

文章编号: 1674-5566(2020)01-0092-10

DOI:10.12024/jso.20190102518

## 应用栖息地适宜性指数研究温台渔场小黄鱼的空间分布特征

刘梦影<sup>1,2</sup>, 吕泽华<sup>1,3</sup>, 田思泉<sup>1,2,3</sup>, 高春霞<sup>1,2,3</sup>, 戴黎斌<sup>1,2</sup>, 叶深<sup>4,5</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江温州 325005; 5. 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 浙江温州 325005)

**摘要:** 根据 2015—2016 年春、夏、秋、冬 4 个季节在温台渔场开展的渔业资源与栖息环境综合调查采集的生产数据, 采用正态分布函数分别构建海水底层温度(sea bottom temperature, SBT)、海水底层盐度(sea bottom salinity, SBS)和水深(depth)与相对资源密度的适宜性指数(suitability index, SI), 利用最小二乘法进行参数求解, 利用提升回归树(boosted regression tree, BRT)模型确定各环境因子的权重, 采用基于不同权重的算术平均法(arithmetic weighted model, AWM)建立栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型, 并通过交叉验证检验模型精度。研究发现: 各环境因子与 SI 间均呈现明显的正态关系; 小黄鱼的最适栖息地存在明显的季节性变化, 全年 HSI 高值区出现在春季和夏季, 其次为秋季和冬季, 春季高值区位于 122°30'E 以东, 28°30'N 以北海域, 夏季高值区呈带状南下, 秋季高值区位于 122°00'E, 28°00'N 附近海域, 冬季高值区北上, 位于 123°00'E, 29°00'N 附近海域。研究结果表明: 在 HSI 模型中考虑权重后, 该模型能够较好地反映温台渔场小黄鱼栖息地的分布和变化情况。

**关键词:** 小黄鱼; 栖息地适宜性指数; 温台渔场; 空间分布

**中图分类号:** S 932 **文献标志码:** A

小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)属于暖温性底层鱼类, 东北亚特有种, 广泛分布于中国渤海、黄海和东海以及朝鲜半岛西岸海域, 主要集中在 28°00'N 以北、125°30'E 以西海域, 是我国重要的海洋渔业经济种类之一<sup>[1]</sup>。在 20 世纪 60 年代, 小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、带鱼(*Trichiurus lepturus*)和曼氏无针乌贼(*Sepiella maindroni*)并称为我国的四大海产, 是中国、日本和韩国的主要捕捞对象之一。由于小黄鱼具有较高的经济价值, 且在生态系统中占有重要地位, 国内外学者对其开展了许多研究, 研究领域主要涉及基础生物学<sup>[2-7]</sup>、洄游分布<sup>[8]</sup>、资源量估算和种群动态<sup>[9-13]</sup>等诸多方面, 为深入开展小黄鱼的相关研究奠定了坚实的基础。

栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型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, 被用于描述野生动物的栖息地质量, 是描述动物资源空间分布与环境因子之间关系的重要工具, 被广泛应用于物种的管理<sup>[14]</sup>和生态恢复研究<sup>[15]</sup>及渔场分析<sup>[16-19]</sup>, 并取得较好的效果。在已有的利用栖息地适宜性指数对小黄鱼渔场的研究中, 在对栖息地适宜性指数建模时多采用算术平均法(arithmetic mean model, AMM)和几何平均法(geometric mean model, GMM)<sup>[20]</sup>, 均没有考虑到不同海洋环境因子对渔场形成与分布的影响的强弱差异。因此, 本研究结合栖息地指数, 以海水底层温度、海水底层盐度和深度为海洋环境因子, 尝试建立基于不同权重的小黄鱼栖息地适宜性指数模型。

提升回归树(boosted regression tree, BRT)是一种基于决策树的集成学习方法<sup>[21]</sup>, 在渔业研究中已有广泛应用, 如单位捕捞努力渔获量的标准

收稿日期: 2019-01-18 修回日期: 2019-02-19

基金项目: 浙江省渔业资源调查(温台地区)(158053); 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室开放基金(201704)

作者简介: 刘梦影(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为鱼类栖息地适宜性。E-mail: lmy\_spongebob@163.com

通信作者: 田思泉, E-mail: sqtian@shou.edu.cn

化、鱼类空间分布、鱼类丰度、多样性预测<sup>[22-23]</sup>、鱼类栖息地研究<sup>[24-25]</sup>和渔情预报<sup>[26]</sup>等。与传统的多元回归方法相比,BRT能够自动拟合自变量间的相互作用,不受数据缺失及异常值的影响<sup>[22]</sup>,能够解释生物与环境因子之间的相互关系<sup>[27]</sup>。每一个环境变量的相对重要性可以通过其对BRT模型的总方差贡献率来确定<sup>[28]</sup>。以往HSI模型中多个环境变量的权重大小主要根据历史经验来人为设定<sup>[29]</sup>,或默认各环境因子的权重相等<sup>[20]</sup>,这不能很好地反映出各个环境变量贡献率的差异。因此,本研究采用BRT的方法来确定每个环境因子的权重。

温台渔场位于东海中部近海水域,受浙江沿岸水、黑潮次表层水和台湾暖流等海流水团的共同影响,浮游生物饵料丰富,是众多海洋游泳生物的产卵场和索饵场,也是多种捕捞网具作业的良好渔场<sup>[30]</sup>。近年来,由于受到过度捕捞、气候变化和环境污染等诸多因素的影响,温台渔场的生物资源和生态环境面临严重危机,小黄鱼等重要经济渔业资源呈现明显衰退的趋势<sup>[31-32]</sup>。海洋生物栖息地适宜性研究是渔业资源领域里一项重要的研究内容,对于渔业资源评估、种群动态的研究及渔业生产等都具有重要的理论和现实意义。然而,目前有关温台渔场小黄鱼栖息地适宜性的研究尚未见报道,亟待开展相关研究。根据2015—2016年春、夏、秋、冬4个季节在温台渔场开展的4个航次的渔业资源与栖息环境综合调查数据,结合海水底层温度、海水底层盐度和水深等环境因子,应用HSI模型对温台渔场小黄鱼的栖息地适宜性进行评价,以期为今后温台渔场小黄鱼栖息地环境的研究提供基础数据,也为加强中国小黄鱼资源的保护和可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

小黄鱼资源量及环境因子数据源于2015—2016年4个季度的浙江南部近海底拖网资源调查,调查海域主要为浙江南部近岸海域,调查时间分别为2015年11月(秋季)、2016年2月(冬季)、2016年5月(春季)和2016年8月(夏季)每3个月出海调查采样1次,单个航次调查完成

周期为6~7 d。调查站点设计以平均网格化划分,经纬度以0.25°为间隔。此外,采用WTW-Multi 3430型水质分析仪对各站点水温、盐度、水深等底层环境数据进行采集。调查船为近海大型单船网板底拖网作业船,网具采用全长约为95 m左右、底纲和浮子纲长度80 m、网囊网目为2 cm的底拖网进行调查。受渔况等客观条件因素影响,4个航次的调查站点在数量和空间位置上有所差异,调查站点具体位置分布见图1。

### 1.2 数据处理

#### 1.2.1 相对资源指数

首先根据拖速、拖时对某一时间地点的相对资源密度值(relative abundance density, RAD)进行标准化,再用标准化后的RAD除以所有RAD值中最大的值计算出相对资源密度指数(relative abundance index, RAI)。RAI通常可以看作反映栖息地质量的指标<sup>[33]</sup>。

#### 1.2.2 适宜性指数

将鱼类对栖息水域中各环境因子的反应用一个合适的适宜性指数(suitability index, SI)来表示。通常,假定相对资源密度值最大时为最适宜小黄鱼栖息的水域,SI为1,而相对资源密度被认为是最不适宜小黄鱼栖息的水域,SI为0。本文对各个季节分别建立各个环境因子的SI值,SI计算公式如下:

$$SI_i = SI_{i,RAI} = \frac{RAD_{ij}}{RAD_{i,max}} \quad (1)$$

式中:SI<sub>i</sub>为*i*月的适宜性指数;SI<sub>*i,RAI*</sub>为*i*月以相对资源密度为基础获得的适宜性指数;RAD<sub>*i,max*</sub>为*i*月的最大相对资源密度,g/h;RAD<sub>*ij*</sub>为*i*月*j*站点的相对资源密度,g/h。

利用正态分布函数分别建立SI与各环境因子之间的关系模型。利用最小二乘法进行求解,将各环境因子和SI的两离散变量关系转化为连续随机变量之间的关系。利用“社会科学统计软件包”(solutions statistical package for the social sciences, SPSS)进行皮尔森相关性检验,计算出*P*,*P*为对SI拟合值和实际值进行相关性分析的结果,根据历史研究<sup>[34-35]</sup>结果,本研究选用对小黄鱼空间分布有显著影响的3个环境因子,即海水底层温度、海水底层盐度和水深进行建模。

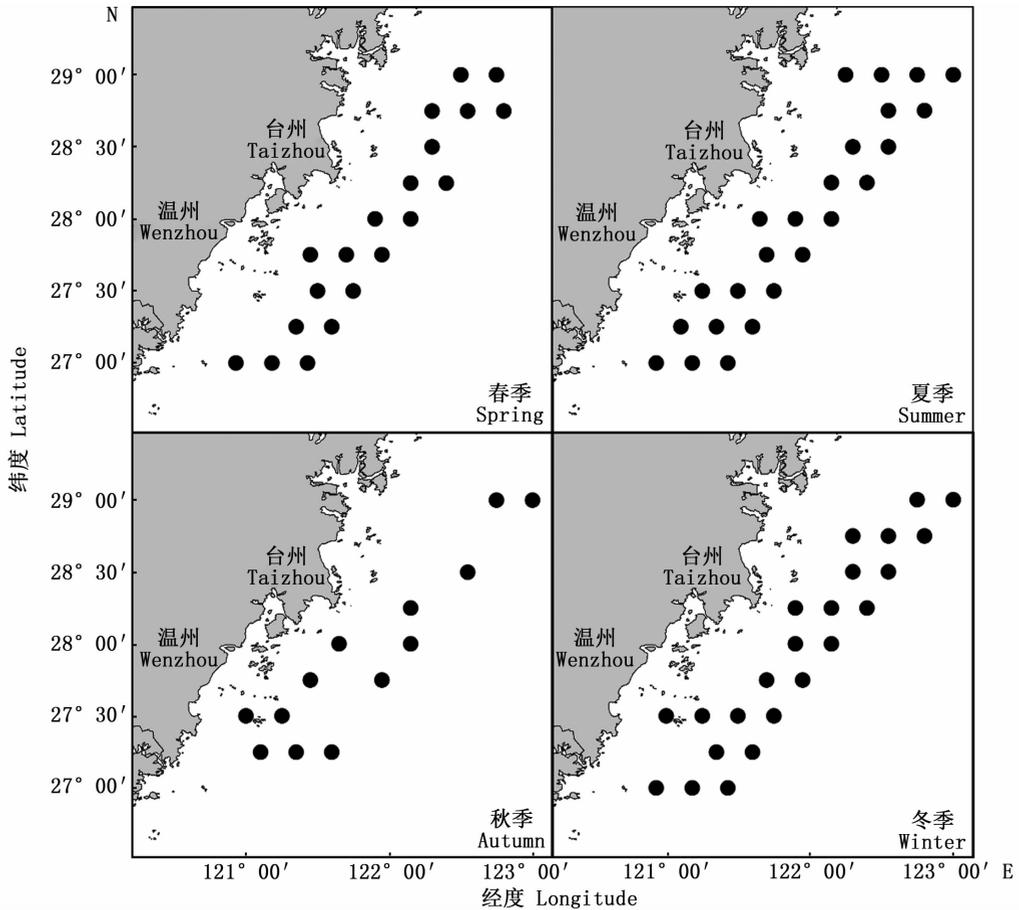


图1 2015—2016年4个季度温台渔场调查站位图

Fig.1 Four quarters of the survey area at Wen-Tai fishing ground in 2015 - 2016

### 1.2.3 HSI 建模

利用算术加权法 (arithmetic weighted model, AWM) 建立栖息地指数模型, 计算公式如下:

$$HSI = aSI_{SBT} + bSI_{SBS} + cSI_{Dep} \quad (2)$$

式中:  $a, b, c$  分别为 BRT 赋予海水底层温度、海水底层盐度和水深的权重;  $SI_{SBT}$ 、 $SI_{SBS}$ 、 $SI_{Dep}$  分别为 SI 与 SBT、SBS、Dep 的适宜性指数。

### 1.2.4 绘制 HSI 空间分布图

通过插值法在绘图软件 (ArcGIS) 中绘制 HSI 的空间分布图。

### 1.2.5 模型选择与验证

采用交叉验证的方法评估 HSI 模型的预测性能。随机选取 80% 的数据用于建模, 剩余 20% 的数据用于验证模型精度, 该步骤重复进行 100 次<sup>[36]</sup>。利用平均相对误差 (Average relative error, ARE)、均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 指数来评估模型精度。其中, ARE 用来反映预测值误差的实际情况, 而 RMSE 则能

更好的衡量模型观测值与真实值之间的偏差, 计算公式如下:

$$ARE = \frac{\sum_{i=1}^n (HSI_i - RAI_i)}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (HSI_i - RAI_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: HSI 表示通过模型计算得出的 HSI, 即预测值; RAI 表示相对资源密度指数, 在这里可以视作实际计算的 HSI, 即观测值。

一般而言, 两者的值越接近零, 代表模型越稳健, 性能越好。

## 2 结果

### 2.1 环境因子的适应性指数曲线

春季, 温台渔场小黄鱼主要分布在底层水温为 19.0 ~ 22.0 °C 的海域, 其中以 19.4 ~ 20.1 °C 海域出现最多, 其对应相对资源密度范围为

2.42 ~ 106.40 g/h, 占春季总相对资源密度的 99.1% (图 2a); 主要分布水域的底层盐度范围是 29.0 ~ 36.0, 其中以盐度为 34.5 ~ 34.8 的水域出现最多, 其对应相对资源密度范围为 1.02 ~ 106.40 g/h, 占春季总相对资源密度的 94.9% (图 2b); 主要分布水深范围是 18.0 ~ 67.0 m, 其中以水深在 42.0 ~ 48.0 m 的海域出现最多, 其对应的相对资源密度范围为 2.42 ~ 106.40 g/h, 占春季总相对资源密度的 62.3% (图 2c)。

夏季, 小黄鱼主要分布在底层水温为 17.0 ~ 26.0 °C 的海域, 其中以 17.6 ~ 21.2 °C 海域出现最多, 其对应的相对资源密度范围为 30.40 ~ 1 838.31 g/h, 占夏季总相对资源密度的 93.8% (图 2d); 主要分布水域的底层盐度范围是 32.0 ~ 35.0, 其中以盐度为 34.8 ~ 34.9 的水域出现最多, 其对应相对资源密度范围为 12.02 ~ 1 838.31 g/h, 占夏季总相对资源密度的 75.0% (图 2e); 主要分布水深范围是 19.0 ~ 65.0 m, 其中以水深在 45.0 ~ 56.0 m 的海域出现最多, 其对应的相对资源密度范围为 235.07 ~ 1 838.31 g/h, 占夏季总相对资源密度的 67.3% (图 2f)。

秋季, 小黄鱼主要分布在底层水温为 15.0 ~ 22.0 °C 的海域, 其中以 21.0 ~ 22.2 °C 海域出现最多, 其对应的相对资源密度范围为 1.69 ~ 109.85 g/h, 占秋季总相对资源密度的 94.2% (图 2g); 主要分布水域的底层盐度范围是 27.0 ~ 35.0, 其中以盐度为 34.3 ~ 34.8 的水域出现最多, 其对应相对资源密度范围为 1.69 ~ 109.85 g/h, 占秋季总相对资源密度的 91.7% (图 2h); 主要分布水深范围是 23.0 ~ 70.0 m, 其中以水深在 66.0 ~ 70.0 m 的海域出现最多, 其对应的相对资源密度范围为 16.19 ~ 109.85 g/h, 占秋季总相对资源密度的 68.2% (图 2i)。

冬季, 小黄鱼主要分布在底层水温为 9.0 ~ 19.0 °C 的海域, 其中以 15.6 ~ 16.3 °C 海域出现最多, 其对应的相对资源密度范围为 0.37 ~ 195.82 g/h, 占冬季总相对资源密度的 42.1% (图 2j); 主要分布水域的底层盐度范围是 28.0 ~ 35.0, 其中以盐度为 33.9 ~ 34.2 的水域出现最

多, 其对应相对资源密度范围为 11.83 ~ 195.82 g/h, 占冬季总相对资源密度的 81.0% (图 2k); 主要分布水深范围是 12.0 ~ 65.0 m, 其中以水深在 60.0 ~ 65.0 m 的海域出现最多, 其对应的相对资源密度范围为 5.26 ~ 195.82 g/h, 占冬季总相对资源密度的 89.5% (图 2l)。

利用正态分布函数分别进行 SI 与环境因子拟合 (图 2), 拟合 SI 模型见表 1, 模型拟合全部通过显著性分析 ( $P < 0.05$ )。

表 1 2015—2016 年 4 个季节温台渔场小黄鱼的适宜性指数模型

Tab. 1 Suitability index model of *Larimichthys polyactis* at Wen-Tai fishing ground during 2015 to 2016

| 季节<br>Season | 适宜性指数模型<br>Suitability index model                    | P     |
|--------------|---|-------|
| 春季<br>Spring | $SI_{SBT} = e^{[-23.8836 \times (SBT - 19.5372)^2]}$  | 0.001 |
|              | $SI_{SBS} = e^{[-27.0632 \times (SBS - 34.8063)^2]}$  | 0.034 |
|              | $SI_{Dep} = e^{[-0.1021 \times (Dep - 58.7382)^2]}$   | 0.001 |
| 夏季<br>Summer | $SI_{SBT} = e^{[-0.6953 \times (SBT - 20.540)^2]}$    | 0.001 |
|              | $SI_{SBS} = e^{[-12.2536 \times (SBS - 34.31)^2]}$    | 0.028 |
|              | $SI_{Dep} = e^{[-0.1190 \times (Dep - 5.5385)^2]}$    | 0.001 |
| 秋季<br>Autumn | $SI_{SBT} = e^{[-3.6060 \times (SBT - 21.7989)^2]}$   | 0.049 |
|              | $SI_{SBS} = e^{[-126.0889 \times (SBS - 34.8022)^2]}$ | 0.001 |
|              | $SI_{Dep} = e^{[-0.0290 \times (Dep - 55.8510)^2]}$   | 0.001 |
| 冬季<br>Winter | $SI_{SBT} = e^{[-27.307 \times (SBT - 16.3434)^2]}$   | 0.001 |
|              | $SI_{SBS} = e^{[-0.4470 \times (SBS - 35.7798)^2]}$   | 0.013 |
|              | $SI_{Dep} = e^{[-0.2575 \times (Dep - 62.6805)^2]}$   | 0.001 |

## 2.2 环境变量的权重

根据 BRT 模型对温台渔场小黄鱼不同季节栖息的底层水温、底层盐度和水深分别赋予权重 (表 2)。春季对小黄鱼总偏差贡献率最大的是底层水温, 贡献率为 83.61%, 其次是底层盐度 (14.63%) 和水深 (1.76%); 夏季对小黄鱼总偏差贡献率最大的是水深, 贡献率为 81.69%, 其次是底层水温 (15.33%) 和底层盐度 (2.98%); 秋季对小黄鱼总偏差贡献率最大的是底层水温, 贡献率为 59.09%, 其次是底层盐度 (37.86%) 和水深 (3.05%); 冬季对小黄鱼总偏差贡献率最大的是底层水温, 贡献率为 56.78%, 其次是底层盐度 (25.02%) 和水深 (18.20%)。

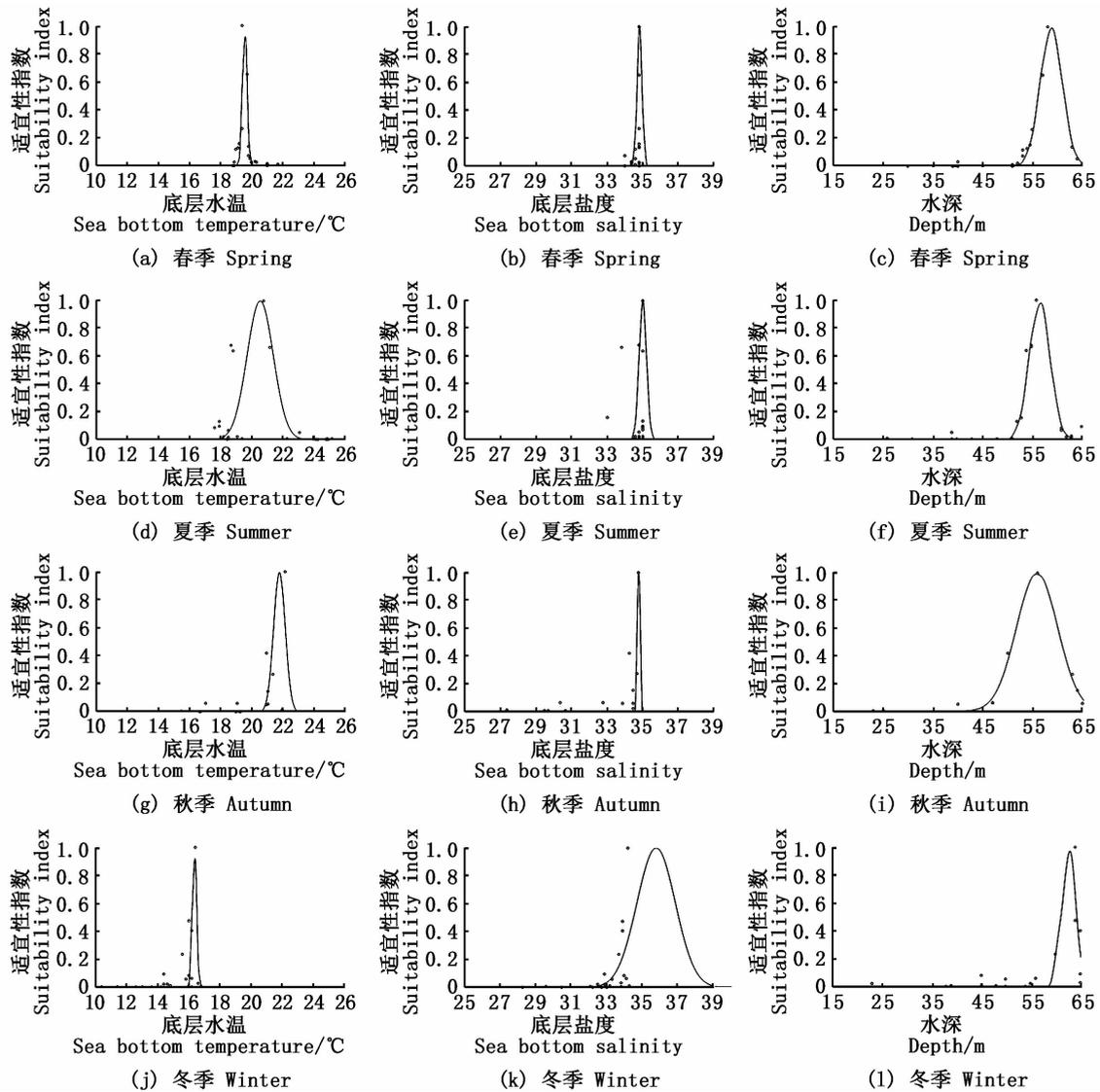


图 2 2015—2016 年 4 个季节温台渔场小黄鱼的栖息地适宜性指数曲线  
 Fig. 2 SI curves of *Larimichthys polyactis* at Wen-Tai fishing ground during 2015 – 2016

表 2 不同环境变量对温台渔场小黄鱼提升回归树模型总偏差的贡献率

Tab. 2 Relative influence (%) of different environmental variables to the total deviance explained by the boosted regression tree (BRT) models of *Larimichthys polyactis* in Wen-Tai fishing ground

| 季节<br>Season | 环境变量<br>Environmental variables | 贡献率<br>Weight/% |
|--------------|---------------------------------|-----------------|
| 春季<br>Spring | 底层水温                            | 83.61           |
|              | 底层盐度                            | 14.63           |
|              | 水深                              | 1.76            |
| 夏季<br>Summer | 底层水温                            | 15.33           |
|              | 底层盐度                            | 2.98            |
|              | 水深                              | 81.69           |
| 秋季<br>Autumn | 底层水温                            | 59.09           |
|              | 底层盐度                            | 37.86           |
|              | 水深                              | 3.05            |
| 冬季<br>Winter | 底层水温                            | 56.78           |
|              | 底层盐度                            | 25.02           |
|              | 水深                              | 18.20           |

### 2.3 HSI 空间分布

根据不同季节的环境数据,分别计算其各自的 HSI 值,绘制小黄鱼的 HSI 空间分布图(图 3)。分析发现:春季温台渔场小黄鱼适宜性较高的栖息地多集中在 122°30'E 以东,28°30'N 以北的海域;夏季温台渔场小黄鱼栖息地适宜性较高的点有整体南下的趋势;秋季,温台渔场小黄鱼栖息地适宜性整体相对较低,但是在温台渔场外部海域存在一个 HSI 高值区,其位置大致在 28°N, 122°E 附近海域,范围较小;冬季,HSI 高值区与秋季相比范围扩大,呈带状,其位置大致为 122°00'E ~ 122°30'E, 28°00'N ~ 28°30'N 范围内,HSI 值较秋季相比有所降低。

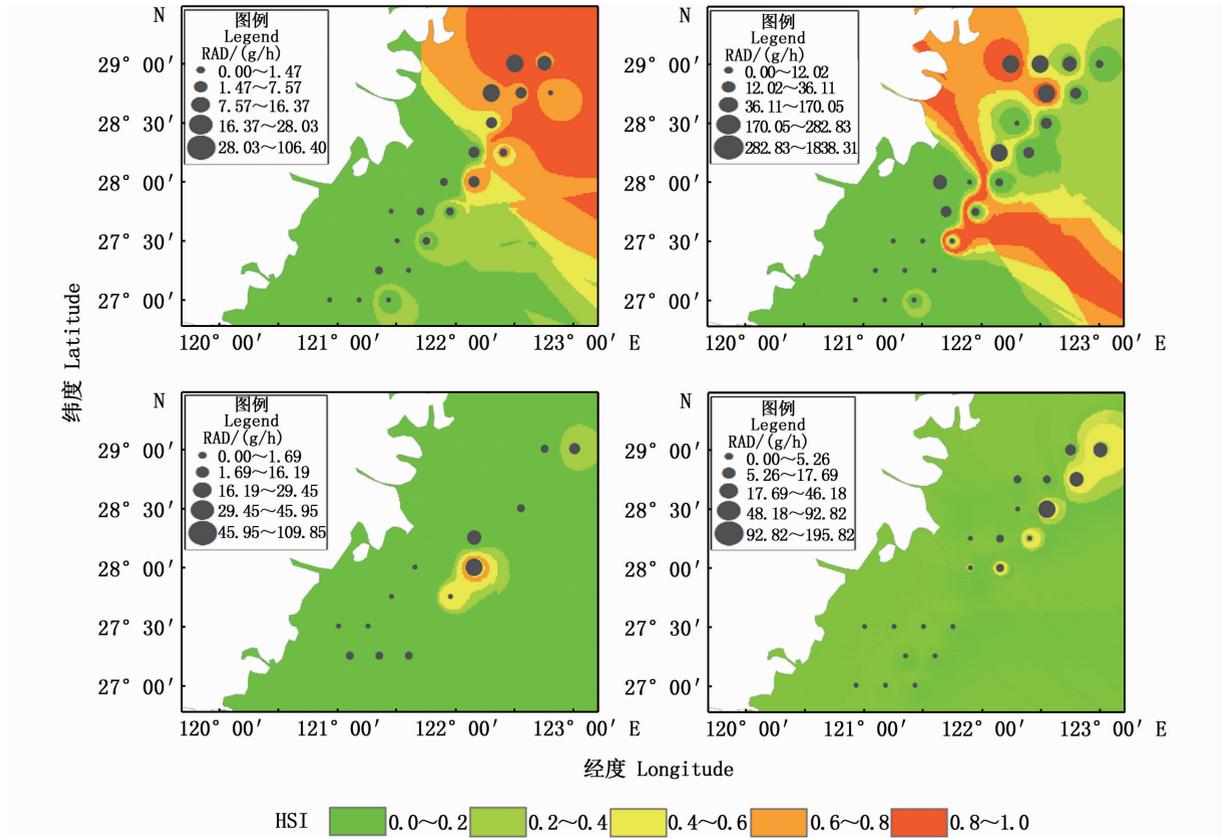


图 3 2015—2016 年 4 个季节温台渔场小黄鱼 HSI 值的空间分布

Fig. 3 Distribution of HSI of *Larimichthys polyactis* in Wen-Tai fishing ground during 2015 – 2016

### 2.4 HSI 模型验证

通过 R 语言计算结果均趋于 0, 表示该模型能够较好地拟合该区域小黄鱼 HSI 的分布, 见表 3。

表 3 不同季节的模型验证指数结果

Tab. 3 The exponential results verified by different seasonal models

| 季节 Season | ARE    | RMSE  |
|-----------|--------|-------|
| 春季 Spring | 0.012  | 0.06  |
| 夏季 Summer | 0.007  | 0.045 |
| 秋季 Autumn | -0.037 | 0.068 |
| 冬季 Winter | 0.019  | 0.082 |

## 3 讨论

### 3.1 小黄鱼适宜性指数与环境因子的关系

水温是影响鱼类生态习性的重要环境因子之一, 不仅能够影响鱼类生长、发育、繁殖和新陈代谢, 而且还能影响鱼类的洄游分布、渔期的早晚和渔汛时间的长短、中心渔场的位置以及鱼群

自身的集群行为等<sup>[37]</sup>。水温也可以通过对饵料生物行为、分布和数量变动的影 响, 从而间接影响鱼类的洄游分布<sup>[25]</sup>。盐度在鱼类的生存环境中也发挥着重要的作用, 鱼类各个发育阶段的开始时间和生长速度均与盐度的高低有密切的关系<sup>[38-39]</sup>, 因此盐度无论在水平还是垂直方向发生变化时, 往往直接反映出鱼类洄游和集群的变化<sup>[40]</sup>。综上所述, 本研究利用海底温度、海底盐度和水深作为环境因子研究其与小黄鱼渔场分布的关系是可行的。李建生等<sup>[41]</sup>研究了东海北部秋季(9 月)小黄鱼的分布特征及其与底层温度和盐度的关系, 发现小黄鱼主要栖息于暖水区的边缘水域, 适宜的底层水温为 14 ~ 21 °C, 适宜的底层盐度为 33.0 ~ 34.0。本研究发现, 夏季温台渔场小黄鱼的适宜性指数 SI 值在水温 17.6 ~ 21.2 °C、盐度 34 左右达到最大值, 与以往研究结果基本吻合。

### 3.2 小黄鱼栖息地适宜性指数的空间分布特征

温台渔场小黄鱼的空间分布特征存在一定的季节变化: 春季温台渔场小黄鱼适宜性较高的

栖息地多集中在  $122^{\circ}30'E$  以东,  $28^{\circ}30'N$  以北的海域;夏季温台渔场小黄鱼栖息地适宜性整体相对较低;秋季,在温台渔场外部海域存在一个 HSI 高值区,其位置在  $28^{\circ}N$ ,  $122^{\circ}E$  附近海域;冬季, HSI 高值区与秋季相比范围扩大,呈带状,其位置大致为  $122^{\circ}00'E \sim 122^{\circ}30'E$ ,  $28^{\circ}00'N \sim 28^{\circ}30'N$  海域范围内,该季节 HSI 值较秋季明显降低,这可能与小黄鱼的洄游分布有关。徐兆礼等<sup>[8]</sup> 研究了中国沿海小黄鱼的洄游路线发现:2 月份在东海南部近海有鱼群聚集,3—4 月有逐渐北上踪迹,9—10 月又出现在南部近海;另外,在东海中部的鱼山渔场和东海南部的温台渔场禁渔线外侧,整个冬季始终有一定数量的小黄鱼群体越冬。本研究发现,秋季存在部分 HSI 高值区,到冬季该区域逐渐向东北部转移,春季在温台渔场东北部出现小黄鱼 HSI 高值区,而夏季小黄鱼又大量洄游至浙江南部近海渔场,与以往研究中小黄鱼的洄游情况基本吻合。

春季温台渔场东北部 HSI 偏高还可能与小黄鱼产卵场有关。张仁斋等<sup>[42]</sup> 研究中国近海鱼卵与仔鱼,发现长江口外海区佘山产卵场和浙江沿岸的鱼山、洞头山等海区的产卵场的产卵期为每年 3 月至 5 月,与以往研究结论相吻合。

### 3.3 适宜性指数权重的设置

HSI 模型的建立取决于基于不同环境因子的 SI 模型所得的结果<sup>[43]</sup>。本研究在建立 HSI 模型时,因为考虑到了不同环境因子对小黄鱼渔场分布的影响差异,所以对不同环境因子赋予了相应的权重进行探讨。易炜等<sup>[44]</sup> 对东海鲈鱼栖息地研究以及胡贯宇等<sup>[29]</sup> 对阿根廷滑柔鱼栖息地研究以及王易帆等<sup>[45]</sup> 对中西太平洋鲑鱼栖息地指数预报模型的研究表明,在 HSI 模型中考虑权重后,模型的精度能得到明显提高。因此,本研究认为不同环境因子对温台渔场小黄鱼空间分布影响不同。据此,本研究通过利用 BRT 计算出不同季节不同环境因子的权重,结果表明春季、秋季、冬季水温对小黄鱼的影响率均为最大,这与林龙山等<sup>[35]</sup> 认为的在海底水温、海底盐度和深度中,海底温度是影响小黄鱼空间分布最主要的环境因子这一结论保持一致。

在实际生产中,由于渔场的形成、鱼类资源分布及其与环境因子相互影响的过程相对复杂,因此,在今后的研究中,还需要对小黄鱼生活史

和温台渔场环境变化进行更深入的研究,建立 HSI 模型时考虑更多的环境因子<sup>[46]</sup>,对 HSI 模型加以综合分析与研究,以期更加全面客观地分析温台渔场小黄鱼栖息地的空间分布特征,为小黄鱼的资源保护及可持续利用提供可靠的科学依据。

### 参考文献:

- [1] 郑元甲. 东海大陆架生物资源与环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.  
ZHENG Y J. Biological resources and environment of the continental shelf of the East China Sea [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2003.
- [2] 郭旭鹏, 金显仕, 戴芳群. 渤海小黄鱼生长特征的变化[J]. 中国水产科学, 2006, 13(2): 243-249.  
GUO X P, JIN X S, DAI F Q. Growth variations of small yellow croaker (*Pseudosciaena polyactis* Bleeker) in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(2): 243-249.
- [3] 严利平, 胡芬, 凌建忠, 等. 东海北部和黄海南部小黄鱼年龄与生长的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(1): 95-100.  
YAN L P, HU F, LING J Z, et al. Study on age and growth of *Larimichthys polyactis* in the East China Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(1): 95-100.
- [4] 林龙山, 程家骅. 东海区小黄鱼渔业生物学现状的分析[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(4): 565-570.  
LIN L S, CHENG J H. An analysis of the current situation of fishery biology of small yellow croaker in the East China Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(4): 565-570.
- [5] 林龙山. 长江口近海小黄鱼食性及营养级分析[J]. 海洋渔业, 2007, 29(1): 44-48.  
LIN L S. Study on feeding habit and trophic level of redlip croaker in Changjiang estuary[J]. Marine Fisheries, 2007, 29(1): 44-48.
- [6] 薛莹, 金显仕, 张波, 等. 黄海中部小黄鱼摄食习性的体长变化与昼夜变化[J]. 中国水产科学, 2004, 11(5): 420-425.  
XUE Y, JIN X S, ZHANG B, et al. Ontogenetic and diel variation in feeding habits of small yellow croaker *Pseudosciaena polyactis* Bleeker in the central part of Yellow Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(5): 420-425.
- [7] 薛莹, 金显仕, 张波, 等. 黄海中部小黄鱼的食物组成和摄食习性的季节变化[J]. 中国水产科学, 2004, 11(3): 237-243.  
XUE Y, JIN X S, ZHANG B, et al. Diet composition and seasonal variation in feeding habits of small yellow croaker

- Pseudosciaena polyactis* Bleeker in the central Yellow Sea [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(3): 237-243.
- [8] 徐兆礼, 陈佳杰. 小黄鱼洄游路线分析[J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 931-940.  
XU Z L, CHEN J J. Analysis on migratory routine of *Larimichthys polyactis* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(6): 931-940.
- [9] 林龙山. 东海区小黄鱼现存资源量分析[J]. 海洋渔业, 2004, 26(1): 18-23.  
LIN L S. Analysis on extant abundance of small yellow croaker *Pseudosciaena polyactis* in the East China Sea [J]. Marine Fisheries, 2004, 26(1): 18-23.
- [10] 林龙山, 程家骅, 任一平, 等. 东海区小黄鱼种群生物学特性的分析[J]. 中国水产科学, 2004, 11(4): 333-338.  
LIN L S, CHENG J H, REN Y P, et al. Analysis of population biology of small yellow croaker *Pseudosciaena polyactis* in the East China Sea region [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(4): 333-338.
- [11] 林龙山. 东海区小黄鱼渔业生物学动态特征及其渔业资源管理的研究[D]. 上海: 上海水产大学, 2005.  
LIN L S. Study on the dynamic characteristic of fishery biology and the fishery resource management of redlip croaker in the East China Sea [D]. Shanghai: Shanghai Fisheries University, 2005.
- [12] 单秀娟, 李忠炉, 戴芳群, 等. 黄海中南部小黄鱼种群生物学特征的季节变化和年际变化[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(6): 7-16.  
SHAN X J, LI Z L, DAI F Q, et al. Seasonal and annual variations in biological characteristics of small yellow croaker *Larimichthys polyactis* in the central and southern Yellow Sea [J]. Marine Fisheries Research, 2011, 32(6): 7-16.
- [13] 金显仕. 黄海小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)生态和种群动态的研究[J]. 中国水产科学, 1996, 3(1): 32-46.  
JIN X S. Ecology and population dynamics of small yellow croaker (*Pseudosciaena polyactis*) in the Yellow Sea [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1996, 3(1): 32-46.
- [14] THOMASMA L E. Standards for the development of habitat suitability index models [J]. Wildlife Society Bulletin, 1981, 19: 1-171.
- [15] GORE J A, HAMILTON S W. Comparison of flow - related habitat evaluations downstream of low - head weirs on small and large fluvial ecosystems [J]. River Research & Applications, 2015, 12(4/5): 459-469.
- [16] 冯波, 许柳雄. 基于 GIS 的印度洋大眼金枪鱼延绳钓获率与水温关系的研究[J]. 湛江海洋大学学报, 2004, 24(6): 18-23.  
FENG B, XU L X. An analysis on relationship between water temperature and hooking rate of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean by GIS [J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2004, 24(6): 18-23.
- [17] 赵海龙, 陈新军, 方学燕. 基于栖息地指数的东太平洋黄鳍金枪鱼渔场预报[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 778-785.  
ZHAO H L, CHEN X J, FANG X Y. Forecasting fishing ground of Yellowfin tuna in the Eastern Pacific Ocean based on the habitat suitability index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 778-785.
- [18] CHEN X J, LL G, FENG B, et al. Habitat suitability index of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) from July to September in the East China Sea [J]. Journal of Oceanography, 2009, 65(1): 93-102.
- [19] 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 bartramii* in the Northwestern Pacific Ocean [J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(2): 241-248.
- [20] 邹易阳, 薛莹, 麻秋云, 等. 应用栖息地适宜性指数研究海州湾小黄鱼的空间分布特征[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(8): 54-63.  
ZOU Y Y, XUE Y, MA Q Y, et al. Spatial distribution of *Larimichthys polyactis* in Haizhou Bay based on habitat suitability index [J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(8): 54-63.
- [21] RUPPERT D. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction [J]. Journal of the American Statistical Association, 2004, 99(466): 567.
- [22] ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A working guide to boosted regression trees [J]. Journal of Animal Ecology, 2008, 77(4): 802-813.
- [23] FROESCHKE B F, TISSOT P, STUNZ G W, et al. Spatiotemporal predictive models for juvenile southern flounder in Texas estuaries [J]. North American Journal of Fisheries Management, 2013, 33(4): 817-828.
- [24] COMPTON T J, MORRISON M A, LEATHWICK J R, et al. Ontogenetic habitat associations of a demersal fish species, *Pagrus auratus*, identified using boosted regression trees [J]. Marine Ecology Progress, 2012, 462: 219-230.
- [25] LEWIN W C, MEHNER T, RITTERBUSCH D, et al. The influence of anthropogenic shoreline changes on the littoral abundance of fish species in German lowland lakes varying in depth as determined by boosted regression trees [J]. Hydrobiologia, 2014, 724(1): 293-306.
- [26] 高峰, 陈新军, 官文江, 等. 基于提升回归树的东、黄海鲈鱼渔场预报[J]. 海洋学报, 2015, 37(10): 39-48.  
GAO F, CHEN X J, GUAN W J, et al. Fishing ground forecasting of chub mackerel in the Yellow Sea and East China Sea using boosted regression trees [J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(10): 39-48.
- [27] TORRES L G, SUTTON P J H, THOMPSON D R, et al. Poor transferability of species distribution models for a pelagic predator, the grey petrel, indicates contrasting habitat preferences across ocean basins [J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0120014.

- [28] XUE Y, GUAN L S, TANAKA K, et al. Evaluating effects of rescaling and weighting data on habitat suitability modeling [J]. *Fisheries Research*, 2017, 188: 84-94.
- [29] 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.
- [30] 李建生, 严利平, 胡芬, 等. 温台渔场日本鲭的繁殖生物学特征[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(1): 99-105.  
LI J S, YAN L P, HU F, et al. The reproductive biology of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in Wen-Tai fishing ground[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(1): 99-105.
- [31] 凌建忠, 李圣法, 严利平. 东海区主要渔业资源利用状况的分析[J]. *海洋渔业*, 2006, 28(2): 111-116.  
LING J Z, LI S F, YAN L P. Analysis on the utilization of main fishery resources in the East China Sea [J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28(2): 111-116.
- [32] 林龙山, 程家骅, 凌建忠. 东海区底拖网渔业资源变动分析[J]. *海洋渔业*, 2007, 29(4): 371-374.  
LIN L S, CHENG J H, LING J Z. Analysis on recent status of the bottom trawl fishery resources in the East China Sea region[J]. *Marine Fisheries*, 2007, 29(4): 371-374.
- [33] BAYER M, PORTER W F. Evaluation of a guild approach to habitat assessment for forest-dwelling birds [J]. *Environmental Management*, 1988, 12(6): 797-801.
- [34] 李雪渡. 海水温度与渔场之间的关系[J]. *海洋学报*, 1982, 4(1): 103-113.  
LI X D. Studies on the correlation between the temperature of sea water and fishing grounds[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1982, 4(1): 103-113.
- [35] 林龙山, 姜亚洲, 刘尊雷, 等. 黄海南部和东海小黄鱼资源分布差异性研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(3): 1-6.  
LIN L S, JIANG Y Z, LIU Z L, et al. Analysis of the distribution difference of small yellow croaker between the Southern Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(3): 1-6.
- [36] TANAKA K, CHEN Y. Spatiotemporal variability of suitable habitat for American lobster (*Homarus americanus*) in Long Island Sound [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2015, 34(2): 531-543.
- [37] 殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.  
YIN M C. Ecology of fish [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [38] 王宏田, 张培军. 环境因子对海产鱼类受精卵及早期仔鱼发育的影响[J]. *海洋科学*, 1998, 22(4): 50-52.  
WANG H T, ZHANG P J. Effects of environmental conditions on fertilized eggs and early larva of marine fishes [J]. *Marine Sciences*, 1998, 22(4): 50-52.
- [39] 王云峰, 朱鑫华. 盐度对鱼类生态生理学特征的影响[J]. *海洋科学集刊*, 2002(44): 159-158.  
WANG Y F, ZHU X H. A review on impact of salinity on patterns of fish ecophysiology [J]. *Studia Marina Sinica*, 2002(44): 159-158.
- [40] 胡杰. 渔场学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.  
HU J. Fisheries hydrography [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [41] 李建生, 林龙山, 程家骅. 东海北部秋季小黄鱼分布特征及其与底层温度和盐度的关系[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(3): 348-356.  
LI J S, LIN L S, CHENG J H. Distribution characteristic of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis* Bleeker) and its relationship with bottom water temperature and salinity in the northern East China Sea in autumn [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(3): 348-356.
- [42] 张仁斋, 陆穗芬, 赵传纲, 等. 中国近海鱼卵与仔鱼[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.  
ZHANG R Z, LU S F, ZHAO C Y, et al. Fish eggs and larvae of Chinese offshore [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985.
- [43] TIAN S Q, CHEN X J, CHEN Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommatrephes bratramii* in the northwestern Pacific Ocean [J]. *Fisheries Research*, 2009, 95(2/3): 181-188.
- [44] 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]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(12): 90-97.
- [45] 王易帆, 陈新军. 中西太平洋鲹栖息地指数预报模型比较研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(5): 743-750.  
WANG Y F, CHEN X J. Comparisons of habitat suitability index models of skipjack tuna in the Western and Central Pacific Ocean [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(5): 743-750.
- [46] 丁峰元, 林龙山, 李建生, 等. 东海区北部小黄鱼生殖群体分布及与水团关系[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(6): 1013-1019.  
DING F Y, LIN L S, LI J S, et al. Relationship between Redlip Croaker (*Larimichthys polyactis*) spawning stock distribution and water masses dynamics in Northern East China Sea region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6): 1013-1019.

## Spatial distribution of *Larimichthys polyactis* in Wen-Tai fishing ground based on habitat suitability index

LIU Mengying<sup>1,2</sup>, LYU Zehua<sup>1,3</sup>, TIAN Siqun<sup>1,2,3</sup>, GAO Chunxia<sup>1,2,3</sup>, DAI Libin<sup>1,2</sup>, YE Shen<sup>4,5</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 3. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai 201306, China; 4. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, Zhejiang, China; 5. Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-resources, Wenzhou 325005, Zhejiang, China)

**Abstract:** According to the investigated data of fishery resources and habitats of comprehensive survey on Wen-Tai fishing ground in four seasons in 2015—2016, using normal distribution function respectively the sea bottom temperature (SBT), sea bottom salinity (SBS), water depth, and by the relative density of resources suitability index (SI) were built, and by used the least squares parameter model, based on different weight arithmetic average method (AWM), the habitat suitability index (HSI) model was also built. According to the data of resource density, bottom temperature, bottom salinity and depth, the boosted regression tree (BRT) was also built used to evaluate the weight of each environmental variable in the HSI model, and the model accuracy was tested by cross validations. It was found that there was a significant normal relationship between environmental factors and SI. *Larimichthys polyactis* optimal habitat has an obvious seasonal change of habitats. The whole-year high value appeared in spring and summer, followed by autumn and winter, the spring high value area is located in east of 122°30'E, north of 28°30'N summer strip of south high value area, autumn high value area is located at 122°00'E, 28°00'N, winter high value area north is located 123°00'E, 29°00'N. The results showed that the model can positively reflect the distribution and variation of the habitat of the *Larimichthys polyactis* in the warm stage after considering the weight in the HSI model.

**Key words:** *Larimichthys polyactis*; habitat suitability index; Wen-Tai Fishing Ground; spatial distribution