEN X J, ZHANG Y. Seasonal habitat patterns of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peruvian waters[J]. J Mar Syst, 2019, 194(6): 41-51.
- [14] 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.
- [15] LI G, CAO J, ZOU X R, et al. Modeling habitat suitability index for Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the South East Pacific[J]. Fish Res, 2016, 178(6): 47-60.
- [16] XUE Y, GUAN L, TANAKA K. et al et al. Evaluating effects of rescaling and weighting data on habitat suitability modeling[J]. Fish Res, 2017, 188(4): 84-94.
- [17] LI G, CHEN X J, LEI L, et al. Distribution of hotspots of chub mackerel based on remote-sensing data in coastal waters of China[J]. Int J Remote Sens, 2014, 35(11/12): 4399-4421.
- [18] 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]. Fish Bull, 2010, 108(1): 1-15.
- [19] 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.
- [20] 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]. Fish Res, 2009, 95(2/3): 181-188.
- [21] 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鳶乌贼渔场分析 [J]. 南方水产科学, 2016, 12(4): 57-63.
- [22] 余景, 胡启伟, 李纯厚, 等. 西沙-中沙海域春季鳶乌贼资源与海洋环境的关系 [J]. 海洋学报, 2017, 39(6): 62-73.
- [23] 谢恩阁, 周艳波, 冯菲, 等. 中国南海外海鳶乌贼灯光罩网渔业 CPUE 标准化研究 [J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 1-14.
- [24] ANDERSON C, RODHOUSE P G. Lifecycle, oceanography and variability: ommastrephid squid in the variable oceanography environments[J]. Fish Res, 2001, 54(1): 133-143.
- [25] YU W, WEN J, ZHONG Z, et al. Spatio-temporal variations in the potential habitat of a pelagic commercial squid[J]. J Mar Syst, 2020, 206: 103339.
- [26] YU J, HU Q W, TANG D L, et al. Response of *Sthenoteuthis oualaniensis* to marine environmental changes in the north-central South China Sea based on satellite and *in situ* observations[J]. PLoS One, 2019, 14(1): e0211474.