

基于北斗 VMS 数据的海州湾夏季中国毛虾栖息地时空分布及机制*

李冬佳¹ 李国东^{1,2} 熊 瑛^{1①} 宋大德^{1,3} 张成斌^{1,4} 刘 强^{1,4}
田 拓^{1,4} 梁 龙^{1,4} 王淑艳^{1,4} 张学庆⁵

(1. 江苏省海洋水产研究所 江苏南通 226007; 2. 浙江大学海洋学院 浙江舟山 316021; 3. 华东师范大学河口海岸
国家重点实验室 上海 200241; 4. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院 上海 201306;
5. 中国海洋大学环境科学与工程学院 山东青岛 266100)

摘要 探究浮游动物关键种中国毛虾(*Acetes chinensis*)在其专项限额捕捞期间的时空分布特征及环境驱动机制,对基于海洋生态系统的渔业管理至关重要。基于 2021 年北斗船位监控系统(vessel monitoring system, VMS)数据运用具有噪声的基于密度空间聚类算法(density-based spatial clustering of application with noise, DBSCAN)提取含毛虾渔获的捕捞网位,结合相应的海洋环境遥感监测数据,使用 MaxEnt 模型和地理探测器探究夏季海州湾毛虾栖息地时空分布特征及环境驱动机制。结果显示,毛虾适宜栖息区域主要集中在 3 片海域:120°01'~120°17'E、34°43'~34°47'N, 119°48'~119°58'E、34°34'~34°42'N, 119°58'~120°12'E、34°25'~34°33'N。毛虾虽为浮游性小型虾类,但其栖息地时空分布并非完全由上层余流主导,不同捕捞时期毛虾栖息地分布的主导因子有所差异。从整个捕捞时期看,水深、浮游植物丰度、海表温度和海表盐度是毛虾栖息地分布的主要驱动因子,水深 3.5~11.0 m,浮游植物丰度 9.5~17.0 mmol/m³、27.5~30.0 mmol/m³,海表温度 24.2~25.5 °C,海表盐度 21.0‰~23.6‰是海州湾毛虾适宜栖息环境。捕捞高峰期时,余流亦成为影响毛虾栖息地分布的重要因素。后期研究可建立关键种毛虾观测指标体系并进行评估,实现毛虾资源的可持续生产。

关键词 渔船监控系统;中国毛虾;栖息地;限额捕捞;海州湾

中图分类号 S931 **doi:** 10.11693/hyh20250400097

中国毛虾(*Acetes chinensis*)(以下简称“毛虾”),属于樱虾科(Sergestidae)毛虾属(*Acetes*),为浮游性小型虾类(陈立婧等, 2022)。毛虾是我国近海生态系统中大型浮游动物重要功能群的组成种类,也是生态系统中上层营养级生物小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、鳀鱼(*Engraulis japonicus*)等鱼类的重要饵料(Xiao et al, 1993; 陈立婧等, 2022)。不同于中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)等大型浮游动物,毛虾为重要的捕捞

对象,其产量居我国海洋捕捞虾类之首。2020 年,我国首次将毛虾纳入海洋伏季休渔专项捕捞对象,并在黄海海州湾实施专项限额捕捞试点,设定了毛虾捕捞时间和总许可捕捞量。随后 4 年在我国其他海域相继开展,为我国稳步推进海洋渔业限额捕捞奠定重要基础。因此,探究夏季毛虾栖息地时空分布及机制对其限额捕捞精细化管理和可持续利用乃至整个海洋生态系统的健康至关重要。

*国家自然科学基金共享航次计划 2023 年度近海生态系统健康评估重大科学考察实验研究(项目批准号: 42349301, 航次编号: NORC2024-301); 江苏省省级农业生态保护与资源利用-渔业生态与资源监测项目。李冬佳,硕士研究生, E-mail: dongjiali9807@163.com; 同等贡献第一作者: 李国东, 博士研究生, E-mail: liguodong0123@163.com

① 通信作者: 熊 瑛, 硕士生导师, 研究员, E-mail: yxiongshfu@126.com

收稿日期: 2025-04-07, 收修稿日期: 2025-06-24

北斗船位监控系统(vessel monitoring system, VMS)是以北斗卫星导航为核心,集成高精度定位、多模通信、电子海图、智能分析及数据库技术的综合监控系统,实现对船舶的全天候动态管理和安全保障。根据《北斗卫星导航系统建设与发展》报告(北斗卫星导航系统建设与发展报告编写组, 2023),我国已超 10 万艘渔船安装北斗船载终端,形成具有巨大潜力的船位大数据平台。北斗船位系统是一种同步、面广、实时的海洋全天候观测模式,其船位数据可与捕捞数据、环境数据进行耦合,以数据驱动模型进行计算并直观地呈现,这一模式突破了传统调查船的偶然性和时效性局限,并在渔船捕捞行为挖掘(Li *et al.*, 2022b)、毛虾资源分布(李国东等, 2021; 李冬佳等, 2024)及其生态系统服务(Li *et al.*, 2023a)等研究已经具备了较好的应用基础。其中,李冬佳等(2024)基于 2021 年海州湾毛虾限额捕捞期间北斗 VMS 数据提取得到各渔船捕捞网位点,然后运用具有噪声的基于密度空间聚类算法(density-based spatial clustering of application with noise, DBSCAN)进一步识别含有毛虾产量的网位点。该算法可基于数据密度有效地发现不同的簇形状,对噪声数据不敏感,无需预设簇的数量(Ester *et al.*, 1996; 伍育红, 2015),能有效提取含有毛虾渔获的捕捞网位(李冬佳等, 2024)。

最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)是一种依据最大熵原理来预测物种地理空间分布的模型。此模型通过结合已知物种存在数据和环境因子,以寻找物种分布概率的最大熵,从而对物种的分布进行评估和预测(Elith *et al.*, 2006),并具有较高的预测精度(Phillips *et al.*, 2006; 唐未等, 2022)。近年来,该模型在海洋生物生境适宜度分布研究中的应用逐渐增多(Li *et al.*, 2023b; 刘璐璐等, 2023),为海洋生物资源保护和管理提供了重要手段。地理探测器是一种基于空间异质性原理的研究方法,旨在分析空间数据并揭示其背后驱动因子的空间现象(王劲峰等, 2017)。地理探测器建模无需假设线性关系,且对多重共线性具有抗性。与传统的回归分析法相比,它能够更有效地探索影响因素间复杂的非线性关联(黄汉志等, 2023)。为此,本研究首先采用 DBSCAN 算法提取含有毛虾产量的捕捞网位点集,再结合海洋环境遥感监测数据,运用最大熵模型和地理探测器探究夏季海州湾毛虾栖息地的时空分布及机制,以期作为该海域毛虾资源的可持续利用和科学管理的决策依据。

1 数据与方法

1.1 毛虾捕捞活动

2021 年黄海海州湾毛虾限额捕捞时间为 6 月 15 日至 7 月 15 日,本文参照 Li 等(2022a)中的毛虾渔获量将限额捕捞时期依次划分为捕捞次高峰 I 期、高峰期以及次高峰期 II 期。其中,6 月 15~22 日为捕捞次高峰 I 期;6 月 23~29 日为捕捞高峰期;6 月 30 日至 7 月 15 日为捕捞次高峰期 II 期)。渔船通常以快速航行状态抵达渔场(图 1),随后进入捕捞作业阶段(细分为抛锚布网、等待渔获和起网收渔获等 3 种状态)。毛虾捕捞网具为多锚混合张网,每片网具规格为 60 m 网长×18 m 网高,单船携带网具不能超过 25 片(Li *et al.*, 2022b)。此外,由 3 名观察员分别跟随 3 艘样本渔船出海,记录样本船捕捞日志内容(含布网、起网时间和对应经纬度、水深以及捕捞产量等信息)。

1.2 数据来源和预处理

北斗 VMS 数据来源于北斗民用分理服务商,由北斗渔船终端定时发送,时间分辨率一般为 3 min,空间分辨率约 10 m (李国东, 2023)。为了降低数据量同时保持原始 VMS 数据的特性,对 32 艘渔船在限额捕捞期间的航速和航向数据进行了处理。按照时间顺序每 3 条数据取平均值进行提取。同时,为了排除无效或错误数据点,剔除了航速低于 0.1 m/s 的轨迹点,以确保所研究的渔船处于抛锚布网、起网收渔获或者快速航行状态。经过上述处理,最终获得 28 956 条有效的 VMS 数据。根据渔船的作业阶段划分、航速以及持续时长等因素,设定航速范围为 $2.3 \text{ m/s} \leq V < 3.9 \text{ m/s}$,时间阈值为 $30 \text{ min} \leq t < 60 \text{ min}$,以此提取抛锚布网状态数据点集。基于各船单次毛虾捕捞作业时长超过 3.5 h 的特点,对各渔船在抛锚布网和起网收渔过程中的点集进行网次标记。随后,运用平均中心算法计算各网次抛锚布网状态点集的经纬度,得到的中心坐标被视为每艘渔船每次捕捞的网位(含捕捞时间以及位置信息)。最后,基于毛虾张网渔船捕捞行为特征,运用 DBSCAN 算法对含有毛虾渔获的网位点进行提取,核心点和边界点为含有毛虾渔获的捕捞网位点,而噪声点则表示该网位基本无毛虾渔获。渔船一般每日进行 3 次毛虾捕捞活动,布网距离约为 4 000 m (Li *et al.*, 2022b),结合海上渔船之间合作捕捞情况,设定最小样本数 $\text{MinPts}=33$ 、邻域半径 $\text{Eps}=4\ 000 \text{ m}$ 和时间阈值 $T=24 \text{ h}$ 进行提取,并采用样本船捕捞日志对密度聚类提取的结果进行验证,通过验证的聚类模型将用于所

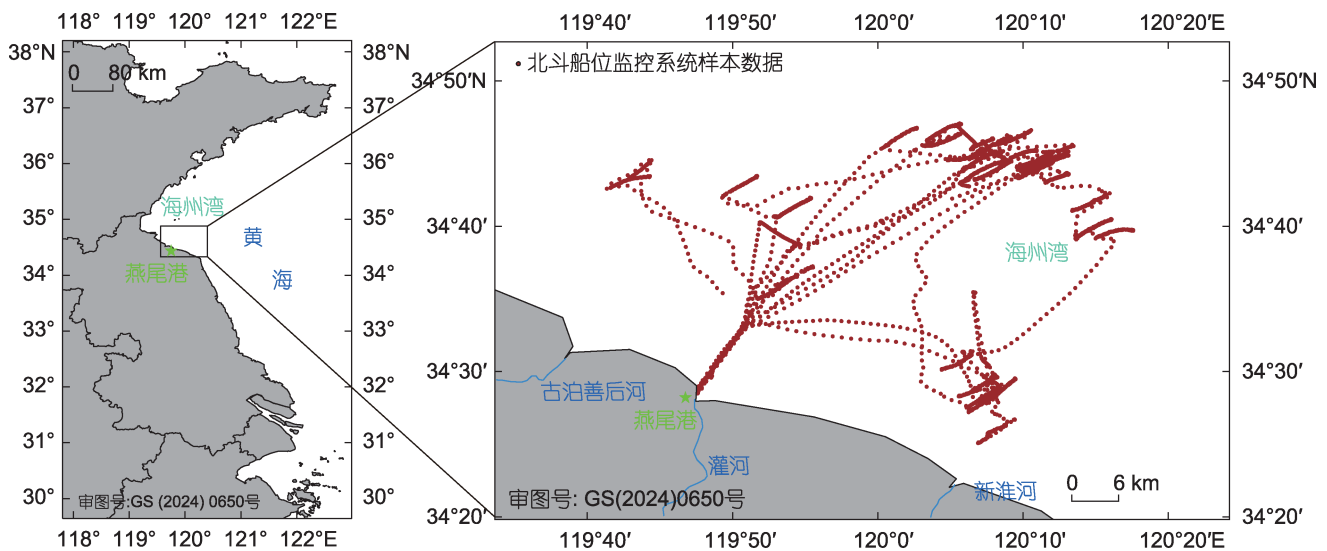


图1 中国毛虾捕捞海域及北斗船位监控系统部分样本数据

Fig.1 Fishing areas of total allowable catch project for *A. chinensis* and partial sample data from the Beidou VMS (vessel monitoring system)

有渔船的含毛虾渔获捕捞网位点识别(李冬佳等, 2024)。

毛虾栖息地分布主要受海表温度、海表盐度、海面高度、浮游植物丰度、海流(含东西向流速和南北向流速)、风(含东西向风速和南北向风速)以及水深等海洋环境因素影响(江仁等, 1983; 宋海棠等, 2012; 陈立婧等, 2022)。本研究采用的环境数据来自于 CMEMS (Copernicus-Marine Environment Monitoring Service; <https://data.marine.copernicus.eu/products>) 和 GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans; <https://www.gebco.net/data-products>), 数据原始时空分辨率见表 1。其中, 浮游植物丰度数据采用以碳浓度表征的浮游植物生物量(Assis *et al.*, 2024), 水深数据更新时间为 2017 年 12 月。由于 MaxEnt 输入数据中图层必须是同一分辨率以便匹配使用, 因此使用栅格计算工具并求平均值, 全部转换成 $0.08^{\circ} \times 0.08^{\circ}$ 空间分辨率, 数据空间范围为 $119^{\circ}49' \sim 120^{\circ}54' E$, $34^{\circ}29' \sim 34^{\circ}96' N$, 采集时间为所下网次所对应的时间。环境数据图层转换为 ASC II 格式数据, 毛虾渔获位置的经纬度数据转换为 csv 格式保存。以上操作使用 ArcMap10.8 软件完成。

1.3 毛虾栖息地模型构建及评价

1.3.1 环境因子筛选和栖息地模型构建 本研究首先分别将捕捞次高峰 I 期、高峰期、次高峰 II 期以及整个时期共 4 个时期的含毛虾渔获的捕捞网位经纬度数据与所有环境变量导入 MaxEnt (版本 3.4.1, 下载

表 1 毛虾栖息地建模所用的海洋环境变量

Tab.1 Marine environmental variables used in the habitat modeling of *A. chinensis*

环境变量	衡量单位	时间分辨率	空间分辨率	数据来源
海表温度	$^{\circ}C$	d	0.08°	CMEMS
海表盐度	‰	d	0.08°	CMEMS
海面高度	m	d	0.08°	CMEMS
东西/南北向流速	m/s	h	0.08°	CMEMS
东西/南北向风速	m/s	h	0.12°	CMEMS
浮游植物丰度	mmol/m^3	d	0.25°	CMEMS
水深	m	—	0.01°	GEBCO

注: —表示对应环境因子不考虑时间动态变化

地址: https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/) 软件进行初步建模, 运算过程中随机选取将毛虾捕捞网位中 75% 的出现点作为训练集, 剩余 25% 的出现点作为测试集验证模型。将模型重复运行 10 次, 以消除随机性, 结果使用 Logistic 格式输出。为了提高模型的准确性, 剔除初步模型贡献率 $<1\%$ 的变量, 并使用 SPSS Statistics 26.0 软件将贡献率 $\geq 1\%$ 的环境变量进行两两变量相关性分析。若两个变量的相关系数绝对值 >0.8 (Yang *et al.*, 2013), 则只保留贡献率大的变量。将筛选得到的环境因子进行 MaxEnt 最终模型的构建。

1.3.2 毛虾栖息地模型结果处理 将 MaxEnt 最终模型预测结果导入 ArcGIS 10.8 软件并转换为 Raster 格式, 得到 3 个时期及整个捕捞时期的毛虾栖息地分

布情况。为使预测结果最接近毛虾栖息地分布的真实情况,本研究采用相等间隔法划分为 5 个栖息地适宜性等级,分别是高适宜区、中高适宜区、中适宜区、中低适宜区以及低适宜区(Rahimian Boogar *et al.*, 2019; Ab Lah *et al.*, 2021)。此外,本文通过单一变量响应曲线来分析毛虾栖息地适宜性分布概率对主要环境因子的响应,进而探究毛虾栖息环境的最适范围。

1.3.3 毛虾栖息地模型评价 受试者操作特征(receive operating characteristic, ROC)曲线是以特异性为横坐标、灵敏性为纵坐标绘制的曲线(Hanley *et al.*, 1982),其曲线与横坐标之间的面积(area under the curve, AUC)用于衡量模型的整体表现并评估其准确性。AUC 值的大小反映了模型预测的准确性, AUC 值介于 0.5~0.6 表示模型的模拟效果为失败;介于 0.6~0.7 表示模拟效果较差;介于 0.7~0.8 表示模拟效果一般;介于 0.8~0.9 之间表示模拟效果较好,而介于 0.9~1.0 之间则表示模拟效果非常好(Swets, 1988)。AUC 值越接近 1,表明环境变量与预测物种地理分布之间的相关性越强,模型的预测准确度越高。

1.4 毛虾栖息地时空分布机制探测

本文运用地理探测器(GeoDetector, 下载地址: <http://www.geodetector.org/>)的分异与因子探测以及交互作用探测模块,对毛虾栖息地时空分布的驱动因素进行深入分析和探测。由于地理探测器对多重共线性具有抗性(黄汉志等, 2023),自变量选取全部 9 个环境要素(即海表温度、海表盐度、海面高度、东西向流速、南北向流速、浮游植物丰度、东西向风速、南北向风速以及水深),因变量为毛虾栖息地适宜性指数。

1.4.1 分异与因子探测 分异与因子探测用于探究因变量 Y 的空间分异性,以及探测某自变量因子 X 多大程度上解释了 Y 的空间分异(王劲峰等, 2017)。用 q 值度量,表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}, \quad (2)$$

式中, $h=1, 2, \dots, L$ 为因变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和捕捞海域的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和捕捞海域的 Y 值的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$,数值越大表明影响因子对毛虾栖息地分布的解释力越强,数值为 0 说明影响因子与毛虾栖息地分布完全无关,数值为 1 说明影响因子完全控制毛虾栖息地的分布差异。

1.4.2 交互作用探测 交互作用探测用于识别不同影响因子相互作用的结果,即评估影响因子 X_1 与影响因子 X_2 共同作用时对于因变量的解释力是否会增强或者减弱,或这些因子对于因变量 Y 的影响是独立的(王劲峰等, 2017)。设因子 X_1 与 X_2 的交互后影响力为 $q(X_1 \cap X_2)$, 若 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$, 表明两因子交互后,非线性增强;若 $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$, 表明两因子呈相互独立;若 $q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$, 表明两因子交互后,双因子增强;若 $\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$, 表明两因子交互后,单因素非线性减弱;若 $q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$, 表明两因素交互后,非线性减弱。

2 结果

2.1 影响因子筛选和栖息地模型建立

结合栖息地初步模型的贡献率和相关性分析结果,筛选得到海表温度、海表盐度、海面高度、东西向流速、浮游植物丰度、南北向风速以及水深这 7 个环境变量,并进行毛虾栖息地最终模型构建。然后,利用 ROC 曲线分析法通过计算该曲线下面积(即 AUC 值)判断毛虾栖息地模型的准确性。结果显示,各时期对应栖息地模型的 AUC 值都高于 0.9 (图 2),说明毛虾不同时期的栖息地模型拟合结果均非常好。

2.2 夏季海州湾中国毛虾栖息地分布

基于 MaxEnt 模型探究毛虾不同时期栖息地分布情况(图 3),结果显示从整个捕捞时期看,毛虾中度以上适宜栖息区域主要分布在 $120^{\circ}01' \sim 120^{\circ}17' \text{E}$, $34^{\circ}43' \sim 34^{\circ}47' \text{N}$ 、 $119^{\circ}48' \sim 119^{\circ}58' \text{E}$, $34^{\circ}34' \sim 34^{\circ}42' \text{N}$ 和 $119^{\circ}58' \sim 120^{\circ}12' \text{E}$, $34^{\circ}25' \sim 34^{\circ}33' \text{N}$ 三个区域,与样本船记录的毛虾资源丰度分布情况基本一致。捕捞次高峰 I 期毛虾中高适宜区、高适宜区聚集分布在近岸区域,即 $119^{\circ}57' \sim 120^{\circ}13' \text{E}$, $34^{\circ}23' \sim 34^{\circ}33' \text{N}$ 范围。捕捞高峰期时,毛虾栖息地高适宜区与次高峰 I 期相比有所扩大,主要分布于 $120^{\circ}07' \sim 120^{\circ}17' \text{E}$, $34^{\circ}42' \sim 34^{\circ}47' \text{N}$ 区域。捕捞次高峰 II 期时,毛虾栖息地中高适宜区明显扩大,主要分布于 $119^{\circ}48' \sim 119^{\circ}53' \text{E}$, $34^{\circ}33' \sim 34^{\circ}43' \text{N}$ 和 $120^{\circ}02' \sim 120^{\circ}13' \text{E}$, $34^{\circ}43' \sim 34^{\circ}46' \text{N}$ 两个区域。

2.3 中国毛虾栖息环境的最适范围

为探究毛虾栖息地分布概率与海洋环境要素之间的关系,本研究选用水深、浮游植物丰度、海表温度和海表盐度在 MaxEnt 模型中进行单因子建模,同时绘制

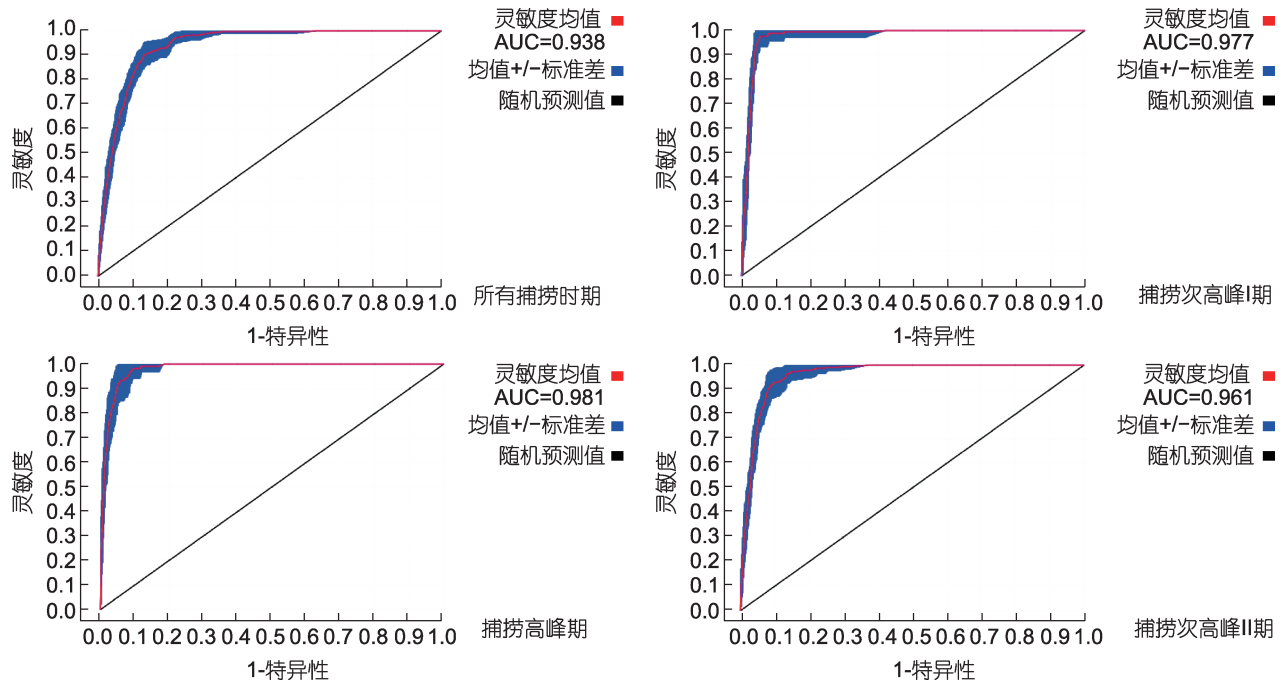


图2 基于 MaxEnt 模型的中国毛虾栖息地分布预测受试者操作特征曲线

Fig.2 The receive operating characteristics of *A. chinensis* habitat prediction based on the MaxEnt model
注: AUC: ROC 曲线下与坐标轴围成的面积(area under the curve)

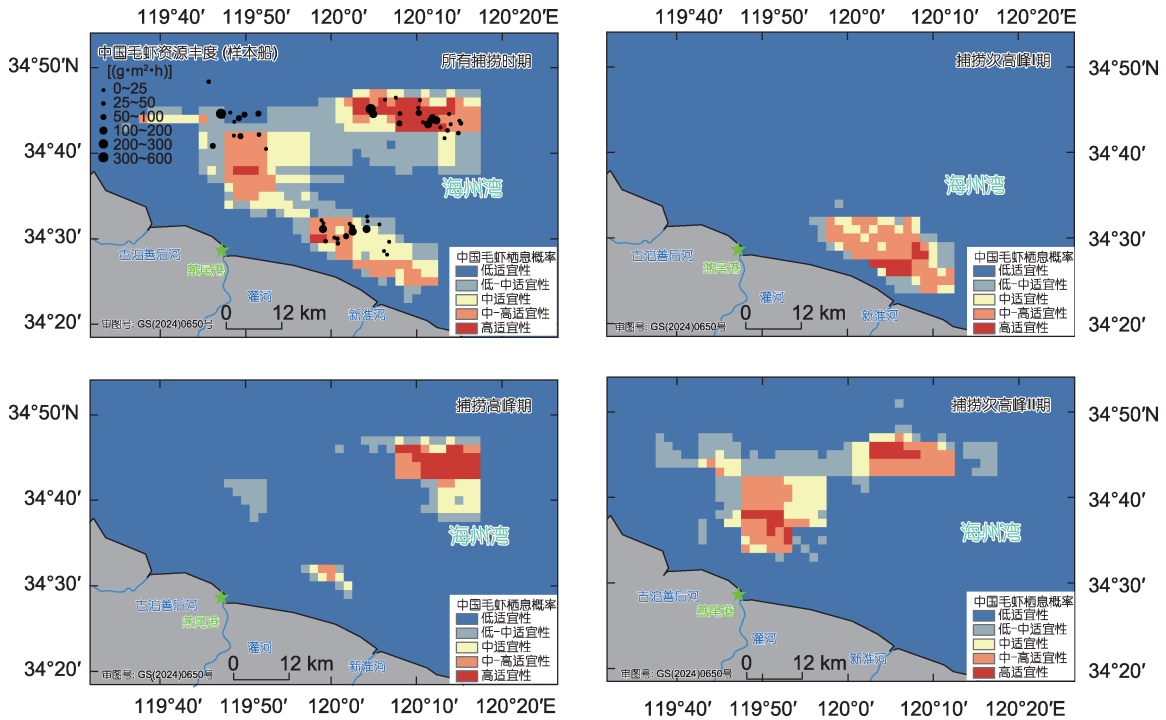


图3 基于 MaxEnt 模型的中国毛虾栖息地分布预测

Fig.3 The distribution area of *A. chinensis* habitat based on the MaxEnt model

毛虾存在概率与海洋环境因子的响应曲线。各捕捞时期毛虾栖息环境的最适范围存在明显差异(图 4~7)。从整个时期看,毛虾中等以上适宜区处于水深 3.5~11.0 m,

浮游植物丰度 $9.5\sim 17.0\text{ mmol/m}^3$ 、 $27.5\sim 30.0\text{ mmol/m}^3$, 海表盐度 $21.0\text{‰}\sim 23.6\text{‰}$, 海表温度 $24.2\sim 25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。次高峰 I 期时,毛虾中等以上适宜区处于水深 3.5~7.5 m,

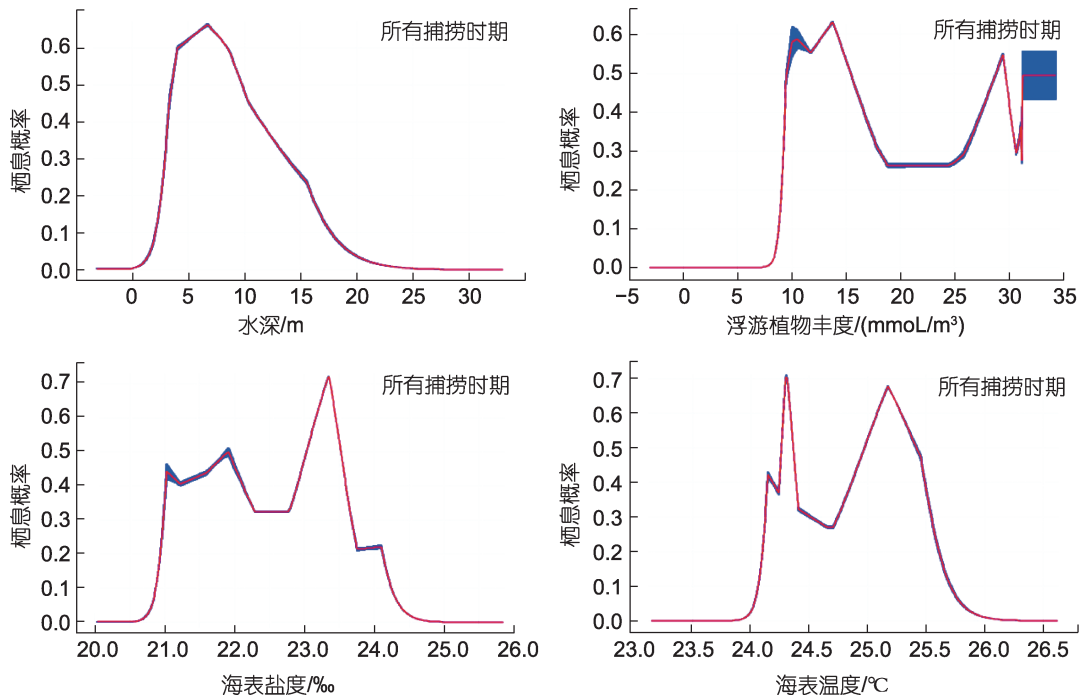


图4 整个时期中国毛虾栖息概率与环境因子响应曲线

Fig.4 Influence of environmental variables on the presence probability of *A. chinensis* in all the fishing periods
注: 红色曲线表示 MaxEnt 模型重复运行 10 次的平均响应值, 蓝色区域表示平均响应值 $\pm$ 标准差的范围

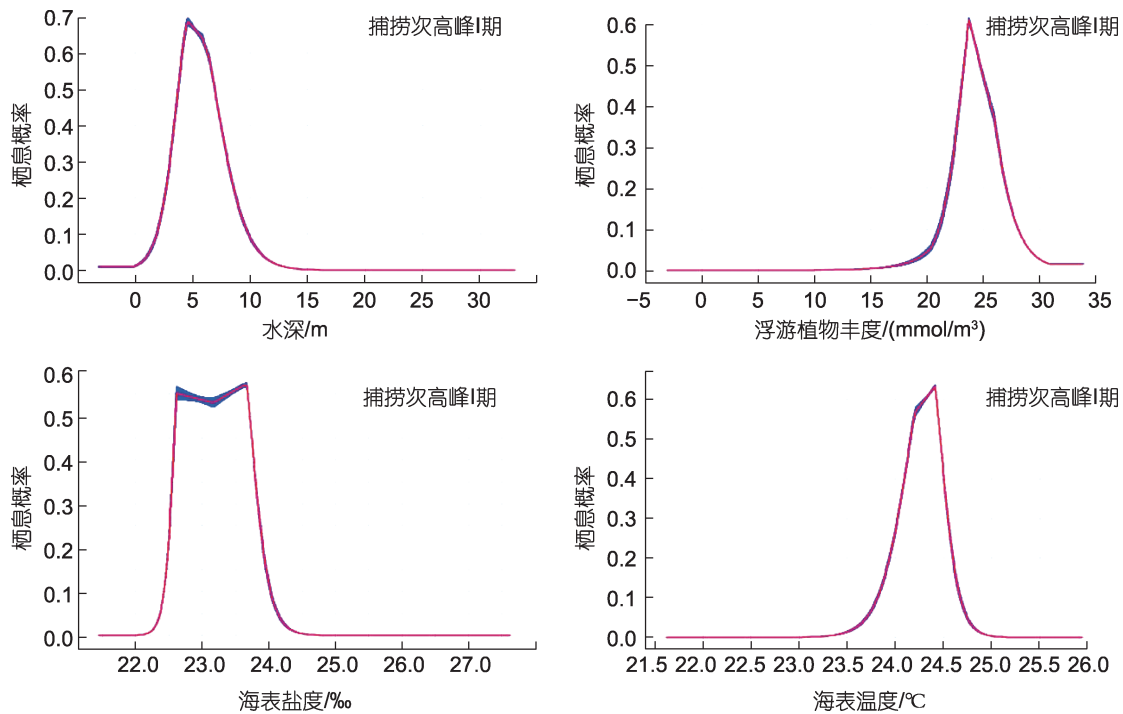


图5 捕捞次高峰I期中国毛虾栖息概率与环境因子响应曲线

Fig.5 Influence of environmental variables on the presence probability of *A. chinensis* in sub-peak catch period I
注: 红色曲线表示 MaxEnt 模型重复运行 10 次的平均响应值, 蓝色区域表示平均响应值 $\pm$ 标准差的范围

浮游植物丰度 22.5~26.0 mmol/m³, 海表盐度 22.6‰~23.7‰, 海表温度 24.1~24.5 °C。高峰期时, 毛虾中等以

上适宜区处于水深 6.5~16.0 m, 浮游植物丰度 15.0~17.0 mmol/m³, 海表盐度 24.0‰~24.6‰, 海表温度

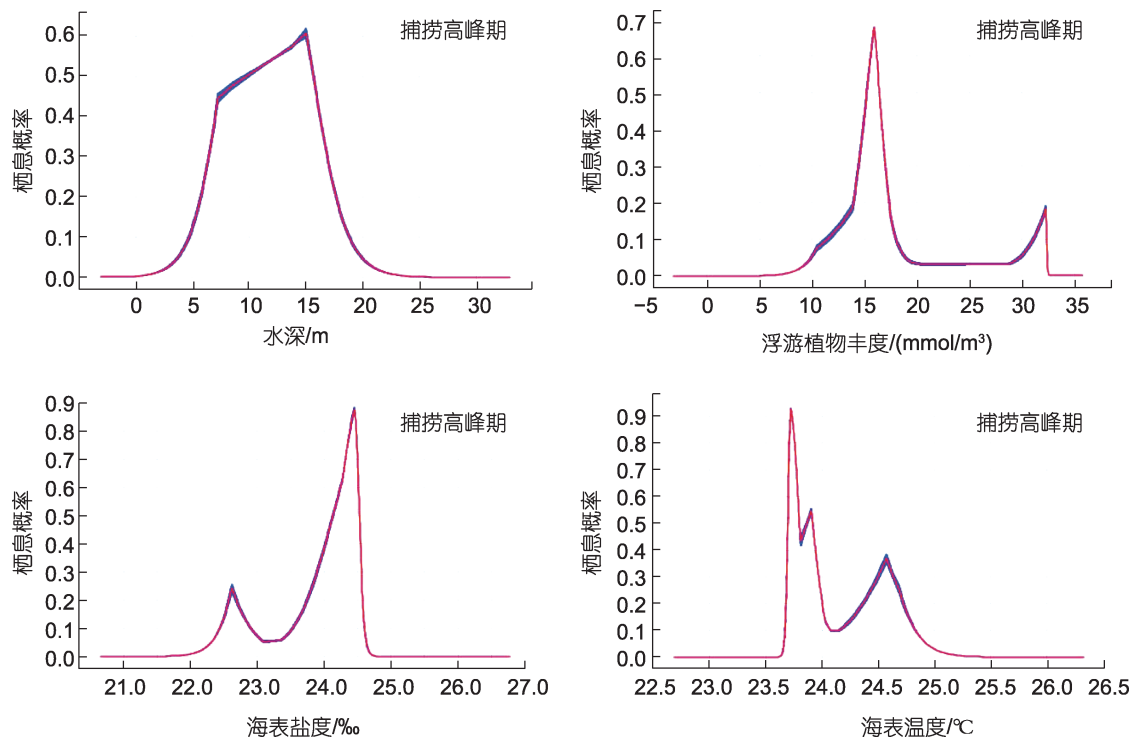


图 6 捕捞高峰期中国毛虾栖息概率与环境因子响应曲线

Fig.6 Influence of environmental variables on the presence probability of *A. chinensis* in peak catch period

注: 红色曲线表示 MaxEnt 模型重复运行 10 次的平均响应值, 蓝色区域表示平均响应值±标准差的范围

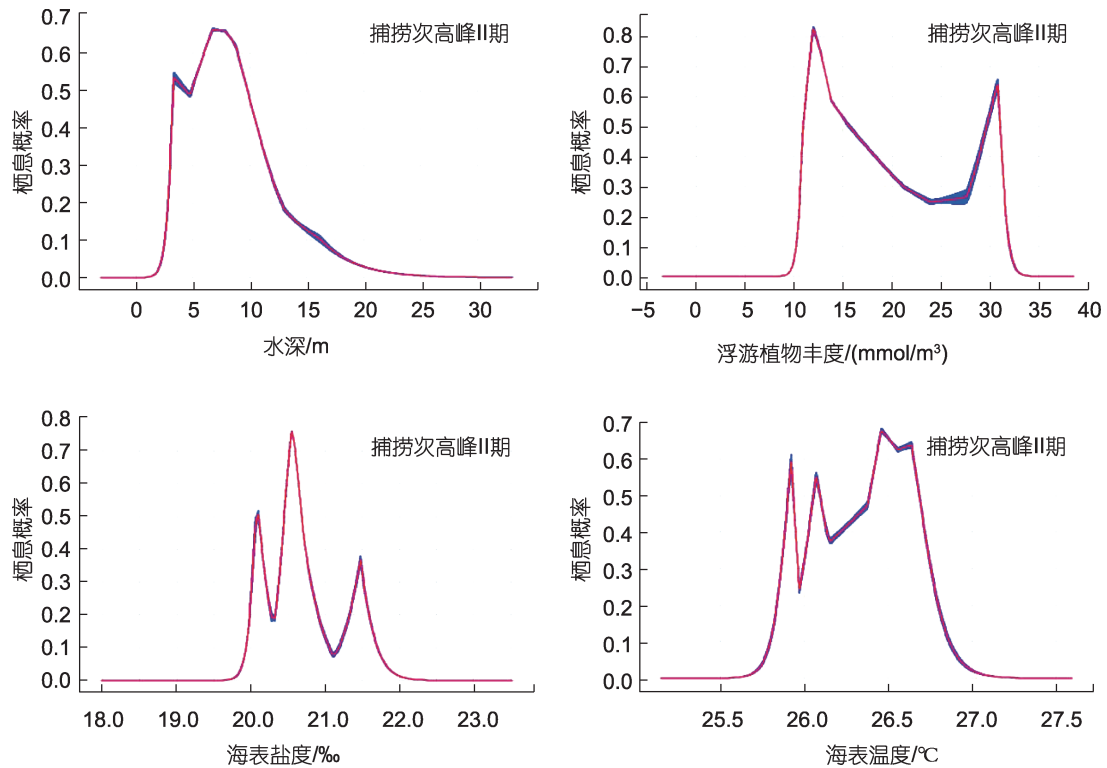


图 7 捕捞次高峰II期中国毛虾栖息概率与环境因子响应曲线

Fig.7 Influence of environmental variables on the presence probability of *A. chinensis* in sub-peak catch period II

注: 红色曲线表示 MaxEnt 模型重复运行 10 次的平均响应值, 蓝色区域表示平均响应值±标准差的范围

23.7~23.9℃。次高峰Ⅱ期时,毛虾中等以上适宜区处于水深 3.5~10.5 m,浮游植物丰度 10.5~18.0 mmol/m³、28.5~31.5 mmol/m³,海表盐度 20.1‰~20.7‰,海表温度 25.8~26.7℃。

2.4 中国毛虾栖息地时空分布机制

本文基于因子探测模块对毛虾栖息地时空分布机制进行探究,结果显示不同捕捞时期毛虾栖息地分布的主导因子有所差异(表 2)。从整个捕捞时期看,水深、浮游植物丰度、海表温度和海表盐度是毛虾栖息地分布的重要驱动因子,对应 q 值分别为 0.294、0.184、0.153 和 0.144。捕捞次高峰Ⅰ期毛虾栖息地分布的主要驱动因子与整个捕捞时期的一致,但该时期浮游植物丰度的 q 值最高,为 0.284。捕捞高峰期时,除了海表盐度和浮游植物丰度,余流因子亦成为毛虾栖息地的重要驱动因子,其中南北向流速 q 值为 0.101,东西向流速 q 值为 0.078。捕捞次高峰Ⅱ期时,

水深、海表盐度、浮游植物丰度和海面高度成为毛虾栖息地分布的主要驱动因子。

交互探测结果则进一步表明这些环境因子发生交互作用时对毛虾栖息地分布的影响(表 3~4)。从整个捕捞时期看,水深与浮游植物丰度交互作用对毛虾栖息地分布起主导作用,交互后结果为非线性增强, q 值为 0.557。水深与海表温度、海表盐度与海面高度的交互作用对毛虾栖息地分布亦起重要作用, q 值分别为 0.464 和 0.455。捕捞次高峰Ⅰ期毛虾栖息地分布的主要驱动交互因子与整个捕捞时期的一致,为水深与浮游植物丰度,且 q 值有所提升,为 0.695。捕捞高峰期时,海表盐度与海面高度、东西向流速与南北向流速、水深与南北向流速的交互作用对毛虾栖息地分布起主要作用, q 值分别为 0.495、0.403 和 0.369。捕捞次高峰Ⅱ期时毛虾栖息地分布的主要驱动交互因子为水深与海表盐度,其 q 值为 0.554。

表 2 各个捕捞时期的因子探测 q 值结果

Tab.2 The factor detection results of the presence probability of *A. chinensis* in each fishing period

环境因子	所有捕捞时期		捕捞次高峰Ⅰ期		捕捞高峰期		捕捞次高峰Ⅱ期	
	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序
水深	0.294	1	0.182	3	0.060	6	0.183	1
浮游植物丰度	0.184	2	0.284	1	0.139	2	0.105	3
海表温度	0.153	3	0.196	2	0.044	7	0.056	6
海表盐度	0.144	4	0.179	4	0.143	1	0.146	2
南北向风速	0.074	5	0.057	6	0.012	9	0.045	8
东西向流速	0.062	6	0.034	7	0.078	4	0.068	5
东西向风速	0.044	7	0.013	9	0.021	8	0.012	9
海面高度	0.040	8	0.063	5	0.064	5	0.070	4
南北向流速	0.040	9	0.023	8	0.101	3	0.046	7

注: q 值衡量自变量对因变量空间分异的解释程度

表 3 所有捕捞时期和捕捞次高峰Ⅰ期的交互探测 q 值结果

Tab.3 The interaction detection results of the presence probability of *A. chinensis* in all the fishing periods and sub-peak catch period I

所有捕捞时期				捕捞次高峰Ⅰ期			
排序	主导交互因子	q 值	交互结果	排序	主导交互因子	q 值	交互结果
1	水深∩浮游植物丰度	0.557	非线性增强	1	水深∩浮游植物丰度	0.695	非线性增强
2	水深∩海表温度	0.464	非线性增强	2	水深∩海表盐度	0.583	非线性增强
3	海表盐度∩海面高度	0.455	非线性增强	3	水深∩海表温度	0.502	非线性增强
4	水深∩海表盐度	0.452	非线性增强	4	浮游植物丰度∩海表温度	0.465	双因子增强
5	水深∩南北向风速	0.445	非线性增强	5	海表盐度∩海表温度	0.459	非线性增强
6	海表盐度∩海表温度	0.419	非线性增强	6	水深∩海面高度	0.407	非线性增强
7	海表盐度∩浮游植物丰度	0.410	非线性增强	7	浮游植物丰度∩南北向流速	0.387	非线性增强
8	海表盐度∩南北向风速	0.403	非线性增强	8	水深∩南北向流速	0.357	非线性增强
9	浮游植物丰度∩海表温度	0.391	非线性增强	9	海表盐度∩浮游植物丰度	0.326	双因子增强
10	水深∩东西向风速	0.390	非线性增强	10	浮游植物丰度∩南北向风速	0.313	双因子增强
...	...	...	...	...	...	...	...

表 4 捕捞高峰期和捕捞次高峰 II 期的交互探测 q 值结果Tab.4 The interaction detection results of the presence probability of *A. chinensis* in peak catch period and sub-peak catch period II

捕捞高峰期				捕捞次高峰 II 期			
排序	主导交互因子	q 值	交互结果	排序	主导交互因子	q 值	交互结果
1	海表盐度 $\cap$ 海面高度	0.495	非线性增强	1	水深 $\cap$ 海表盐度	0.554	非线性增强
2	东西向流速 $\cap$ 南北向流速	0.403	非线性增强	2	海表盐度 $\cap$ 海面高度	0.419	非线性增强
3	水深 $\cap$ 南北向流速	0.369	非线性增强	3	海表盐度 $\cap$ 海表温度	0.387	非线性增强
4	浮游植物丰度 $\cap$ 东西向流速	0.348	非线性增强	4	水深 $\cap$ 浮游植物丰度	0.368	非线性增强
5	海表盐度 $\cap$ 南北向流速	0.337	非线性增强	5	水深 $\cap$ 南北向风速	0.353	非线性增强
6	海表盐度 $\cap$ 东西向流速	0.306	非线性增强	6	浮游植物丰度 $\cap$ 海面高度	0.307	非线性增强
7	海表盐度 $\cap$ 海表温度	0.306	非线性增强	7	水深 $\cap$ 南北向流速	0.307	非线性增强
8	东西向流速 $\cap$ 海面高度	0.294	非线性增强	8	海表盐度 $\cap$ 南北向风速	0.274	非线性增强
9	海表盐度 $\cap$ 浮游植物丰度	0.292	非线性增强	9	海表盐度 $\cap$ 东西向流速	0.268	非线性增强
10	浮游植物丰度 $\cap$ 海面高度	0.265	非线性增强	10	水深 $\cap$ 东西向流速	0.266	非线性增强
...	...	...	...	...	...	...	...

以上地理分异探测结果表明不同捕捞阶段余流对毛虾栖息地分布的影响不同(表 2~4)。因此, 本文通过叠加各时期捕捞海域毛虾栖息适宜性与上层余流分布情况(图 8), 以进一步讨论分析限额捕捞期间毛虾栖息地时空分布机制。结果显示捕捞次高峰 I 期近岸海域上层余流为东南-西北流向、东海海域为西南-东北流向和正东流向, 平均流速约为 0.05 m/s, 该时期毛虾主要位于捕捞海域的 B 区域, 分布方向与余流方向相似。捕捞高峰期近岸海域上层余流方向与捕捞次高峰 I 期一致, 东部海域为西南-东北流向, 平均流速约为 0.14 m/s, 该时期毛虾栖息地主要位于捕捞海域的 E 区域。而捕捞次高峰 II 期东部和中西部海域上层余流分别呈现西南-东北和正北流向, 平均流速约为 0.10 m/s, 该时期毛虾主要栖息地分别位于捕捞海域的 H 和 K 区域。

3 讨论

本研究基于所有渔船的含毛虾渔获捕捞网位分布数据, 利用 MaxEnt 模型探究海州湾夏季毛虾栖息地适宜性时空分布情况, 结果显示所有捕捞时期毛虾栖息地预测结果与样本船记录的毛虾资源丰度分布基本一致, 部分区域出现不完全重叠情况是由于本研究采用的是所有渔船数据进行毛虾栖息地模型构建而非仅采用样本船数据。而且各捕捞时期对应栖息地模型的 AUC 值都高于 0.9 (图 2), 说明毛虾不同时期的栖息地模型拟合结果均非常好。基于生态位模型模拟或预测精度方面, MaxEnt 模型通常优于其他方法(Merow

et al, 2013)。Hernandez 等(2006)通过比较 MaxEnt、Bioclim、Domain 和 GARP 模型 4 种建模方法对 18 个具有不同生态等级水平的物种进行测试, 得到 MaxEnt 模型是 4 种建模方法中表现最优。Li 等(2023b)根据 2010~2019 年冬季黄海南部小黄鱼渔获分布以及海洋遥感环境数据, 运用 MaxEnt 和 GARP 模型探究小黄鱼南黄海种群越冬场分布情况, 结果显示基于 MaxEnt 探究小黄鱼越冬场分布的精准度比 GARP 模型高。相关研究也证明 MaxEnt 在大、小样本数据条件下均能很好地预测物种适宜分布区(Bai *et al*, 2018)。然而, MaxEnt 模型通过最大熵原理预测毛虾栖息地适宜性分布, 但其输出结果仅反映经过共线性检验后的单个环境因子与分布概率统计关系, 难以揭示存在共线性因子对毛虾栖息地的影响机制, 以及忽视了各环境因子间的交互作用。地理探测器模型可以分析不同影响因素的交互作用及其对响应变量的非线性关系, 同时有效避免传统回归分析中环境因子的多重共线性对结果的影响(王劲峰等, 2017; 黄汉志等, 2023)。因此, 本研究结合 MaxEnt 与地理探测器探究毛虾栖息地时空分布及机制, 既保留了 MaxEnt 的高精度预测能力, 又通过地理探测器弥补了其驱动机制解析不足的缺陷(陈梦缘等, 2024)。

海洋环境是毛虾赖以生存的基础, 其栖息分布和繁殖与海洋水文环境密切相关。春季随着沿岸海域水温的逐步回升, 越冬毛虾群体由其所分布的 50 m 等深线以东区域向近岸浅水区迁移, 进行摄食和育肥(宋海棠等, 2012)。海水温度直接影响并控制着海洋生物

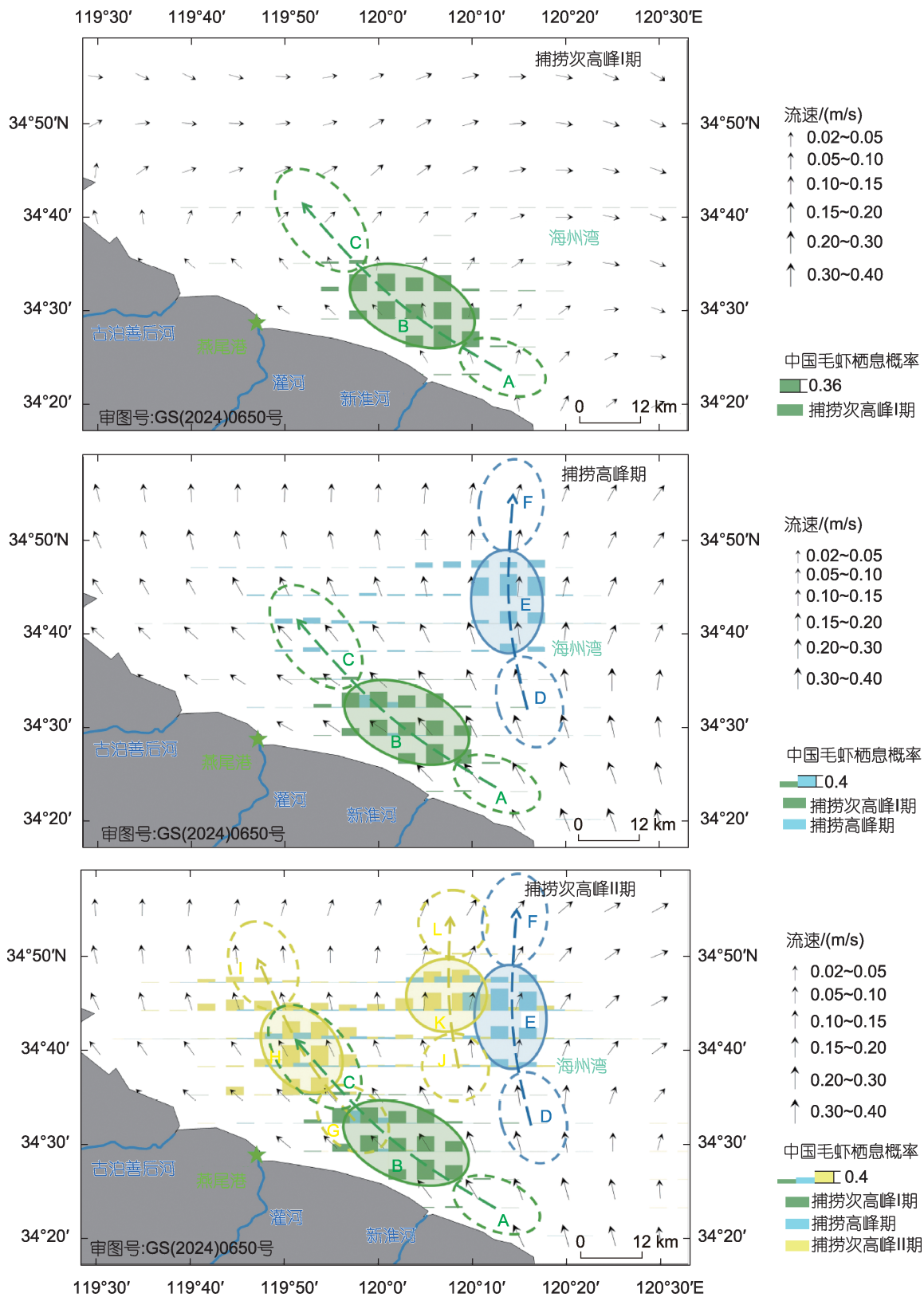


图8 捕捞海域的中国毛虾栖息适宜性与上层余流关系

Fig.8 Relationship between the habitat suitability of *A. chinensis* and the upper current

注: 实线含颜色填充椭圆代表各捕捞时期中国毛虾的已知栖息区域; 虚线箭头代表上层余流主导下的中国毛虾栖息地迁移方向, 不代表各时期中国毛虾栖息地实际迁移方向; 虚线椭圆代表在上层余流主导下中国毛虾的潜在栖息区域; 大写字母用于代表相应的栖息区域

种群分布、生长及其洄游和繁殖过程(李雪渡, 1982)。毛虾的生长发育过程受水温影响较大, 当水温高于其适温范围时, 毛虾代谢过于旺盛, 低于适温范围时, 其代谢过于缓慢, 这两种情况都会影响毛虾的生长。本研究亦发现海表温度是整个捕捞时期和次高峰 I 期毛虾栖息地分布的重要驱动因子, 中等以上适宜区海表温度范围处于 24.1~25.5 °C。这与张震东等(1987)的研究发现毛虾繁殖期的适温范围为 20~26 °C 的研究结果基本一致。5~8 月毛虾性腺逐渐成熟, 在沿岸低盐水域产卵繁殖(宋海棠等, 2012), 形成了海州湾毛虾伏季汛期。已有研究表明盐度对毛虾洄游分布的影响是在最适水温的条件下才会表现明显(曾现英等, 2016)。从整个时期看, 毛虾中等以上适宜区的海表盐度较低, 处于 21.0‰~23.6‰ (图 4)。同时毛虾成体的适宜盐度在 15.0‰~32.0‰ 之间, 幼虾适盐能力较弱, 喜居在盐度 20‰ 以上的海区(施仁德, 1986)。较低的海表盐度能够促进浮游生物的生长, 为毛虾提供好的饵料环境, 加速其生长, 从而影响毛虾的生长速率(梅永炼, 1984)。王毅波等(2019)针对渤海毛虾主要渔场的浮游植物群落结构开展研究, 其结果表明该物种的资源量波动与浮游植物现存量及空间分布存在显著相关性。安丽娜等(2021)进一步论证了浮游植物生物量及群落结构对毛虾种群动态的关键影响, 特别强调硅藻生物量与种群变动存在关系。本研究发现海州湾的海水温度在各捕捞时期均处于毛虾最适温度, 而各毛虾捕捞时期海表盐度和浮游植物丰度的 q 值都位居前列(表 2), 这表明海表盐度和浮游植物丰度是海州湾夏季毛虾栖息地时空分布的重要驱动因子。此外, 因子探测结果显示水深 q 值在除捕捞高峰期外的其他所有时期都位居前列(表 2)。从整个捕捞时期看, 毛虾中等以上适宜区主要处在 3.5~11.0 m (图 4)。该捕捞海域水深 6~12 m 等值线密集海域表明该区域水下地形较陡, 加之黄海暖流和黄海沿岸流在海州湾海域交汇形成明显的上升流(Lin *et al.*, 2019; Xing *et al.*, 2023), 在海流作用下容易将浮游生物携带到海水中上层, 从而形成相对较高的饵料丰富度及毛虾资源丰度(吴晓睿, 2023)。本文的交互探测结果显示水深与浮游植物丰度交互作用对毛虾栖息地分布起主导作用, 交互后结果为非线性增强, q 值排序最高。水深与海表温度、海表盐度与海面高度的交互作用对毛虾栖息地分布亦起重要作用。可见, 水深还通过影响该海域温度和盐度等因素, 进而影响毛虾及其饵料的分布和聚集程度。

毛虾虽为浮游性小型虾类, 但其栖息地时空分布

并非完全由上层余流主导。捕捞次高峰 I 期和次高峰 II 期上层余流及相关交互 q 值排序均较低, 表明其在这两个时期对毛虾栖息地的驱动影响较小(表 2~4)。捕捞高峰期时, 除了海表盐度和浮游植物丰度, 余流因子亦成为毛虾栖息地的重要驱动因子, 因子探测结果显示南北向流速和东西向流速 q 值排序分别为第三和第四。同时, 交互探测结果显示东西向流速与南北向流速、水深与南北向流速、浮游植物丰度与东西向流速的交互因子对毛虾栖息地分布起主要作用, q 值排序分别为第二至第四。本文通过叠加各时期捕捞海域毛虾栖息适宜性与上层余流分布情况发现, 不同捕捞阶段上层余流对毛虾栖息地分布的影响不同, 即毛虾栖息地时空分布并非完全由上层余流主导。这可能与毛虾在各水层昼夜垂直迁移有关。施仁德(1986)通过系统观测揭示了毛虾的昼夜垂直迁移规律, 日间毛虾群体多聚集于近底层水域, 夜间则迁移至表层活动, 黎明前在表层形成高密度聚集, 至正午时分则重新回归海水底层; 曾雷等(2019)声呐研究的结果与上述结论一致。Wang 等(2024)通过粒子追踪轨迹计算得到拉格朗日拟序结构来模拟海州湾夏季毛虾的分布, 但该模型未考虑到在晴天与阴天、透明度高与透明度低时对毛虾垂直移动的影响, 以及浮游植物昼夜垂直移动对毛虾因索饵而垂直移动等情况。未来研究可通过构建长时间序列毛虾资源与海洋生态环境调查数据库, 并将毛虾栖息环境偏好情况纳入生物-物理模型, 综合毛虾资源丰度指标和补充群体组成情况, 用于科学指导毛虾捕捞生产活动确保可持续利用。

4 结论

本文基于海州湾夏季北斗 VMS 数据运用 DBSCAN 密度聚类算法提取含毛虾渔获的捕捞网位, 结合相应的海洋生态环境数据, 使用 MaxEnt 模型和地理探测器探究毛虾栖息地时空分布及环境驱动机制, 这可作为其限额捕捞精细化管理的重要依据之一, 后期可进一步将栖息环境偏好纳入生物-物理模型, 并综合毛虾资源丰度指标和补充群体组成情况, 用于科学指导毛虾捕捞生产活动。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参 考 文 献

- 王劲峰, 徐成东, 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 72(1): 116-134.
王毅波, 孙延瑜, 王彩霞, 等, 2019. 夏季渤海网采浮游植物群落

- 和叶绿素 a 分布特征及其对渔业资源的影响[J]. 渔业科学进展, 40(5): 42-51.
- 北斗卫星导航系统建设与发展报告编写组, 2023. 《北斗卫星导航系统建设与发展》报告全文[R/OL]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室. (2023-04-26)[2025-06-01]. http://www.beidou.gov.cn/zt/dhnh/dssjzgwxdhnh/nhd13/202304/t20230427_26378.html.
- 伍育红, 2015. 聚类算法综述[J]. 计算机科学, 42(S1): 491-499, 524.
- 刘璐璐, 赵亮, 蔺诗颖, 等, 2023. 基于 MaxEnt 和 GARP 的阿蒙森海域南极磷虾(*Euphausia superba*)的分布区预测[J]. 海洋与湖沼, 54(2): 399-411.
- 江仁, 郭宝天, 1983. 福建沿海毛虾产量变动与气象因子的关系[J]. 海洋通报, 2(1): 69-74.
- 安丽娜, 王磊, 黄浩, 等, 2021. 大亚湾西部海域中国毛虾种群动态变化及其对环境要素的响应[J]. 应用海洋学学报, 40(3): 403-412.
- 李冬佳, 李国东, 熊瑛, 等, 2024. 基于北斗 VMS 数据和 DBSCAN 算法的夏季海州湾中国毛虾资源分布[J]. 上海海洋大学学报, 33(2): 444-451.
- 李国东, 2023. 基于北斗船位数据的海州湾夏季中国毛虾资源分布与兼捕物种变化探究[D]. 上海: 上海海洋大学.
- 李国东, 仲霞铭, 熊瑛, 等, 2021. 基于北斗船位数据的渔业信息解译与应用研究——以中国毛虾限额捕捞管理为例[J]. 海洋与湖沼, 52(3): 746-753.
- 李雪渡, 1982. 海水温度与渔场之间的关系[J]. 海洋学报, 4(1): 103-113.
- 吴晓睿, 宋大德, 熊瑛, 等, 2023. 海州湾中国毛虾(*Acetes chinensis*)种群生物学特征和资源开发状态研究[J]. 海洋与湖沼, 54(2): 573-582.
- 宋海棠, 俞存根, 薛利建, 2012. 东海经济虾蟹类渔业生物学[M]. 北京: 海洋出版社: 133-137.
- 张震东, 张树德, 王仁先, 等, 1987. 渤海毛虾和毛虾渔业[M]. 北京: 海洋出版社.
- 陈立婧, 杨帆, 仲霞铭, 等, 2022. 中国毛虾生活史研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 31(5): 1032-1040.
- 陈梦缘, 汪生财, 路琦, 等, 2024. 环渤海海岸带水鸟栖息地适宜性评价及影响因素[J]. 生态学杂志, 43(4): 1152-1160.
- 施仁德, 1986. 浙南近海中国毛虾 *Acetes chinensis* Hansen 的洄游分布及世代交替[J]. 东海海洋, 4(1): 56-61.
- 唐未, 王学昉, 吴峰, 等, 2022. 基于最大熵模型模拟西印度洋剑鱼栖息地的时空分布[J]. 海洋学报, 44(10): 100-108.
- 黄汉志, 贾俊松, 刘淑婷, 等, 2023. 2000—2020 年长江经济带碳汇时空演变及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 36(8): 1564-1576.
- 梅永炼, 1984. 南几 8~9 月份海水表盐与苍、平沿海中国毛虾产量的关系[J]. 海洋渔业(5): 198-200.
- 曾现英, 吴宁, 2016. 渤海湾、莱州湾毛虾季节分布与环境因子的关系[J]. 河北渔业, (9): 15-16, 28.
- 曾雷, 陈国宝, 王腾, 等, 2019. 大亚湾核电临近海域中国毛虾声学探测分析[J]. 中国水产科学, 26(6): 1029-1039.
- AB LAH N Z, YUSOP Z, HASHIM M, *et al*, 2021. Predicting the habitat suitability of *Melaleuca cajuputi* based on the MaxEnt species distribution model [J]. Forests, 12(11): 1449.
- ASSIS J, FERNÁNDEZ BEJARANO S J, SALAZAR V W, *et al*, 2024. Bio-ORACLE v3.0. pushing marine data layers to the CMIP6 earth system models of climate change research [J]. Global Ecology and Biogeography, 33(4): e13813.
- BAI Y J, WEI X P, LI X Q, 2018. Distributional dynamics of a vulnerable species in response to past and future climate change: A window for conservation prospects [J]. PeerJ, 6: e4287.
- ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, *et al*, 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data [J]. Ecography, 29(2): 129-151.
- ESTER M, KRIEGER H P, SANDER J, *et al*, 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise [C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Portland, Oregon: AAAI Press: 226-231.
- HANLEY J A, MCNEIL B J, 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve [J]. Radiology, 143(1): 29-36.
- HERNANDEZ P A, GRAHAM C H, MASTER L L, *et al*, 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods [J]. Ecography, 29(5): 773-785.
- LI G D, LI D J, XIONG Y, *et al*, 2022a. Changes in the resource distribution of *Acetes chinensis* and patterns of species replacement in Haizhou bay in summer based on BeiDou VMS data [J]. Regional Studies in Marine Science, 56: 102655.
- LI G D, LI D J, XIONG Y, *et al*, 2023a. Dynamic valuation of the provisioning services of marine fisheries ecosystem based on BeiDou VMS data: A case study of TACs project for *Acetes chinensis* in the Yellow Sea [J]. Ocean & Coastal Management, 243: 106773.
- LI G D, XIONG Y, ZHONG X M, *et al*, 2022b. Characterizing fishing behaviors and intensity of vessels based on BeiDou VMS data: A case study of TACs project for *Acetes chinensis* in the Yellow Sea [J]. Sustainability, 14(13): 7588.
- LI G D, XIONG Y, ZHONG X M, *et al*, 2023b. Changes in overwintering ground of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) based on MaxEnt and GARP models: A case study of the southern Yellow Sea stock [J]. Journal of Fish Biology, 102(6): 1358-1372.
- LIN L, LIU D Y, LUO C X, *et al*, 2019. Double fronts in the Yellow Sea in summertime identified using sea surface temperature data of multi-scale ultra-high resolution analysis [J]. Continental Shelf Research, 175: 76-86.
- MEROW C, SMITH M J, SILANDER J A JR, 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter [J]. Ecography, 36(10): 1058-1069.
- PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 190(3/4): 231-259.
- RAHIMIAN BOOGAR A, SALEHI H, POURGHASEMI H R, *et al*, 2019. Predicting habitat suitability and conserving *Juniperus* spp. habitat using SVM and maximum entropy machine learning techniques [J]. Water, 11(10): 2049.
- SWETS J A, 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 240(4857): 1285-1293.

- WANG K X, ZHANG X Q, LOU Q, *et al*, 2024. Lagrangian Coherent Structure analysis on transport of *Acetes chinensis* along coast of Lianyungang, China [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 42: 345-359.
- XIAO Y, GREENWOOD J G, 1993. The biology of *Acetes* (Crustacea; Sergestidae) [J]. Oceanography and Marine Biology: An Annual Reviews, 31: 259-444.
- XING Q W, YU H Q, WANG H, *et al*, 2023. An improved algorithm for detecting mesoscale ocean fronts from satellite observations: Detailed mapping of persistent fronts around the China Seas and their long-term trends [J]. Remote Sensing of Environment, 294: 113627.
- YANG X Q, KUSHWAHA S P S, SARAN S, *et al*, 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills [J]. Ecological Engineering, 51: 83-87.

SPATIOTEMPORAL DISTRIBUTION OF *ACETES CHINENSIS* HABITATS AND THE ENVIRONMENTAL DRIVERS IN HAIZHOU BAY IN SUMMER BASED ON BEIDOU VMS DATA

LI Dong-Jia¹, LI Guo-Dong^{1,2}, XIONG Ying¹, SONG Da-De^{1,3}, ZHANG Cheng-Bin^{1,4}, LIU Qiang^{1,4},
TIAN Tuo^{1,4}, LIANG Long^{1,4}, WANG Shu-Yan^{1,4}, ZHANG Xue-Qing⁵

(1. Jiangsu Marine Fisheries Research Institute, Nantong 226007, China; 2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 4. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract It is essential for ecosystem-based fisheries management to investigate the spatiotemporal distribution characteristics and environmental driving mechanisms of the key zooplankton species (*Acetes chinensis*) during its total allowable catch project period. We applied DBSCAN (density-based spatial clustering of application with noise) algorithm to process summer 2021 Beidou VMS (vessel monitoring system) data to extract information of the fishing locations associated with *A. chinensis* catches. We then combined these locations with remotely sensed marine environmental data and investigated the distribution patterns and key environmental drivers of *A. chinensis* habitats in the Haizhou Bay during summer in MaxEnt model using geographic detector method. Results indicate that suitable habitats for *A. chinensis* were concentrated in mainly three regions: 120°01'~120°17'E and 34°43'~34°47'N; 119°48'~119°58'E and 34°34'~34°42'N; and 119°58'~120°12'E and 34°25'~34°33'N. Although *A. chinensis* is a small, planktonic shrimp, its spatiotemporal distribution was not solely determined by surface residual currents, and the dominant factors influencing its distribution varied in different fishing periods. In the entire fishing season, the water depth, phytoplankton abundance, sea surface temperature, and sea surface salinity emerged as critical drivers of the habitat distribution. The optimal conditions in Haizhou Bay were determined as: water depth of 3.5~11.0 m, phytoplankton abundance of 9.5~17.0 mmol/m³ or 27.5~30.0 mmol/m³, sea surface temperature of 24.2~25.5 °C, and sea surface salinity of 21.0‰~23.6‰. During the peak catch period, surface residual currents became an additional important factor on the distribution of the shrimp habitats. Future research shall focus on developing a comprehensive observation indicator system for this key species and conducting further assessments to ensure the sustainable production of *A. chinensis* resources.

Key words vessel monitoring system; *Acetes chinensis*; habitat; total allowable catch system; Haizhou Bay