

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20052

基于栖息地适宜指数的浙江南部近海黄鲫最适栖息地分布

柳晓雪¹, 高春霞^{1, 2, 3}, 田思泉^{1, 2, 3}, 秦松⁴, 马金¹, 赵静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. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江 温州 325005

摘要: 根据 2016—2018 年 4 个季节的浙江南部近海黄鲫(*Setipinna taty*)的调查数据与水温、水深和盐度等水文数据构建栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型, 探究黄鲫的适宜栖息地空间分布特征, 预测最适宜栖息地分布。结果显示, 黄鲫最适栖息水温为 11.2~33.6 °C, 最适水深为 19~46.6 m, 最适盐度为 27.8~33.2。通过交叉验证发现, 基于几何平均模型(geometric mean model, GMM)拟合的栖息地适宜性指数模型精确度较高。最优模型预测结果显示, 黄鲫的最适栖息地分布存在一定季节变化, 全年 HSI 高值区出现在春季和夏季, 其次为冬季和秋季。春季适宜性较高的栖息地集中在 28°N 以南、121.5°E 以西, 夏季分布在 27.5°N~28.5°N、122°E 以东, 秋季分布在 27.5°N~29°N、122.5°E 以西和 27.5°N 以南、121.33°E 以西两个区域, 冬季分布在 122.5°E 以西。黄鲫是浙江南部近海重要的渔业种类, 本研究通过探索黄鲫的栖息地分布和变化, 旨在为黄鲫资源的变化预测与养护策略提供科学证据。

关键词: 黄鲫; 最适栖息地分布; 栖息地适宜性指数; 浙江南部近海

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)12-1485-11

浙江南部近海位于东海中南部, 属于暖温带海区, 海域内常年受低盐的浙江沿岸流和高温高盐的台湾暖流的双重影响, 营养盐和生物饵料充足, 渔业资源丰富^[1]。近年来, 随着捕捞强度不断增大和栖息地退化, 中国近海水域的渔业资源出现严重衰退现象, 渔业群落结构发生较大变动, 重要经济鱼类如小黄鱼等呈现明显衰退趋势^[2], 捕捞对象趋于小型化。相关研究发现, 东海海域的渔业捕捞对象开始向小型鱼类转变^[3], 黄鲫(*Setipinna taty*)已经成为浙江南部近海渔业的主要渔获组成之一^[4]。

黄鲫是暖水性近海中上层鱼类, 隶属于鲱形目(Clupeiformes)、鲱科(Engraulidae)、黄鲫属(*Setipinna*), 广泛分布于中国南海、东海、黄海和

渤海海域, 在近海生物群落食物网中扮演承上启下的重要角色^[5]。随着黄鲫等小型鱼类在渔业上的地位提升, 其资源利用和科学研究近年来获得重要关注, 国内关于黄鲫资源的研究主要涉及生物学^[6]、遗传多样性^[7]、摄食生态^[8]、种群动态和群体洄游^[9]等, 总体研究偏向于黄鲫生活史和遗传信息的基础研究, 而对资源栖息地适应性的研究相对较少, 对于浙江南部近海黄鲫栖息地适应性的研究尚未见报道。

栖息地适宜度指数(habitat suitability index, HSI)模型是描述物种对环境偏好程度以及探究主要环境因子对物种空间分布影响的重要工具^[10-11], 在小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)^[12]、皮氏叫姑鱼(*Johnius belangerii*)^[13]等众多鱼种研究中取得了

收稿日期: 2020-03-03; 修订日期: 2020-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41906074; 31902372); 浙江省渔业资源专项调查项目(158053).

作者简介: 柳晓雪(1995-), 女, 硕士研究生, 从事渔业资源栖息地研究. E-mail: 248459901@qq.com

通信作者: 赵静, 讲师, 从事渔业资源栖息地研究. E-mail: jzhao@shou.edu.cn

较好的适宜栖息地预测效果。为了探究多种环境因子对黄鲫资源分布的影响,本研究基于 2016—2018 年渔业调查数据和环境数据,利用 HSI 模型探究黄鲫适宜栖息地在浙江南部近海海域的时空分布规律,分析黄鲫最适栖息地与多个环境因子的关系,掌握其最适的栖息分布环境,为黄鲫资源的科学管理和可持续利用提供研究参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源于 2016—2018 年 4 个季节在浙江南部近海温台渔场开展的渔业资源和环境综合调查(图 1),调查时间为 5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)和 2 月(冬季),共采样 12 个航次。调查船为浙洞渔 10109 号,调查网具为底拖网,网口宽 40 m,高 7.5 m,拖速为 2~4 kn,每站的作业时间为 1 h 左右。记录每个站点捕获的渔获物种类、数量、生物量、体长、性腺成熟度等生物学信息。此外,在每个调查站点,同步进行环境因子的采集和测定,使用 CTD 温盐深仪测定每个站位的环境数据并予以记录,本研究采用的环境数据有:深度(Dep, m)、温度(Tem, °C)、盐度(Sal),研究区域的环境数据统计值如表 1 所示。样品的采集、测定和分析根据《海洋调查规范》(GB/T 12763)^[14]和《海洋监测规范》(GB 17378)^[15]进行。数据分析和模型建立前,首先对黄鲫渔获数据进行拖网时间(1 h)和拖网速度(3 kn)的标准化处理。

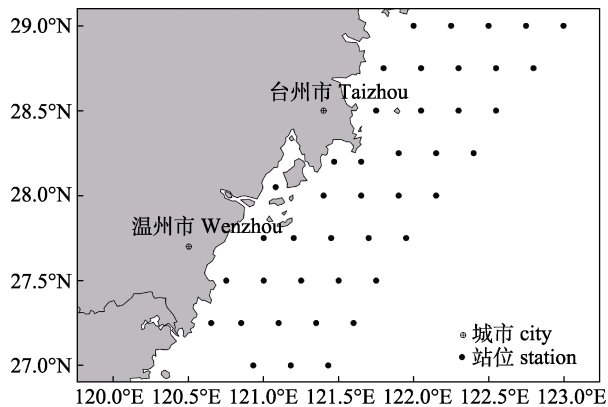


图 1 浙江南部近海渔业资源调查站点
Fig. 1 Survey stations of fisheries resources survey in the south inshore of Zhejiang

表 1 浙江南部近海调查环境数据统计值
Tab. 1 Statistics of environment survey data in the south inshore of Zhejiang

季节 season	环境因子 environmental factor	平均值 average	标准差 standard deviation	最小值 minimum	最大值 maximum
春季 spring	水深/m depth	48.3668	13.6389	18.0	70.4
	水温/°C temperture	21.2439	3.7387	11.4	25.2
	盐度 salinity	31.9804	1.5411	27.7	34.4
夏季 summer	水深/m depth	47.4345	14.0609	15.0	65.8
	水温/°C temperture	28.7851	1.5278	23.1	33.6
	盐度 salinity	33.2975	1.1657	28.2	34.5
秋季 autumn	水深/m depth	48.9115	14.0203	18.2	71.9
	水温/°C temperture	21.3132	1.3083	18.6	23.6
	盐度 salinity	32.4735	2.0190	26.0	34.2
冬季 winter	水深/m depth	44.6279	16.3990	11.3	71.3
	水温/°C temperture	12.5740	1.3991	10.0	16.3
	盐度 salinity	30.3689	2.3897	11.0	32.7

1.2 模型建立

1.2.1 适宜性指数 将调查所得到的渔业资源数据以季节(春、夏、秋、冬)为时间尺度进行统计分析并建立模型。使用资源密度值(abundance index, AI)计算每个环境变量的适宜性指数(suitability index, SI)^[16],进而用于描述渔业资源的栖息地适宜性分布状况^[17]。本研究选用标准化后的资源密度值 AI 与 Dep、Tem、Sal 分别建立对应的 SI 关系。使用平均值函数替代缺失值,并删除数据中的异常值。通常,SI 的取值范围在 0 到 1 之间,假设 AI 最大时为最适宜黄鲫栖息的海域,认定其适宜性指数 SI 为 1,当 AI 为 0 时,认为是最不适宜黄鲫栖息的海域,认定其 SI 为 0。SI 计算公式为:

$$SI_{i,k} = \frac{AI_{i,k} - AI_{i,min}}{AI_{i,max} - AI_{i,min}} \tag{1}$$

式中,SI_{i,k}为环境变量*i*第*k*级的适宜性指数,AI_{i,k}为环境变量*i*第*k*级的资源密度值(g/h),AI_{i,min}为环境变量*i*最小资源密度值,AI_{i,max}为环境变量*i*的最大资源密度值。

1.2.2 HSI 建模 根据指数关系,采用算术平均模型(arithmetic mean model, AMM)和几何平均模型(geometric mean model, GMM)建立 HSI, HSI 的取值在 0(不适宜)到 1(最适宜)之间变化^[18]。通常假设高质量栖息地的最适合 HSI 值范围大于 0.8,

低质量栖息地的最合适 HSI 值范围小于 0.3^[19]。将 SI 复合成 HSI, 根据 AMM 和 GMM 将 HSI 的范围标定为 0~1。计算公式如下:

$$HSI_{AMM} = \frac{1}{3}(SI_{Dep} + SI_{Tem} + SI_{Sal}) \quad (2)$$

$$HSI_{GMM} = \sqrt[3]{(SI_{Dep} + SI_{Tem} + SI_{Sal})} \quad (3)$$

式中, HSI_{AMM} 为算术平均法得到的栖息地适宜性指数, HSI_{GMM} 为几何平均法所得到的栖息地适宜性指数, SI_{Dep} 、 SI_{Tem} 和 SI_{Sal} 分别为用水深、水温和盐度计算出的适宜性指数。

1.2.3 模型验证 采用交叉验证法对两个模型的预测性能进行比较, 随机选取 80% 的数据用作训练集拟合模型, 20% 的数据作为测试集来验证两个模型的预测性能, 重复上述过程 100 次。每次交叉验证, 将 HSI 预测值与 AI 观测值进行线性回归分析, 通过构建测试集的模型预测值与观测值之间的线性关系来描述二者的近似程度, 通过回归截距、斜率、 r^2 值、赤池信息准则(Akaike's information criterion, AIC)来评价 HSI 模型的性能, 确定最优模型。线性回归方程如下:

$$O_i = \beta \cdot P_i + \alpha \quad (4)$$

式中, O_i 为实际观察值; P_i 为模型预测值; β 为斜率, 当 $\beta=1$ 时, 表示模型在预测中无系统偏差; α 为截距, 当 $\alpha=0$ 时, 表示预测值与观测值有相似的空间特征^[19]。其中系数(r^2)表示迭代过程中回归方程的拟合优度。

赤池信息准则常被用来评价模型的拟合优度, AIC 值越小, 则表示模型拟合的越好^[20]。AIC 公式如下:

$$AIC = -2L + 2m \quad (5)$$

式中, m 是模型参数个数, L 为最大似然值。

HSI 建模流程如图 2 所示。

1.3 绘制 HSI 值分布图

拟合度较高模型被用于计算离散 HSI 值, 使用普通克里金法进行连续的 HSI 插值, HSI 值大于等于 0.8 的区域被认为是最适宜黄鲫栖息的区域, HSI 值小于等于 0.3 的区域被认为是最不适宜黄鲫栖息的区域^[19]。使用 ArcGIS 10.3 绘制黄鲫 HSI 的空间分布图, 与实际观测值黄鲫资源密度的分布进行比较, 探讨其分布的季节差异和变化。利

用 ArcGIS 10.3 版本普通克里金法的半方差模型对预测性能较好的四个季节 GMM-HSI 离散值进行空间插值, 实现模型输出的可视化, 其中半方差模型选择高斯模型进行拟合。

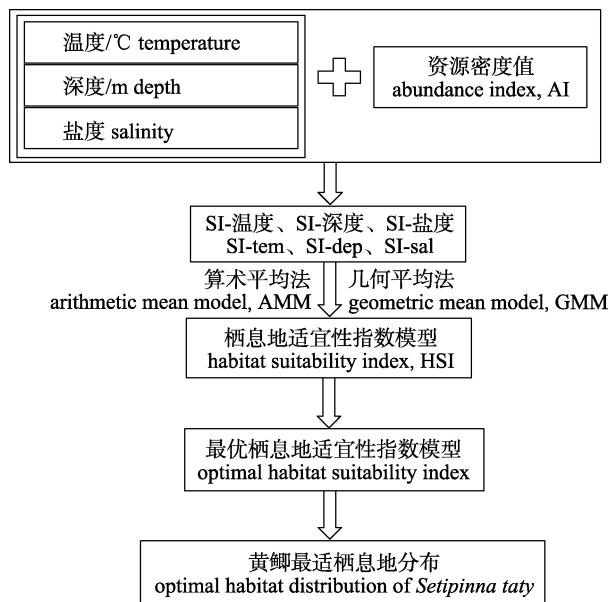


图 2 浙江南部近海黄鲫 HSI 建模流程图

Fig. 2 Flowchart of modeling procedure for estimating the HSI of *Setipinna taty* in the south inshore of Zhejiang

2 结果与分析

2.1 适宜性指数曲线

研究发现, 春季, 浙江省南部近海黄鲫分布海域的水温范围为 12.5~24.9 °C, 其中 22.6~23.3 °C 为黄鲫最适栖息水温, 其对应的资源密度范围为 0~3167 g/h, 占春季总资源密度的 63.8 %, SI 在 23.1 °C 左右达到最高值; 黄鲫分布海域的水深范围为 18~70.5 m, 其中 43~46.6 m 为黄鲫最适栖息水深, 其对应的资源密度范围是 0~3167 g/h, 占春季总资源密度的 27.1%, SI 在 45.2 m 左右达到最高值; 黄鲫分布海域的盐度范围为 27.7~34.4, 其中 31.2~31.7 为黄鲫最适栖息盐度, 其对应的资源密度范围为 0~3167 g/h, 占春季总资源密度的 35.2%, SI 在 31.4 左右达到最高值(图 3a)。

夏季, 黄鲫资源分布海域的水温范围为 23.1~33.6 °C, 其中 33.6 °C 为黄鲫最适栖息水温, 其对应的资源密度为 6480 g/h, 占夏季总资源密度的 17.8%; 黄鲫分布海域的水深范围为 19~65.8 m,

其中 19 m 为黄鲫的最适栖息水深, 其对应的资源密度范围是 548.6~19791.4 g/h, 占夏季总资源密度的 55.8%; 黄鲫分布海域的盐度范围为 28.2~34.5,

其中 32.9~33.2 为黄鲫的最适栖息盐度, 其对应的资源密度范围是 0~19791.4 g/h, 占夏季总资源密度的 72.1%, SI 在 33.1 左右达到最高值(图 3b)。

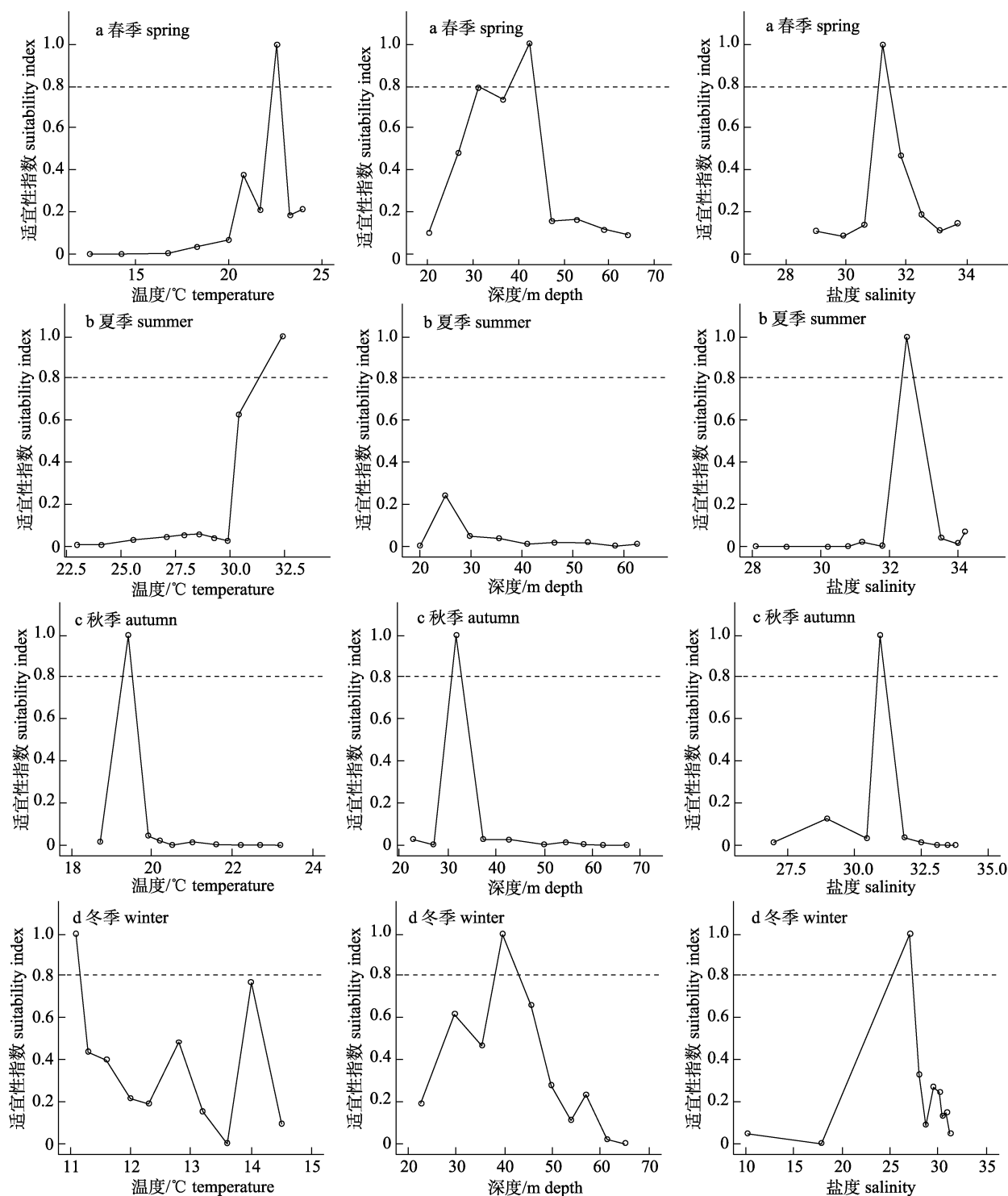


图 3 浙江南部近海黄鲫的适宜性指数图
横虚线代表 SI=0.8 的水平线。

Fig. 3 Suitability index of *Setipinna taty* in the south inshore of Zhejiang
Horizontal dashed line presents the level line of SI=0.8.

秋季, 黄鲫资源分布海域的水温范围为 18.8~23.7 ℃, 其中 19.5~19.9 ℃为黄鲫的最适栖息水温, 其对应的资源密度范围为 0~9677.6 g/h, 占秋季总资源密度的 94.7 %, SI 在 19.7 ℃左右达到最高值; 黄鲫分布海域的水深范围为 22.8~72 m, 其中 32.5~36.7 m 为黄鲫的最适栖息水深, 其对应的资源密度范围是 0~9677.6 g/h, 占秋季总资源密度的 91.5%, SI 在 34.4 m 左右达到最高值; 黄鲫分布海域的盐度范围为 26~34.2, 其中 31.1~31.6 为黄鲫的最适栖息盐度, 其对应的资源密度为 38.4~9677.6 g/h, 占秋季总资源密度的 77.8%, SI 在 31.3 左右达到最高值(图 3c)。

冬季, 黄鲫资源分布海域的水温范围为 11.2~14.8 ℃, 其中 11.2~11.3 ℃为黄鲫的最适栖息水温, 其对应的资源密度范围为 0~557.2 g/h, 占冬季总资源密度的 27.3%, SI 在 11.2 ℃左右达到最高值; 黄鲫分布海域的水深范围为 22.9~71.2 m,

其中 40.7~45.5 m 为黄鲫的最适栖息水深, 其对应的资源密度范围是 0~629.6 g/h, 占冬季总资源密度的 27.6%, SI 在 43.4 m 左右达到最高值; 黄鲫分布海域的盐度范围为 10.3~31.7, 其中以盐度为 27.8 时, 资源密度最大, 其对应的资源密度为 557.2 g/h, 占冬季总资源密度的 7.1% (图 3d)。

2.2 基于 GMM 和 AMM 的 HSI 模型拟合度比较

根据几何平均模型和算术平均模型计算出的 HSI 值和资源密度(AI)的拟合度进行比较发现, 与无预测偏差的理想模型($\alpha=0, \beta=1, r^2=1$)相比, 以平均值为标准, 秋季的预测性能最好($\alpha=0.0139, \beta=0.2974, r^2=0.5101$), 冬季的预测性能最差($\alpha=0.1570, \beta=0.3214, r^2=0.2106$)。几何平均模型对 HSI 值的预测性能更好, 春季、夏季和秋季几何平均模型得到的 AIC 值较小, 而算术平均模型得到的 AIC 值较大(表 2)。因此, 几何平均模型更适合估算浙江南部近海黄鲫资源的栖息地适宜性。

表 2 四季 AMM 和 GMM 方法的拟合度比较
Tab. 2 Results of fitting test by AMM and GMM in four seasons

季节 season	模型 model	截距(α) intercept		斜率(β) slope		r^2		AIC
		平均值 mean	中位数 median	平均值 mean	中位数 median	平均值 mean	中位数 median	
春季 spring	AMM	0.2154	0.2146	-0.3583	-0.3939	0.3650	0.3702	-11.1320
	GMM	0.1309	0.1325	0.3715	0.3848	0.3863	0.4080	-28.1352
夏季 summer	AMM	0.0875	0.0691	0.0719	-0.0045	0.2280	0.1602	-19.4098
	GMM	0.0343	0.0301	0.0277	0.0020	0.1653	0.0803	-25.4489
秋季 autumn	AMM	0.0248	0.0126	0.4806	0.3623	0.5469	0.6699	-11.7666
	GMM	0.0139	0.0115	0.2974	0.1517	0.5101	0.6109	-35.0259
冬季 winter	AMM	0.2470	0.2341	0.2801	0.2513	0.2466	0.2012	-2.7088
	GMM	0.1570	0.1485	0.3214	0.2493	0.2106	0.1489	-0.2009

2.3 浙江南部近海黄鲫最适宜栖息地分布

根据绘制的黄鲫 HSI 空间分布图, 与实际资源密度的分布情况进行比较(图 4)。分析发现, 春季浙江南部近海黄鲫适宜性较高的栖息地集中在 28°N 以南、121.5°E 以西, 靠近浙闽交界方向, 其中在 27.75°N、121.75°E 海域附近的位置存在一个 HSI 高值区。夏季适宜性较高的栖息地则出现 27.5°N~28.5°N、122°E 以东海域, 整体上, 该季节 HSI 值较春季小, 最适栖息地分布有向浙江温州市与台州市沿岸移动的趋势, 资源密度的高值区主要分布在 28.5°N 以南。秋季黄鲫适宜性较高的

栖息地分为两个区域, 分别为 27.5°N~29°N、122.5°E 以西, 以及 27.5°N 以南、121.33°E 以西, 其中在 28°N、121.9°E 和 28.25°N、122°E 分别存在两个 HSI 高值区。冬季最适栖息地主要集中在 122.5°E 以西的海域, 该季节 HSI 高值区域为沿岸带, 范围较广, 较秋季有所升高, 在 27.25°N、121.35°E 附近存在一个 HSI 高值区。

3 讨论

3.1 环境因子对黄鲫栖息地适宜性的影响

水温、盐度、水深等环境因子会对鱼类的适

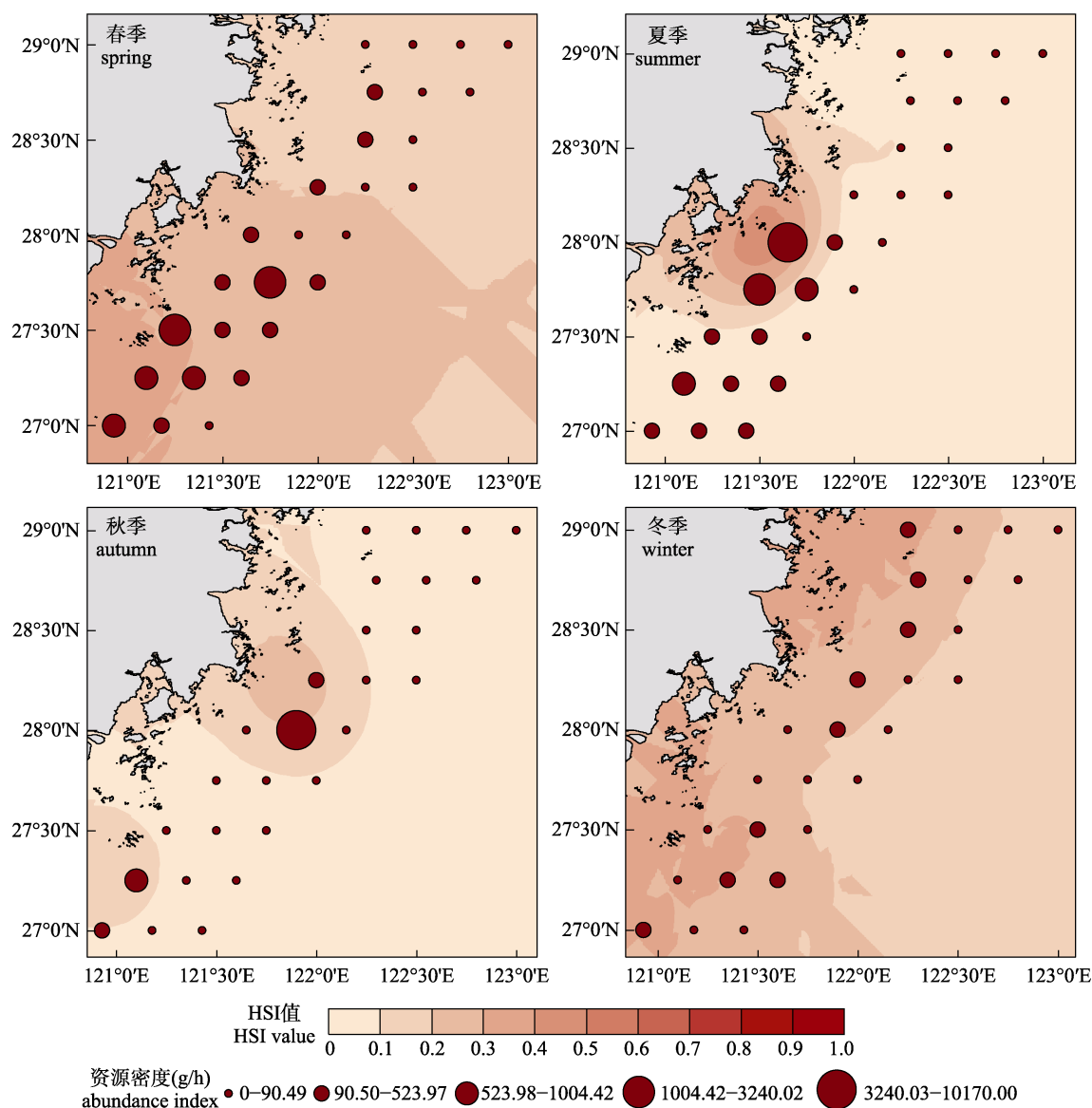


图 4 2016—2018 年四季浙江南部近海黄鲫 HSI 值和资源密度 AI 的空间分布
Fig. 4 Distribution of HSI value and abundance index of *Setipinna taty* in the south inshore of Zhejiang in the four seasons of 2016-2018

宜栖息地分布产生一定影响, 其中水温对鱼类的生长发育、洄游繁殖、集群行为等具有重要的影响作用^[21]。本研究黄鲫属于东海中南部黄鲫群体^[9], 研究发现黄鲫春季的适温范围为 22.6~23.3 °C, 夏季的适温范围为 33.6 °C, 与刘勇等^[9]分析东海中南部黄鲫群体夏季的适宜水温(24.5~25.5 °C)结果相比略有升高。与其他水域相比, 黄鲫在不同季节的适宜水温具有显著的地理差异, 李增光等^[22]研究发现黄海南部黄鲫春季的适宜水温范围为 7.1~12.4 °C, 张孟海等^[23]研究发现渤海南部海域黄鲫夏季的适温范围为 9.2~29.6 °C, 东海北部黄

鲫群体夏季的适宜水温为 11~13 °C^[9], 这种显著的地理差异可能是由于南北不同海域温度的尺度变化较大的原因^[24], 并且不同海域的黄鲫种群可能不同, 对温度的适应范围也会不同。

盐度在鱼类的各个生活史阶段都起到重要的影响作用, 研究表明盐度对鱼类的生态生理学特征存在较大影响^[25], 并能够支配鱼类洄游和集群等行为^[21]。本研究发现浙江南部近海黄鲫夏季适盐范围在 28.2~34.5 之间, SI 最高值为 33 左右, 此盐度范围内黄鲫资源密度最高, 与张孟海等^[23]研究发现的渤海南部黄鲫夏季的适盐范围(23.5~

32.1)较为一致。由于前后研究之间相差年份较长,且各研究海域范围不同,气候、温度、盐度等生态环境因素随时间发生变化,可能会对黄鲫的群体组成和分布产生一定影响,因此本研究与以往研究结果略有差异存在一定合理性。

水深对于鱼类栖息地选择也起到重要影响作用,通过温度、溶解氧等环境因子间接影响鱼类分布^[21],研究表明水深对星康吉鳗等鱼类分布起到显著影响作用^[26]。本研究发现,浙江南部近海黄鲫适宜水深为 19~46.6 m,并呈现较为明显的季节波动。其中春季分布适宜水深最深,且变化幅度较小,为 43~46.6 m,夏季分布适宜水深最浅,为 19 m。以往研究发现东海中南部黄鲫群体最适水深为 60~70 m^[9],而本研究发现黄鲫的最适水深较以往研究明显变浅,黄鲫作为近海中上层鱼类,主要摄食浮游动物^[5],而王春生等^[27]研究表明浮游动物生物量随水深的减少而增加,这可能是黄鲫最适水深变浅的原因之一。其次,黄鲫分布可能会受溶解氧含量的影响,而溶解氧含量随水深增加而减小^[28],因此推测浙江南部近海黄鲫群体可能更适宜浅层水域。

3.2 黄鲫最适栖息地的分布特征

浙江南部近海黄鲫的时空分布特征存在一定季节变化,春季适宜性较高的栖息地集中在 28°N 以南、121.5°E 以西,其中在 27.75°N、121.75°E 海域附近的位置存在一个 HSI 高值区,该季节 HSI 值整体相对较高,且适宜栖息地有偏向东南浙闽交界方向的趋势。该海域常年受到低盐浙闽沿岸流和高温高盐台湾暖流的交汇影响^[29],且台湾暖流流速小而稳定^[30],有利的生态环境对黄鲫群体集聚起着重要作用。浙江南部近海春季在西南季风作用下发生海水从底部上升补偿的现象^[31],易形成叶绿素 a 较高含量区^[32],使得浮游动植物繁殖旺盛,吸引中上层鱼类黄鲫来此索饵,因此该海域黄鲫资源春季较为丰富。相关研究发现随着水温回升,东海有部分黄鲫群体 3 月中下旬向福建和浙江近岸进行产卵洄游^[33],本研究也显示出该趋势。

本研究发现夏季和秋季黄鲫最适栖息地分布有向浙江温州市与台州市沿岸移动的趋势,呈圆

环状分布,夏季 HSI 较高区域集中分布在 27.5°N~28.5°N、122°E 以东,夏季黄鲫整体资源量较其他 3 个季节所占的比例最大,且春季、夏季和秋季资源量在 28.5°N 以南分布较多,其中秋季分布最少。王友喜^[34]研究了闽东北外海虾类的资源状况,证明该海域虾类资源丰富,产量大,而韦晟等^[5]研究表明黄鲫摄食虾类数量较多,推测春夏秋浙江南部近海黄鲫最适栖息地和资源量的分布与其食性有关。

冬季黄鲫最适栖息地分布呈较为明显的纵向带状分布,主要集中在 122.5°E 以西的海域。该季节 HSI 高值区域为沿岸带,较秋季有所升高。黄鲫为中上层鱼类,海洋表层无机氮含量多少对其群聚有着重要作用,且无机氮分布趋势为近岸高于远岸^[35],因此冬季黄鲫的最适栖息地分布一定程度上可能受无机氮分布的影响。刘勇等^[9]研究了东海区黄鲫的洄游路线,表明黄鲫中南部群体越冬行为明显,最适栖息地有向东、南迁移的趋势,推测本研究所显示的最适栖息地变化可能与黄鲫的越冬洄游有关^[9]。

总体来看,春季、夏季和秋季黄鲫最适栖息地主要集中在 28.5°N 以南、122.5°E 以西海域,相关研究发现高盐度有利于黄鲫的性腺发育^[36],浙江南部近海北部有多股淡水河流入海后冲淡了沿岸海域盐度,可能是黄鲫最适栖息地集中于 28.5°N 以南海域的原因之一,最适栖息地分布特征同时也表明了黄鲫近海暖水性的生物特性。此海域成为黄鲫主要的适宜栖息地,今后应加以重点监测和保护。

3.3 栖息地适宜性指数模型计算方法比较及模型完善

栖息地适宜性指数模型是栖息地评估方法里较为常用的模型^[37],本研究通过交叉验证采取最优算法建立了 HSI 模型,取得了较好的拟合效果。通过验证结果显示,浙江南部近海不同季节应用 AMM 和 GMM 计算的 HSI 结果有一定的差异。春季、夏季和秋季预测的 GMM-HSI 值相较于 AMM-HSI 值在各个区间的分布较为均匀,而冬季 GMM-HSI 的结果偏重在 HSI<0.5 的区间,预测的 AMM-HSI 的值在各区间的分布比较均匀。

春季、夏季和秋季利用普通克里金高斯模型拟合出来的 GMM-HSI 分布图具有一定的圆环状分布特征, 具有相对明显的高值中心, 冬季呈现带状特征分布, 高值中心分布不明显。这可能是由于两种计算方法的本身差异所致, 因此 HSI 建模应根据不同季节的不同环境条件, 选择合适的方法计算 HSI 值。此外, 不同的海洋环境因子对鱼类栖息地分布的影响存在强弱问题, 相关学者采用提升回归树(BRT)来建立基于不同权重的鱼类栖息地适宜性指数模型, 有效地提升了 HSI 模型的精确度^[38-39]。

浙江南部近海的较多调查站位和网次记录, 提高了研究结果的可信度和精确度, 使 HSI 模型更加真实的反映了黄鲫的资源和最适宜栖息地的分布状态。但在实际情况中, 影响黄鲫栖息地分布的因素有很多, 饵料生物和底质类型等也会对黄鲫的栖息地选择产生重要影响^[40-41]。黄鲫索饵期的长短取决于水域饵料生物的数量和质量, 饵料生物的数量和质量又受其水域环境因素的影响。此外, 黄鲫的栖息与其食性的季节变化密切相关^[8]。因此, 在今后研究中, 还需要对黄鲫生活史及其食性进行更深入的研究, 建立栖息地适宜性指数模型时除了考虑环境因素, 还需要尝试考虑生物因素, 并使用不同的算法提高精度, 进行全面综合地研究, 以期建立更加准确、完善的栖息地适宜性指数模型。

致谢: 上海海洋大学渔业资源和生态系统量化评估与管理研究室、浙江省海洋水产养殖研究所的老师和同学在样品采集和生物学分析中提供了帮助, 戴黎斌、潘邵媛、崔明远等同仁对论文修改提出了宝贵意见, 在此一并致以真挚感谢!

参考文献:

- [1] Wang Y H, Jiang G C, Dong H L. Distribution characteristics and relationship of dissolved oxygen, pH value and nutrients in the southern sea of Zhejiang in spring[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1990, 12(5): 654-660. [王玉衡, 蒋国昌, 董恒霖. 春季浙江南部海区溶解氧、pH 值和营养盐分布特征及相互关系研究[J]. 海洋学报, 1990, 12(5): 654-660.]
- [2] Bureau of Fisheries. China Fisheries Statistical Yearbook in 2017[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 38-45. [农业部渔业渔政管理局. 2017 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 38-45.]
- [3] Liu Y, Cheng J H, Li S F. Utilization status of *Setipinna taty* in the East China Sea and its rational exploitation[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(3): 485-491. [刘勇, 程家骅, 李圣法. 东海区黄鲫资源的利用现状及合理利用探讨[J]. 中国水产科学, 2006, 13(3): 485-491.]
- [4] Du X X, Tian S Q, Wang J Q, et al. Spatial and temporal variations in fish community off shore southern Zhejiang Province, East China Sea[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018, 33(4): 522-531. [杜晓雪, 田思泉, 王家启, 等. 浙江南部近海鱼类群落结构的时空特征[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(4): 522-531.]
- [5] Wei S, Jiang W M. Study on food web of fishes in the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(2): 182-192. [韦晟, 姜卫民. 黄海鱼类食物网的研究[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(2): 182-192.]
- [6] Cai S S, Xu S Y, Song N, et al. Mitochondrial DNA control region structure and length polymorphism analysis of *Setipinna taty*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(5): 980-986. [蔡珊珊, 徐胜勇, 宋娜, 等. 黄鲫线粒体 DNA 控制区结构及长度多态性分析[J]. 水生生物学报, 2014, 38(5): 980-986.]
- [7] Zhang L Y, Zhang Y P, Zhou Z D, et al. The genetic diversity of *Setipinna taty* in Taiwan Strait and the adjacent waters[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, 39(6): 1100-1106. [张丽艳, 张跃平, 周治东, 等. 台湾海峡及其邻近海域黄鲫群体遗传多样性研究[J]. 水生生物学报, 2015, 39(6): 1100-1106.]
- [8] Guo A, Zhou Y D, Jin H W, et al. Seasonal changes on food composition and feeding habitat of *Setipinna taty* in the East China Sea[J]. Fishery Information and Strategy, 2010, 25(8): 10-13. [郭爱, 周永东, 金海卫, 等. 东海黄鲫的食物组成和食性的季节变化[J]. 渔业信息与战略, 2010, 25(8): 10-13.]
- [9] Liu Y, Cheng J H, Li S F. A study on the distribution of *Setipinna taty* in the East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2004, 26(4): 8-13. [刘勇, 程家骅, 李圣法. 东海区黄鲫数量分布特征的分析研究[J]. 海洋渔业, 2004, 26(4): 8-13.]
- [10] Armour C L, Taylor J G. Evaluation of the instream flow incremental methodology by U.S. fish and wildlife service field users[J]. Fisheries, 1991, 16(5): 36-43.
- [11] Thomas L E, Drummer T D, Peterson R O. Testing the habitat suitability index model for the fisher[J]. Wildlife Society Bulletin, 1991, 19(3): 291-297.
- [12] 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. [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.]
- [13] Zhang Y L, Xue Y, Yu H M, et al. Study on the habitat suitability of *Johnius belangerii* during spring in the Haizhou Bay, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 40(6): 83-91. [张云雷, 薛莹, 于华明, 等. 海州湾春季皮氏叫姑鱼栖息地适宜性研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 83-91.]
- [14] Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. GB/T 12763.6-2007 Specifications for oceanographic survey-Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2007. [国家海洋局第三海洋研究所. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [15] The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB17378.3-1998 The specification for marine monitoring-Part 3: Sample collection, storage and transportation[S]. Beijing: China Standards Press, 1998. [国家质量技术监督局. GB 17378.3-1998 海洋监测规范第 3 部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.]
- [16] Su Q. Analyzing fractal property of species abundance distribution and diversity indexes[J]. Journal of Theoretical Biology, 2016, 392: 107-112.
- [17] Robert A, Campbell. Constructing stock abundance indices from catch and effort data: Some nuts and bolts[J]. Fisheries Research, 2015, 161: 109-130.
- [18] U.S. Fish and Wildlife Service. Standards for the development of habitat suitability index models[R]. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington D C, 1981: 1-81.
- [19] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Review on habitat suitability index in fishery science[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(2): 260-269. [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.]
- [20] Chang J H, Chen Y, Holland D, et al. Estimating spatial distribution of American lobster *Homarus americanus* using habitat variables[J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, 420: 145-156.
- [21] Chen X J. Fishery Resources and Fisheries [M]. 2nd ed. Beijing: Ocean Press, 2014: 152-167. [陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 第 2 版. 北京: 海洋出版社, 2014: 152-167.]
- [22] Li Z G, Ye Z J, Zhang C, et al. CPUE distribution of *Setipinna taty* in southern Yellow Sea and its influencing factors revealed by stow net fishing in spring[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(5): 30-36. [李增光, 叶振江, 张弛, 等. 黄海南部春季帆张网黄鲫 CPUE 分布及其影响因素分析[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(5): 30-36.]
- [23] Zhang M H, Sun T Q. On seasonal distribution of *Setipinna taty* in southern Bohai Sea[J]. Shandong Fisheries, 1995, 12(4): 10-13. [张孟海, 孙同秋. 渤海南部黄鲫季节分布的研究[J]. 齐鲁渔业, 1995, 12(4): 10-13.]
- [24] Dai F Q, Zhu L, Chen Y L. Variations of fishery resource structure in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(1): 1-10. [戴芳群, 朱玲, 陈云龙. 黄、东海渔业资源群落结构变化研究[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(1): 1-10.]
- [25] Wang Y F, Zhu X H. A review on impact of salinity on patterns of fish ecophysiology[J]. Studia Marina Sinica, 2002, 44: 159-166. [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: 159-166.]
- [26] Li M K, Zhang C L, Li M, et al. Relationship between the spatiotemporal distribution of *Conger myriaster* and environmental factors in the southern waters off the Shandong Peninsula during autumn and winter[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(5): 1115-1122. [李明坤, 张崇良, 李敏, 等. 山东南部近海秋、冬季星康吉鳗分布与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2018, 25(5): 1115-1122.]
- [27] Wang C S, He D H, Liu H B, et al. Distribution characteristics of zooplankton biomass in southeast East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 18(3): 66-77. [王春生, 何德华, 刘红斌, 等. 东海东南部浮游动物生物量的分布特征[J]. 海洋学报, 1996, 18(3): 66-77.]
- [28] Rao H M, Huang W Y. Discussion on influencing factor of content of dissolved oxygen in water[J]. Journal of Science and Chemical Industry, 2017, 46(3): 40-43. [饶胡敏, 黄旺银. 影响水体中溶解氧含量因素的探讨[J]. 盐科学与化工, 2017, 46(3): 40-43.]
- [29] Song H T, Ding T M. Composition and distribution of different groups of *Scomber japonicus* and *Decapterus maruadsi* in Zhejiang fishery[J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1995, 14(1): 29-35. [宋海棠, 丁天明. 浙江渔场鲈鱼 *Scomber japonicus* 蓝园鲹 *Decapterus maruadsi* 不同群体的组成及分布[J]. 浙江水产学院学报, 1995, 14(1): 29-35.]
- [30] Li P, Yang S L, Chen S L. Primary analysis of current condition and seasonal variation in southern Zhejiang[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(3): 19-29. [李鹏, 杨世伦, 陈沈良. 浙南近岸海流季节变化特征[J]. 海洋学报, 2014, 36(3): 19-29.]
- [31] Chen J Y, Wang B C, Yu Z Y. The Development Process and Evolution of China's Coast[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1989: 393-402. [陈吉余, 王宝灿, 虞志英. 中国海岸发育过程和演变规律[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 393-402.]

- [32] Yun Z C, Ling S S, University X, et al. Spatial patterns of annual cycles in surface chlorophyll a in the Taiwan Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(2): 165-170.
- [33] Li J S, Zhang Q Y, Zheng Y J. Review and prospect of biological study on common marine pelagic commercial fishes in China[J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(6): 565-575. [李建生, 张其永, 郑元甲. 中国海洋一般中上层经济鱼类生物学研究的回顾与前瞻[J]. *海洋渔业*, 2014, 36(6): 565-575.]
- [34] Wang Y X. Status and exploitation prospects of shrimp resources in the Offlying Sea of northeast Fujian[J]. *Marine Fisheries*, 2002, 22(3): 117-119. [王友喜. 闽东北外海虾类资源状况及开发利用前景[J]. *海洋渔业*, 2002, 22(3): 117-119.]
- [35] Liu Z L, Yang L L, Yan L P, et al. Fish assemblages and environmental interpretation in the northern Taiwan Strait and its adjacent waters in summer[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(6): 1399-1416. [刘尊雷, 杨林林, 严利平, 等. 夏季台湾海峡北部及邻近海域鱼类群落结构及环境解释[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(6): 1399-1416.]
- [36] Chen D G. *Biology of Fishery Resources*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 53-56. [陈大刚. *渔业资源生物学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 53-56.]
- [37] Guan W J, Gao F, Lei L, et al. Comparisons of the habitat suitability index models developed by multi-source data and forecasting[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(1): 149-157. [官文江, 高峰, 雷林, 等. 多种数据源下栖息地模型及预测结果的比较[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(1): 149-157.]
- [38] Liu M Y, Lv Z H, Tian S Q, et al. Spatial distribution of *Larimichthys polyactis* in Wen-Tai fishing ground based on habitat suitability index[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2020, 29(1): 92-101. [刘梦影, 吕泽华, 田思泉, 等. 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[J]. *上海海洋大学学报*, 2020, 29(1): 92-101.]
- [39] Ruppert, David. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2004, 99(466): 567-567.
- [40] Chen H B, Li J L, Yang W B, et al. The habitat suitability index of feeding migration stock of small yellow croaker *Pseudosciaena polyactis* in the East Sea and the Yellow Sea[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2011, 26(4): 66-69. [陈红波, 李继龙, 杨文波, 等. 东黄海小黄鱼秋季索饵环境栖息指数的研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2011, 26(4): 66-69.]
- [41] Zhong X M, Zhang H, Tang J H, et al. Temporal and spatial distribution of *Larimichthys polyactis* bleaker resources in offshore areas of Jiangsu Province[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(2): 81-89. [仲霞铭, 张虎, 汤建华, 等. 江苏近岸海域小黄鱼时空分布特征[J]. *水产学报*, 2011, 35(2): 81-89.]

Distribution of *Setipinna taty* optimal habitats in the South inshore area of Zhejiang Province based on the habitat suitability index

LIU Xiaoxue¹, GAO Chunxia^{1,2,3}, TIAN Siquan^{1,2,3}, QIN Song⁴, MA Jin¹, ZHAO Jing¹

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

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

3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai 201306, China;

4. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China

Abstract: *Setipinna taty* plays an important role in the dynamics of marine ecosystems that often support valuable fisheries. To explore the temporal-spatial distribution of *S. taty* suitable habitats in the South inshore area of Zhejiang Province, the Habitat Suitability Index (HSI) was used to analyze habitat characteristics of this species based on fishery independent survey data collected in four seasons from 2016 to 2018. HSI models with two different algorithms, Arithmetic Mean Model (AMM-HSI) and Geometric Mean Model (GMM-HSI), were constructed using *S. taty* abundance and environmental variables, including water temperature, depth, and salinity. Cross validation was used to evaluate the predictive performance of AMM-HSI and GMM-HSI and the model with the best predictive performance was used to predict the most suitable *S. taty* habitat distribution. The results showed that the suitability index (SI) of each environmental variable showed considerable differences in each season. The optimal water temperature for *S. taty* is 11.2–33.6 °C, water depth is 19–46.6 m, and salinity is 27.8–33.2. GMM-HSI accuracy was higher than that of AMM-HSI, and GMM-HSI values predicted in spring, summer, and autumn were more evenly distributed at each interval than that of the AMM-HSI values. HSI model results showed that *S. taty* habitats with high suitability in spring are concentrated South of 28°N and West of 121.5°E. In summer, 27.5°N–28.5°N and east of 122°E are considerably more suitable for *S. taty*. The areas 27.5°N–29°N, west of 122.5°E and south of 27.5°N, west of 121.33°E in autumn, and west of 122.5°E in winter were found to be suitable habitats, which suggested that the optimum habitat distribution of *S. taty* changes seasonally. This was mainly related to *S. taty* migratory activities and ocean currents in the South inshore area of Zhejiang Province. Generally, the most suitable *S. taty* habitat is concentrated West of 122.5°E in winter, whereas South of 28.5°N and West of 122.5°E in spring, summer, and autumn. Therefore, the area South of 28.5°N could be recognized as the main suitable habitat for *S. taty* in the South inshore area of Zhejiang Province. This study showed that the HSI model can effectively explain the habitat distribution and changes of *S. taty* in this area, which has important significance for *S. taty* sustainable utilization. Small fishes, such as *S. taty*, are presently an important fishery focus because of overfishing and habitat degeneration in marine environments; therefore, the analysis of *S. taty* distribution is valuable for fishery resource management and conservation.

Key words: *Setipinna taty*; optimal habitat distribution; habitat suitability index; south inshore area of Zhejiang Province

Corresponding author: ZHAO Jing. E-mail: jzhao@shou.edu.cn