

文章编号: 1674-5566(2018)04-0584-10

DOI:10.12024/jsou.20180202224

## 基于栖息地适应性指数的长江口刀鲚时空分布特征

佟佳琦<sup>1,2,3</sup>, 陈锦辉<sup>4</sup>, 高春霞<sup>1,2,3,5</sup>, 戴黎斌<sup>1,2,3</sup>, 王学昉<sup>1,2,3,5</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 中国远洋渔业数据中心, 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. 长江口中华鲟自然保护区管理处, 上海 200092; 5. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 刀鲚是长江水域重要的洄游型鱼类, 现已成为国家级重点保护资源。为研究长江口刀鲚的时空分布特征, 根据 2012—2014 年长江口中华鲟自然保护区的渔业资源调查采样数据, 分析长江口刀鲚相对资源密度 (RAI) 与水深, 水温, 盐度之间的关系, 并建立栖息地适应性指数 (HSI) 模型。结果表明: 长江口刀鲚春、冬两季的 RAI 较高, 并主要分布在南支水域附近; 刀鲚种群在长江口多栖息于水深 10 m 以下, 盐度范围为 0.0 ~ 1.0 的中上层水域; 春季水温与适应性指数 (SI) 之间变化平缓, 夏、秋两季 SI 最大值分别出现在 22.5 °C 和 28.5 °C, 冬季集中分布在 15 °C 附近水域; 回归分析表明, 使用几何平均法能够更好地反映出长江口刀鲚的时空分布特征。研究分析了不同季节环境因子对刀鲚分布的影响, 依据 HSI 模型讨论了刀鲚的时空分布, 并对选用的 HSI 模型进行评价, 为保护长江口刀鲚种群并修复长江口的生态系统提供参考依据。

**关键词:** 栖息地适应性指数; 长江口; 刀鲚; 时空分布

**中图分类号:** P 723; S 931.4 **文献标志码:** A

刀鲚 (*Coilia nasus*) 又名长颌鲚, 俗称刀鱼<sup>[1]</sup>, 在我国主要分布于长江、钱塘江、淮河等通海河流, 尤以长江流域分布最为集中<sup>[2]</sup>。其在生态类型上分为定居型和洄游型, 定居型生活在长江中下游及其附属湖泊中; 洄游型则沿海生长至性成熟, 溯河至长江中下游进行产卵繁殖, 幼鱼孵化后返回海中肥育<sup>[3]</sup>。刀鲚在长江口属于溯河洄游性种类, 作为长江水域的传统渔业对象之一, 曾产量极高, 占到长江鱼类天然捕捞量的 35% ~ 50%<sup>[4]</sup>; 然而现在长江刀鲚已无法形成渔汛, 种群及个体小型化严重, 资源濒临灭绝<sup>[5]</sup>。基于当前的资源形势, 农业部建立了长江刀鲚国家级水产种质资源保护区<sup>[6]</sup>, 可见对长江刀鲚种群的相关研究已成为刻不容缓的课题。

近年来对于长江口刀鲚的研究主要围绕着长江中下游至近河口段的刀鲚生物学和生殖特征<sup>[7]</sup>、耳石形态及年龄鉴定<sup>[8]</sup>、仔稚鱼<sup>[9]</sup>、种群和

资源变动<sup>[10]</sup>等方面展开, 已经取得的相应研究成果表明刀鲚的时空分布与水温、水深和盐度等环境因子的关系密切。然而, 对于长江口近海水域刀鲚的时空分布与环境因子之间的关系研究仍有不足, 相关研究亟待开展。

栖息地指数 (Habitat Suitability Index, HSI) 模型可以很好地描述物种资源的时空分布与环境因子之间的关系<sup>[11-13]</sup>。本文根据 2012—2014 年长江口中华鲟自然保护区及其附近水域的底拖网定点渔业资源调查数据, 探讨不同季节长江口刀鲚资源密度与水深, 水温和盐度之间的关系; 同时, 通过比较不同算法下的栖息地指数模型, 选择最优 HSI 模型来分析环境因子对刀鲚时空分布的影响, 并分析环境因子与刀鲚时空分布的关系。这些研究都旨在为今后长江口刀鲚栖息地的研究提供科学依据, 从而达到养护长江刀鲚资源的目的。

收稿日期: 2018-02-13 修回日期: 2018-04-01

基金项目: 上海市科委地方能力建设项目 (18050502000); 长江口中华鲟增殖放流跟踪监测和效果评估项目 (S170062); 上海市高峰高原学科海洋科学高原学科 (沪教委科 2014-70 号)

作者简介: 佟佳琦 (1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源。E-mail: vocal\_tongjia@163.com

通信作者: 陈锦辉, E-mail: 1114260882@qq.com

### 1.1 数据来源

数据来源于 2012—2014 年,每年 2 月(春季)、5 月(夏季)、8 月(秋季)、11 月(冬季)长江口中华鲟自然保护区及其附近水域的底拖网定点渔业资源调查数据,共设 15 个调查站点(图 1)。使用网口面积为 3 m×4 m 的底拖网,以 2 kt 左右的航速在站点附近拖曳 15 min,记录调查结果包括:时间、经度、纬度、种类、数量、重量、体长等信息,渔获物数量较多时随机抽取一定比例的渔获物进行统计,最后换算成全部渔获物的数量。此外,使用 Hydrolab 水质分析仪等测量仪器同步测定各站点环境数据,环境数据包括:深度(Dep, m)、温度(Tem, °C)、盐度(Sal)等,研究水域环境数据统计值如表 1 所示。采样调查工作中,

由于受到天气、海况等较多因素的影响,各年年均有站点数据缺失的情况,统计结果见表 2。

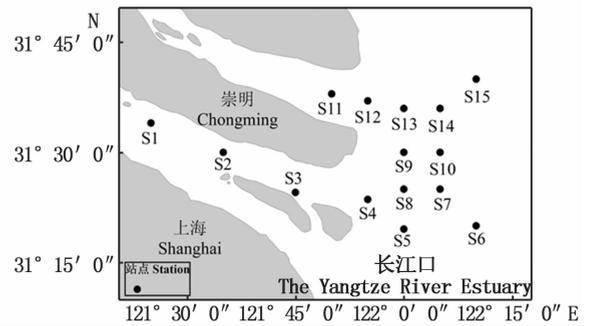


图 1 长江口渔业资源调查站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of survey stations in the Yangtze River Estuary

表 1 长江口采样调查环境数据统计值

Tab. 1 Statistics of environment sampling survey data in the Yangtze River Estuary

季节 Season	环境因子 Environmental factors	平均值 Average	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum
春季 Spring	水深/m	6.189 474	1.620 663	2.1	9.5
	水温/°C	8.918 947	2.189 365	5.6	11.8
	盐度	13.174 21	13.193 92	0	29.8
夏季 Summer	水深/m	6.9	5.951 89	1.5	16
	水温/°C	21.688	1.395 554	19.3	22.7
	盐度 Salinity	2.494	5.426 24	0	12.2
秋季 Autumn	水深/m	5.681 818	3.348 677	2	13.5
	水温/°C	28.572 73	0.925 301	26.4	30.1
	盐度	9.790 909	9.321 637	0	19.4
冬季 Winter	水深/m	6.780 952	4.602 241	2.1	20
	水温/°C	13.30 952	2.350 937	8.5	17.6
	盐度	15.171 43	11.168	0	26.2

表 2 2012—2014 年长江口渔业资源调查实际调查站点数量

Tab. 2 Actual numbers of stations of the Yangtze River Estuary fishery survey in 2012—2014

年份 Year	月份 Month	站点数量 Numbers of stations	未调查站点 Stations not surveyed
2012	2	13	S6、S7
	5	11	S2、S3、S6、S7
	8	12	S2、S6、S7
	11	11	S4、S6、S7、S8
2013	2	10	S1、S2、S3、S5、S7
	5	12	S2、S4、S7
	8	15	
	11	14	S8
2014	2	9	S1、S2、S3、S5、S9、S14
	5	11	S2、S5、S9、S14
	8	11	S2、S5、S9、S14
	11	10	S2、S5、S8、S9、S14

## 1.2 数据处理

将采样所得的渔业调查数据和同步环境数据以季度为时间尺度进行统计分析并建立模型。资源密度值 (Abundance Index, AI) 和相对资源密度值 (Relative Abundance Index, RAI) 是建立栖息地模型的重要指标, 可以描述资源的分布状况<sup>[14]</sup>, 用于建立刀鲚栖息地适应性模型。

## 1.3 栖息地模型建立

本研究利用渔获量与深度 (Dep)、水温 (Tem)、盐度 (Sal) 分别建立对应的适应性指数 (Suitability Index, SI) 关系<sup>[15]</sup>。通常, SI 的取值范围为 0 到 1, 设定取值为 1 时为最适宜刀鲚栖息的区域, 反之, 取值为 0 时, 则为最不满足刀鲚的栖息条件<sup>[16]</sup>。SI<sub>i</sub> 计算公式如下:

$$SI_{i,j} = \frac{AI_{i,j}}{AI_{i,Max}} \quad (1)$$

式中: SI<sub>i,j</sub> 为第 *i* 季第 *j* 个站点的适应性指数, AI<sub>i,j</sub> 为第 *i* 季第 *j* 个站点的资源密度值 (g/h), AI<sub>i,max</sub> 为 *i* 季的最大资源密度值 (g/h)。

选择正态函数建立 Dep、Tem、Sal 与 SI 之间的关系模型。根据所得指数关系, 采用算数平均法 (Arithmetic Mean, AM) 与几何平均法 (Geometric Mean, GM) 分别建立栖息地指数 (Habitat Suitability Index, HSI) 模型。计算公式如下:

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

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

式中: HSI<sub>AM</sub> 为算数平均法得出的栖息地适应性指数, HSI<sub>GM</sub> 为几何平均法得出的栖息地适应性指数。SI<sub>Dep</sub>、SI<sub>Tem</sub>、SI<sub>Sal</sub> 分别为用水深、水温与盐度计算出的适宜性指数。

## 1.4 模型比较

使用回归分析法来比较两种算法下观测值和预测值之间的近似程度。计算不同季度线性方程回归系数 (斜率、截距) 的平均值。当方程中截距取值为 1, 斜率取值为 0 时, 观测值等于预测值, 认为该模型为建立 HSI 模型的理想模型。通过比较 AM 模型、GM 模型与理想模型之间的关系, 选择最优模型建立 HSI 模型<sup>[17]</sup>。线性回归公式如下:

$$E = \alpha F + \beta \quad (4)$$

式中: *E* 是观测值, *F* 为预测值,  $\alpha$  为斜率,  $\beta$  为截距。

## 2 结果

### 2.1 资源密度与环境因子的关系

通过正态概率密度函数拟合 2012—2014 年不同季度环境因子与其相对资源密度之间的关系曲线 (如图 2), 拟合结果见表 3。通过研究发现, 春季调查水深范围为 2.1 ~ 9.5 m, 最适水深出现在 5.0 ~ 9.0 m 的范围内; 水温范围 5.6 ~ 11.8 °C 之间, 最适水温出现在 8.0 ~ 10.0 °C 左右; 盐度的调查范围为 0 ~ 29.8, 虽然在高盐度和低盐度区间内均有刀鲚的分布, 但 0 ~ 1.0 之间的盐度范围内的生物资源量占比达到 61.3%, 故此盐度范围更适宜刀鲚栖息。夏季水深的调查数据值在 1.5 ~ 16.0 m 之间, 水温的调查数据分布在 19.3 ~ 22.7 °C 之间, 盐度的调查数据范围为 0 ~ 12.2。通过分析发现, 夏季最适水深为 5.0 m 左右, 最适水温在 21.0 ~ 23.0 °C 之间, 最适盐度为 0 ~ 1.0 之间。秋季水深、水温、盐度的调查范围分别为 2.0 ~ 13.5 m、26.4 ~ 30.1 °C、0 ~ 19.4。经过分析发现最适秋季刀鲚栖息的水深、水温、盐度为 4.0 ~ 6.0 m、28.0 ~ 29.2 °C、0.0 ~ 1.0。冬季水深调查范围在 2.1 ~ 20.0 m 之间, 在水深 2.5 ~ 7.5 m 的范围内, 存在大量的刀鲚种群, 为当季度资源量的 54.2%, 但值得注意的是, 在 S3 站点水深为 20.0 m 的水层中, 存在冬季资源密度值的最大值。在水温方面, 冬季采样水温在 8.5 °C ~ 17.6 °C 之间, 而刀鲚主要分布在 11.0 ~ 15.0 °C 之间, 资源密度占整个季节总资源密度的 86.1%。在盐度方面, 冬季刀鲚种群所处的盐度范围为 0 ~ 26.2, 适应性指数较高值出现在 0 ~ 1.0 之间。

使用正态分布概率密度函数拟合以相对资源密度为基础的 SI 值和水深, 水温, 盐度三者之间的函数关系, 得出环境因子与 SI 之间的函数关系见表 3, 模型拟合通过皮尔逊相关显著性检验 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 模型选择

AM 模型与 GM 模型各季度线性方程的回归系数见表 4。两者观测值与预测值之间线性关系见图 3, 图中圆点表示 AM 模型, 方点表示 GM 模型, GM 模型相对 AM 模型更接近于理想模型。因此, 选用 GM 模型来建立 HSI 模型。

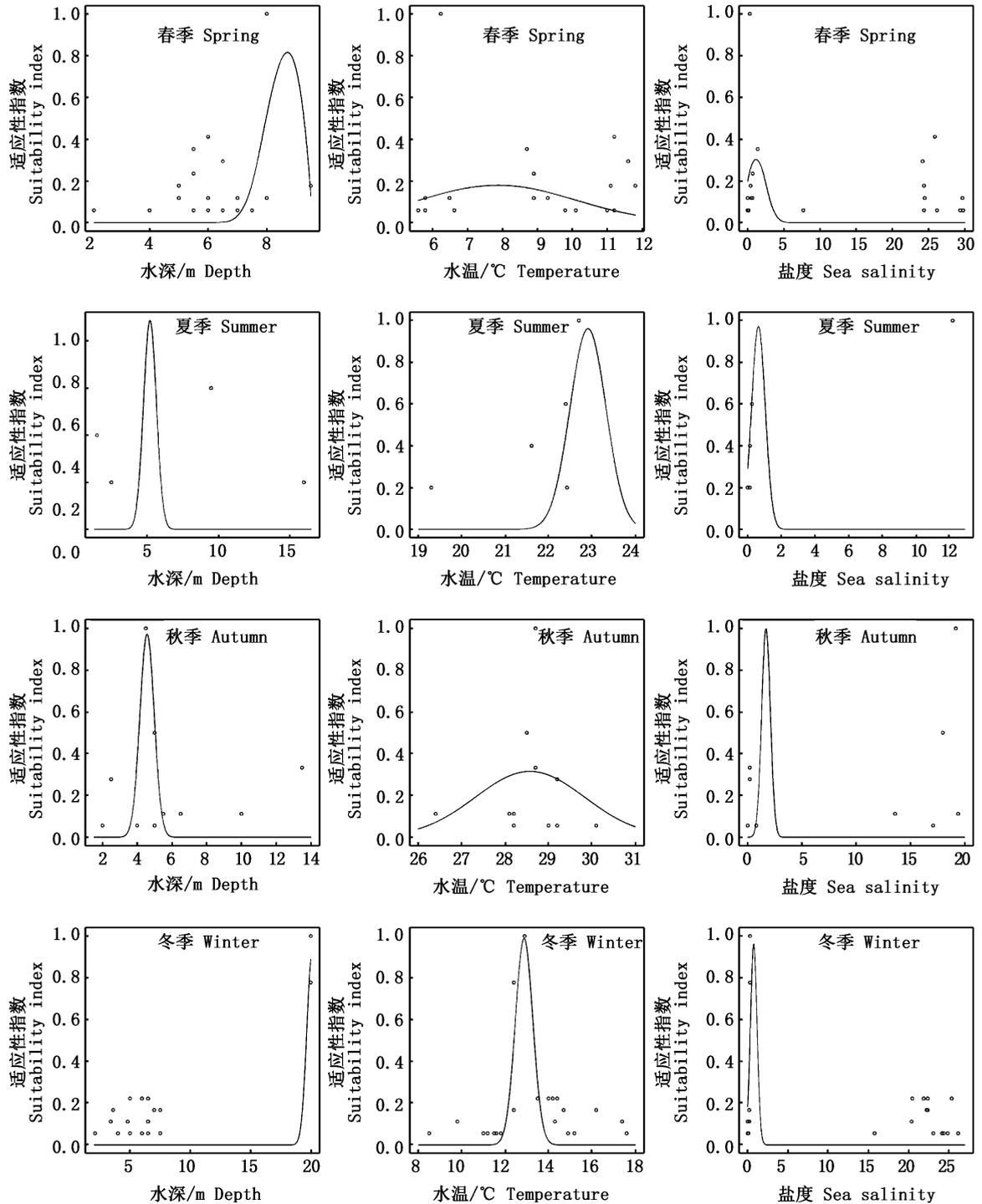


图2 不同季节刀鲚的栖息地适宜性指数曲线

Fig.2 The SI curves of *Coilia nasus* during different seasons in the Yangtze River

表 3 不同季节刀鲚适应性指数模型

Tab. 3 The SI models of *Coilia nasus* during different seasons

季节 Season	适宜性指数模型 SI model	P 值 P-value
春季 Spring	$SI_{Dep} = EXP[-0.3814 - 1.4652 \times (Dep - 8.4344)^2]$	<0.05
	$SI_{Tem} = EXP[-1.7127 - 0.1022 \times (Tem - 7.8615)^2]$	<0.05
	$SI_{Sal} = EXP[-1.1846 - 0.2939 \times (Sal - 1.2132)^2]$	<0.05
夏季 Summer	$SI_{Dep} = EXP[-0.1197 - 2.4729 \times (Dep - 5.2022)^2]$	<0.05
	$SI_{Tem} = EXP[-0.0391 - 2.9053 \times (Tem - 22.9086)^2]$	<0.05
	$SI_{Sal} = EXP[-0.0285 - 2.9673 \times (Sal - 0.6362)^2]$	<0.01
秋季 Autumn	$SI_{Dep} = EXP[-0.0270 - 2.9766 \times (Dep - 4.5606)^2]$	<0.05
	$SI_{Tem} = EXP[-1.1530 - 0.3130 \times (Tem - 28.5724)^2]$	<0.05
	$SI_{Sal} = EXP[-0.0004 - 3.1389 \times (Sal - 1.6900)^2]$	<0.05
冬季 Winter	$SI_{Dep} = EXP[-0.0886 - 2.6316 \times (Dep - 20.1054)^2]$	<0.01
	$SI_{Tem} = EXP[-0.0106 - 3.0759 \times (Tem - 12.8768)^2]$	<0.05
	$SI_{Sal} = EXP[-0.0390 - 2.9056 \times (Sal - 0.7541)^2]$	<0.01

表 4 不同季节不同模型的回归分析比较

Tab. 4 Goodness of fit test by different modeling equations during different seasons

季节 Season	斜率 $\alpha$ Slope $\alpha$		截距 $\beta$ Intercept $\beta$	
	算术平均法	几何平均法	算术平均法	几何平均法
	Arithmetic mean	Geometric mean	Arithmetic mean	Geometric mean
春季 Spring	1.150 0	0.375 7	0.074 6	0.040 5
夏季 Summer	1.576 6	0.271 3	0.013 0	0.069 8
秋季 Autumn	1.547 1	0.814 4	0.034 2	0.386 5
冬季 Winter	1.035 7	0.423 5	0.081 9	0.026 0

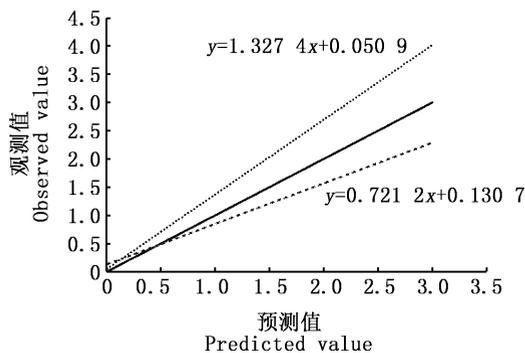


图 3 不同模型的预测值和观测值比较(圆点线表示 AM 模型,方点线表示 GM 模型)

Fig. 3 Comparison between observed values and predicted values under different modeling equations (the dot-line represent AM model and the square-line represent GM model)

### 2.3 长江口刀鲚最适栖息地分布

根据不同季节的环境数据,计算在 HSI 模型的区间内的水深均值、水温均值、盐度均值、平均相对资源密度和资源密度百分比(表 5),并绘制

HSI 指数的空间分布图(图 4)。结果表明,4 个季节的 HSI 取值较高的模型参数内,资源密度的百分比较高,证明模型取得了较好的精度;同时刀鲚在春季主要分布于水深  $8.00 \pm 0.00$  m、水温  $7.57 \pm 1.88$  °C、盐度  $0.40 \pm 0.15$  的环境中。栖息地适应性较高的地区为北港靠近崇明岛区域,长兴岛以及长江入海口处。而崇明东滩及其延伸水域分布相对较少。夏季刀鲚资源则集中分布于水深  $10.17 \pm 5.53$  m,水温  $22.51 \pm 0.17$  °C,盐度  $4.19 \pm 6.93$  的范围,整体 HSI 指数分布较为平均。秋季所得最佳栖息地的水深为  $4.83 \pm 0.29$  m、水温为  $28.47 \pm 0.25$  °C,盐度为  $12.67 \pm 10.29$ 。HSI 指数较高的值转至北港附近以及长江口  $122.08^\circ\text{E}, 31.42^\circ\text{N}$  的位置。冬季在水深为  $15.67 \pm 7.51$  m,水温在  $12.57 \pm 0.29$  °C,盐度为  $0.27 \pm 0.06$  的区域出现资源密度的最大值,HSI 较高值出现在南支北港水域及长江入海口,而在崇明东滩和北支水域内的 HSI 值较小。

表 5 不同季节 HSI 模型的环境指数和相对资源指数  
 Tab.5 The environment index, abundance index and percentage  
 of area at different HSI levels during different seasons

季节 Season	HSI 模型参数 HSI levels	水深均值/m Mean of depth (Mean + SD)	水温均值/℃ Mean of Temperature (Mean + SD)	盐度均值 Mean of Salinity (Mean + SD)	平均相对资源 密度/(尾/h) Mean of abundance index (Mean + SD)	资源密度百分比/% Percentage
春季 Spring	[0.0,0.3)	-	-	-	-	-
	[0.3,0.4)	5.83 ± 0.76	11.53 ± 0.31	24.83 ± 0.93	20.00 ± 8.00	24.2
	[0.4,0.5)	5.22 ± 1.78	7.60 ± 2.59	24.56 ± 9.54	4.80 ± 1.79	9.7
	[0.5,0.6)	5.00 ± 0.00	9.30 ± 0.00	24.50 ± 0.00	8.00 ± 0.00	3.2
	[0.6,0.7)	7.25 ± 0.35	10.65 ± 0.78	12.2 ± 17.25	4.00 ± 0.00	3.2
	[0.7,0.8)	6.41 ± 1.88	8.52 ± 1.74	0.55 ± 0.50	12.00 ± 7.16	29.0
	[0.9,1.0]	8.00 ± 0.00	7.57 ± 1.88	0.40 ± 0.15	38.00 ± 42.43	30.6
夏季 Summer	[0. ,0.6)	-	-	-	-	-
	[0.6,0.7)	2.50 ± 0.00	19.30 ± 0.00	0.00 ± 0.00	4.00 ± 0.00	8.3
	[0.7,0.8)	1.50 ± 0.00	21.61 ± 0.00	0.14 ± 0.00	8.00 ± 0.00	16.7
	[0.8,0.9)	-	-	-	-	-
	[0.9,1.0]	10.17 ± 5.53	22.51 ± 0.17	4.19 ± 6.93	12.00 ± 8.00	75.0
秋季 Autumn	[0.0,0.4)	-	-	-	-	-
	[0.4,0.5)	10.00 ± 0.00	26.40 ± 0.00	13.60 ± 0.00	8.00 ± 0.00	4.2
	[0.5,0.6)	-	-	-	-	-
	[0.6,0.7)	6.13 ± 5.31	28.83 ± 0.48	4.95 ± 9.63	14.00 ± 9.52	29.2
	[0.7,0.8)	5.50 ± 0.00	28.10 ± 0.00	19.40 ± 0.00	8.00 ± 0.00	4.2
	[0.8,0.9)	4.00 ± 0.00	29.55 ± 0.78	8.55 ± 12.10	4.00 ± 0.00	4.2
	[0.9,1.0]	4.83 ± 0.29	28.47 ± 0.25	12.67 ± 10.29	37.33 ± 34.02	58.3
冬季 Winter	[0.0,0.1)	5.39 ± 1.99	13.94 ± 2.02	22.80 ± 3.42	8.00 ± 5.16	19.44
	[0.1,0.2)	5.35 ± 1.48	12.90 ± 1.56	22.98 ± 2.01	8.00 ± 5.66	11.11
	[0.2,0.3)	5.00 ± 0.00	14.00 ± 0.00	21.90 ± 0.00	16.00 ± 0.00	5.56
	[0.3,0.4)	5.00 ± 0.00	11.80 ± 0.00	24.40 ± 0.00	4.00 ± 0.00	1.4
	[0.4,0.5)	-	-	-	-	-
	[0.5,0.6)	4.90 ± 0.14	9.15 ± 0.92	00.00 ± 0.00	6.00 ± 2.83	4.2
	[0.6,0.7)	5.00 ± 1.41	15.55 ± 2.90	10.30 ± 14.42	10.00 ± 8.49	7.0
	[0.7,0.8)	6.50 ± 0.00	17.40 ± 0.00	0.20 ± 0.00	8.00 ± 0.00	2.8
	[0.8,0.9)	-	-	-	-	-
[0.9,1.0]	15.67 ± 7.51	12.57 ± 0.29	0.27 ± 0.06	46.67 ± 31.07	48.6	

注:“-”表示未有数值出现

Notes:“-” representing no data in the statistical analysis

### 3 讨论与分析

#### 3.1 资源密度与环境因子的关系

水深是影响长江口刀鲚分布重要的环境因子。综合四季的分析结果,发现大多数刀鲚在水深 10.0 m 以下的区域中分布相对集中,也间接证实了长江口刀鲚生活在在中上层水域中。

长江口刀鲚作为溯河洄游型鱼类,洄游是刀鲚生活史的重要部分。在此期间,刀鲚对能量的消耗较大,因此对水温的要求也很高,所以水温条件将直接影响其生理活动<sup>[18-19]</sup>。刀鲚的分布依据其生理特征对环境的响应变化而发生改变。

刀鲚从春天开始进入汛期,持续 3 至 4 个月<sup>[20]</sup>;同时,刀鲚的洄游取决于是否达到洄游要求的水温条件<sup>[21]</sup>。本研究显示,春季采样的温度范围均在 12.0 ℃ 以下,整个季节不同水温下资源密度的分布相对比较平缓,但总体上呈温度越高,资源密度越大的趋势;进入夏、秋季,采样获得的数据量较少,资源密度最大的温度分别集中在 22.5 ℃ 和 28.5 ℃;冬季的资源密度集中分布在 15.0 ℃ 的区域,与郭弘艺等<sup>[22]</sup>的研究一致。由此推测,刀鲚从春季开始进行上溯,秋冬季节开始陆续返回,并且在春季 9.0 ℃ 之后资源密度增加,时间上与渔汛期的时间较为吻合。四个季节的

总体资源量较少,也证实了如今长江口刀鲚种群无法形成渔汛的现状。研究中出现鱼体较大与较小的两种体长的刀鲚,尤其是春、冬季两个季节较为明显,原因是洄游过程中的成鱼与幼鱼分别在河口区域育肥。

长江口地理位置特殊,上游流量的大小直接影响了长江口的盐度<sup>[23]</sup>。有学者证实,刀鲚在生殖洄游过程中体内的渗透压随着环境不断变化,以适应新的环境<sup>[13]</sup>,故盐度也将对刀鲚的资源密

度造成显著影响。本次四个季节的研究中,资源密度的峰值出现在盐度为 0~2.5 之间,且春季和冬季的高盐度值海域也有大量刀鲚种群的分布。由此推测,春季高盐度区出现的样本极有可能为较早进行洄游的刀鲚群体,而冬季高盐区出现的样本为刀鲚产卵后停留在附近水域进行越冬的群体。且幼鱼相较成鱼多生活在低盐度区域,而成鱼数量较幼鱼少,生活的盐度范围相对广泛。

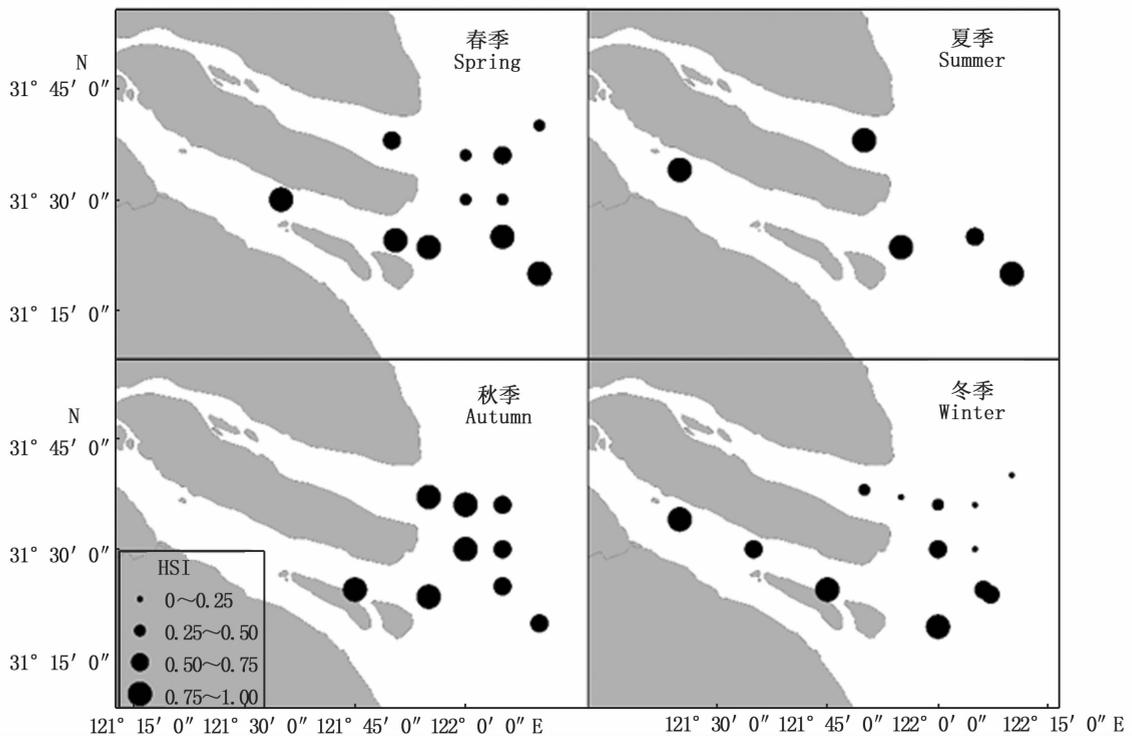


图 4 不同季节的长江口刀鲚 HSI 的空间分布

Fig. 4 The distribution of HSI in the Yangtze River Estuary during different seasons

### 3.2 基于栖息地适应指数的刀鲚时空分布

长江口刀鲚的栖息地适应性指数季节变化明显,说明了环境因子对刀鲚的分布和洄游有很大的影响。春季刀鲚的 HSI 模型指数集中在 0.3~1.0 的范围内,夏季的采样数据集中在 5 月进行,0.9~1.0 的资源密度达到 75%,且在空间上较春季有明显的上溯。秋季采样获得的刀鲚体长体质量也相对较大,分布在河口附近,而秋季到冬季的采样期间,刀鲚种群中加入开始洄游的幼鱼<sup>[24]</sup>,导致冬季在资源密度上较其他季节都有提高。

在空间分布上来看,2012—2014 年的栖息地

适应性总体符合刀鲚上溯的洄游路线,资源密度较高的地区出现在南支和北港附近,而长江口近海地区在洄游开始的夏季较少。全年通海河口分布较多,证实了刀鲚相对与近海水域主要分布在通海河口附近<sup>[10]</sup>。相对于北支,南支的盐度变化较小,并维持在较低的水平<sup>[25]</sup>,所以在相同季节中,南支的刀鲚分布要多于北支,结合本文所研究的盐度和刀鲚资源密度的关系,进一步证实盐度会影响刀鲚的资源密度,并且刀鲚幼鱼偏向于栖息在盐度变化小,盐度水平低的水域。

### 3.3 长江口刀鲚栖息地评估方法的选择

本文选用栖息地适宜性指数模型来分析长

江口刀鲚与水深,水温,盐度 3 个环境因子之间的关系。HSI 模型在评价栖息地指数方面是使用最广泛的经典模型<sup>[26]</sup>,本研究通过选取最优算法来建立 HSI 模型,取得了较好的精度。但是为了建立更全面的栖息地模型,保护物种与生态环境,下一步的研究方向可以考虑环境变量之间的相互作用与相关性,选取多元统计法来评价栖息地的适宜性<sup>[27]</sup>。例如选用栖息地各变量之间高度相关的主成分回归法(PCA)、用于处理非正常的环境变量的广义线性模型(GLM)和分析物种分布与环境变量之间的非线性关系的广义相加模型(GAM)。模糊逻辑法也在近年来的栖息地评价中使用率较高,在数据量缺乏的情况下可以处理并接受不精确的信息,但是模糊规则会随着物理参数的增加迅速增加,时间成本较高。在统计学栖息地模拟预测中,人工神经网络是较有前景的方向,适合多变量,并有一定的自学能力。因此,随着调查的不断深入,在今后的研究中可以考虑用其他的模型来综合分析环境因子的关系,通过比较和完善刀鲚的栖息地模型,为实现长江口刀鲚的保护并修复其生态系统提供参考,更为类似洄游性河口鱼类资源的保护和可持续利用提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 贺刚,方春林,吴斌,等. 鄱阳湖刀鲚生殖群体特征及状况分析[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(3): 83-88.  
HE G, FANG C L, WU B, et al. Reproductive characteristics and situation of *Coilia ectenes* (engraulidae) in Poyang Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(3): 83-88.
- [2] 袁传宓. 长江中下游刀鲚资源和种群组成变动状况及其原因[J]. 动物学杂志, 1988, 23(3): 12-15.  
YUAN C M. Change and species composition of *Coilia nasus* in the lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Zoology, 1988, 23(3): 12-15.
- [3] 郭弘艺,刘东,张旭光,等. 长江靖江段沿岸刀鲚的生长、死亡参数及种群补充[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2831-2839.  
GUO H Y, LIU D, ZHANG X G, et al. Growth, mortality and recruitment pattern of *Coilia nasus* at Jingjiang section of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(10): 2831-2839.
- [4] 田思泉,田芝清,高春霞,等. 长江口刀鲚汛期特征及其资源状况的年度变化分析[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(2): 245-250.  
TIAN S Q, TIAN Z Q, GAO C X, et al. Analyzing of annual changes for the stock status of *Coilia nasus* in fishing season in Yangtze River estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(2): 245-250.
- [5] 毛成贵,矫新明,钟俊生,等. 长江口刀鲚资源现状及保护研究进展[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2015, 24(3): 78-83.  
MAO C Z, JIAO X M, ZHONG J S, et al. Research progress on resource status and protection of *Coilia nasus* in Yangtze River Estuary [J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 24(3): 78-83.
- [6] 魏广莲,徐钢春,顾若波,等. 不同人工饲料对刀鲚幼鱼生长、血清生化指标及脂质代谢酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3567-3573.  
WEI G L, XU G C, GU R B, et al. Effects of diets on growth, serum biochemical indices and lipid metabolism in *Coilia nasus* fingerlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12): 3567-3573.
- [7] 董文霞,唐文乔,王磊. 长江刀鲚繁殖群体的生长特性[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(5): 669-674.  
DONG W X, TANG W Q, WANG L. Growth characteristics of reproductive population of *Coilia nasus* in the Yangtze River [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(5): 669-674.
- [8] 李孟孟,姜涛,陈婷婷,等. 长江安庆江段刀鲚耳石微化学及洄游生态学意义[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2788-2795.  
LI M M, JIANG T, CHEN T T, et al. Otolith microchemistry of the estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* from the Anqing section of the Yangtze River and its significance for migration ecology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2788-2795.
- [9] 李安东,钟俊生,罗一鸣,等. 长江口南支水域刀鲚仔稚鱼数量变动的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(5): 745-753.  
LI A D, ZHONG J S, LUO Y M, et al. Distribution and abundance of *Coilia nasus* larvae and juveniles in the southern branch of Yangtze River Estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(5): 745-753.
- [10] 郭弘艺,沈林宏,唐文乔,等. 基于渔捞日志的长江靖江段刀鲚渔获量的时空特征分析[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(5): 774-781.  
GUO H Y, SHEN L H, TANG W Q, et al. Distribution characteristics and temporal and spatial changes of *Coilia nasus* catches at Jingjiang section of the Yangtze River in fishing season based on the data from fishing log [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(5): 774-781.
- [11] 陈程,陈新军,雷林,等. 基于栖息地指数模型的毛里塔尼亚头足类底拖网渔场研究[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 939-945.  
CHEN C, CHEN X J, LEI L, et al. Study on fishing ground of bottom trawl based on the habitat suitability model in Mauritania [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017,

- 26(6): 939-945.
- [12] 王易帆, 陈新军. 中西太平洋鳀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.
- [13] 蒋瑞, 陈新军, 雷林, 等. 秋冬季智利竹荚鱼栖息地指数模型比较[J]. 水产学报, 2017, 41(2): 240-249.  
JIANG R, CHEN X J, LEI L, et al. A comparative study on habitat suitability index of *Trachurus murphyi* during autumn and winter [J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(2): 240-249.
- [14] CAMPBELL R A. Constructing stock abundance indices from catch and effort data: Some nuts and bolts [J]. Fisheries Research, 2015, 161: 109-130.
- [15] SU Q. Analyzing fractal property of species abundance distribution and diversity indexes [J]. Journal of Theoretical Biology, 2016, 392: 107-112.
- [16] AUBRY P, PONTIER D, AUBINEAU J, et al. Monitoring population size of mammals using a spotlight-count-based abundance index: How to relate the number of counts to the precision? [J]. Ecological Indicators, 2012, 18: 599-607.
- [17] LIB, TANAKA K R, CHEN Y, et al. Assessing the quality of bottom water temperatures from the Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM) in the Northwest Atlantic Shelf region [J]. Journal of Marine Systems, 2017, 173: 21-30.
- [18] 刘雄军, 吴小平, 欧阳珊. 不同水域刀鲚的若干生物生态学特性比较研究[J]. 生命科学研究, 2016, 20(2): 135-139.  
LIU X J, WU X P, OUYANG S. A comparative study of some biological and ecological characteristics of *Coilia nasus* in different geographical populations [J]. Life Science Research, 2016, 20(2): 135-139.
- [19] 管卫兵, 陈辉辉. 长江口刀鲚洄游群体和越冬群体能量利用方式[J]. 海洋湖沼通报, 2014(4): 35-40.  
GUAN W B, CHEN H H. Energy dynamics in anadromous *C. ectens* during spawning and overwintering in Yangtze estuary [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014(4): 35-40.
- [20] 刘凯, 段金荣, 徐东坡, 等. 长江口刀鲚渔汛特征及捕捞量现状[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3138-3143.  
LIU K, DUAN J R, XU D P, et al. Present situation of *Coilia nasus* population features and yield in Yangtze River estuary waters in fishing season [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3138-3143.
- [21] 袁传宓. 刀鲚的生殖洄游[J]. 生物学通报, 1987(12): 1-3.  
YUAN C M. Reproduction migration of *Coilia ectenes* [J]. Bulletin of Biology, 1987(12): 1-3.
- [22] 郭弘艺, 张旭光, 唐文乔, 等. 长江靖江段刀鲚捕捞量的时间变化及相关环境因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(12): 1850-1859.  
GUO H Y, ZHANG X G, TANG W Q, et al. Temporal variations of *Coilia nasus* catches at Jingjiang section of the Yangtze River in fishing season in relation to environmental factors [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(12): 1850-1859.
- [23] 孔亚珍, 贺松林, 丁平兴, 等. 长江口盐度的时空变化特征及其指示意义[J]. 海洋学报, 2004, 26(4): 9-18.  
KONG Y Z, HE S L, DING P X, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of salinity and their indicating significance in the Changjiang Estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(4): 9-18.
- [24] 袁传宓, 林金榜, 刘仁华, 等. 刀鲚的年龄和生长[J]. 水生生物学集刊, 1978, 6(3): 285-298.  
YUAN C M, LIN J B, LIU R H, et al. On the age and growth of the Chinese anchovy, *Coilia nasus*, from the Yangtze River [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1978, 6(3): 285-298.
- [25] 孙昭华, 严鑫, 谢翠松, 等. 长江口北支倒灌影响区盐度预测经验模型[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 213-222.  
SUN Z H, YAN X, XIE C S, et al. An empirical predictive model for saltwater intrusion in the South Branch influenced by tidal flow from the North Branch in the Yangtze River Estuary [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 213-222.
- [26] 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.  
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.
- [27] 易雨君, 程曦, 周静. 栖息地适宜度评价方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 887-893.  
YI Y C, CHENG X, ZHOU J. Research progress in habitat suitability assessment methods [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 887-893.

## Temporal-spatial distribution of *Coilia nasus* in the Yangtze River Estuary based on habitat suitability index

TONG Jiaqi<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jinhui<sup>4</sup>, GAO Chunxia<sup>1,2,3,5</sup>, DAI Libin<sup>1,2,3</sup>, WANG Xuefang<sup>1,2,3,5</sup>

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Data Centre for Distant-Water Fisheries of China, Shanghai 201306, China; 3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Superintendence Department of Shanghai Yangtze Estuarine Nature Reserve for Chinese Sturgeon, Shanghai 200092, China; 5. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** *Coilia nasus* is an important migration type species in the Yangtze River, and has now become a national key protection resource. In order to investigate the temporal-spatial distribution of *Coilia nasus* in the Yangtze River estuary, according to the survey data of the fishery resources investigation in Shanghai Yangtze estuarine nature during year 2012 – 2014, we analyzed the relationship between relative abundance index (RAI) and water depth, water temperature and salinity in the Yangtze River estuary, meanwhile established habitat Suitability Index (HSI) model. The results show that the RAI of spring and winter was higher, and was mainly distributed near southern branch of the Yangtze estuary. The population of *Coilia nasus* habitat in the pelagic area where water depth below 10 m, salinity range of 0 – 1.0. There is a gentle change between Tem and Suitability Index (SI) in spring, and the maximum value of SI in summer and autumn appeared at 22.5 °C and 28.5 °C respectively, in winter the population had concentrated distribution with the temperature about 15 °C. Regression analysis shows that using the geometric mean method can reflect the temporal-spatial distribution in the Yangtze River estuary better. We analyzed that the influence of different seasons and different environmental factors on the distribution of *Coilia nasus*, based on HSI model we discussed the temporal-spatial distribution of *Coilia nasus*, also evaluated the selection of HSI model. Aimed at providing some references for protecting *Coilia nasus* population and then rehabilitating the Yangtze estuary ecosystem.

**Key words:** habitat suitability index; Yangtze River estuary; *Coilia nasus*; temporal-spatial distribution