

DOI: 10.12264/JFSC2024-0252

基于 MaxEnt 模型的浙江近岸黄鲫潜在适生区分布研究

李齐群^{1,2}, 蒋日进², 赵芃^{1,2}, 张秋宏^{1,2}, 刘明智^{1,2}, 申家荣^{1,2}, 张洪亮²,
朱文斌², 龙翔宇²

- 浙江海洋大学海洋与渔业研究所, 浙江 舟山 316021;
- 浙江省海洋水产研究所, 农业农村部重点渔场渔业资源科学观测实验站, 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室, 浙江 舟山 316021

摘要: 为了解浙江近岸黄鲫(*Setipinna taty*)的分布特征, 基于浙江近海产卵场底拖网调查获得的 81 条分布点记录数据, 结合该海域盐度、叶绿素 a 以及初级生产力等 6 个海洋环境因子数据, 利用最大熵模型(MaxEnt)预测黄鲫潜在适生区的空间分布, 并探究其分布与主要影响因子的关系。结果表明, MaxEnt 模型对黄鲫潜在适生区的模拟结果具较好的预测精度和可信度(AUC=0.812)。黄鲫潜在适生区分布的主要影响因子为盐度、叶绿素 a 及初级生产力, 其中盐度的贡献率最高(49.10%), 是影响黄鲫分布的重要因子。黄鲫高适生区集中分布于舟山渔场北部、杭州湾、象山县、三门县附近海域以及温州近岸海域, 约占该海域面积的 22.88%, 其余潜在适生区以高适生区为中心向外扩张。研究旨在为浙江近岸海域黄鲫资源的保护与可持续性利用提供理论依据。

关键词: MaxEnt; 潜在适生区; 黄鲫; 影响因子; 浙江近岸海域

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)01-0093-10

浙江近岸岛屿众多, 受浙闽沿岸流、台湾暖流及江河冲淡水等因素综合影响^[1], 海域营养盐、饵料丰富, 为海洋生物栖息、生长及繁殖提供了适宜条件^[2]。鱼类对水温、盐度、深度、叶绿素 a 以及 pH 等环境因素有着非常严格的适应性, 往往只在特定的环境生长与繁殖, 这一特性常被应用于鱼类栖息地适宜性研究^[3]。因此, 了解鱼类适生区的选择与环境影响因子之间的关系, 预测潜在适生区分布, 阐明其空间分布格局特征以及影响因素, 对渔业资源可持续利用和渔业管理具有积极意义。

黄鲫(*Setipinna taty*)为近海中上层暖水性鱼类, 广泛分布于我国近海^[4], 是沿岸定置网、张网及拖网等的兼捕种类, 具有生长迅速、性成熟较早、资源恢复能力较强的特征。由于捕捞强度不

断增加和栖息地破坏, 浙江近岸重要经济鱼类如蓝点马鲛^[5](*Scomberomorus niphonius*)、大黄鱼^[6](*Larimichthys crocea*)以及带鱼^[7](*Trichiurus lepturus*)等资源状况呈现明显衰退趋势, 捕捞对象逐渐向小型鱼类转变, 黄鲫成为现阶段海洋捕捞的主捕对象^[8-9]。但国内学者针对黄鲫的研究整体侧重于遗传学^[10]、摄食习性^[11]以及数量分布特征^[12]等方面, 目前关于黄鲫适生区适宜性的研究尚少, 亟待开展相关研究。

不同物种的分布受环境变化的影响存在差异^[13]。物种分布模型(species distribution models, SDMs)是预测物种潜在适生区分布的重要工具^[13], 近年来已被广泛应用于海洋鱼类^[14]、底栖动物^[15]、浮游生物^[16-17]等。常用的物种分布模型包括广义线性模型(generalized linear models, GLM)、广义加性

收稿日期: 2024-08-23; 修订日期: 2024-11-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401901); 农业农村部委托项目“浙江近海重要经济种产卵场调查与评价”(HYS-CZ-202416).

作者简介: 李齐群(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: 2911708452@qq.com

通信作者: 蒋日进, 高级工程师, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: jiangridge@163.com

模型(generalized additive model, GAM)、人工神经网络(artificial neural networks, ANN)、最大熵模型(maximum entropy, MaxEnt)和随机森林(random forests, RF)等^[18-19]。其中, MaxEnt 模型具有适应性强、对物种分布数据量需求小以及在各环境要素关联性不明确的情况仍可以获得较高的预测精度等优势,是预测物种潜在适生区分布的常用方法^[20]。曹睿星等^[21]利用最大熵和栖息地指数模型对东、黄海日本鲭(*Scomber japonicus*)栖息地适宜性分布进行了预测,结果表明 MaxEnt 模型的预测效果更优异。刘璐璐等^[22]基于 MaxEnt 和 GARP 两种物种分布模型预测了阿蒙森海域南极磷虾(*Euphausia superba*)的潜在分布区,分析发现 MaxEnt 模型划分的高适生区范围更细致。目前, MaxEnt 模型已广泛应用于国内外海洋生物潜在适生区分布研究^[23-24]。

本研究基于 81 条分布点记录和盐度、叶绿素 a 以及初级生产力等 6 个影响因子数据,利用 MaxEnt 对黄鲫栖息地适宜性进行建模预测,旨在掌握黄鲫潜在适生区的空间分布情况,探究其分布与主要影响因子的关系,并为浙江近岸海域黄鲫资源保护与可持续性利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 鱼类分布点数据的收集与整理

黄鲫分布点数据来源于浙江近海产卵场海域 2020—2022 年各年春季(4 月)与秋季(11 月)、2023 年冬季(2 月)、夏季(7 月)以及杭州湾海域 2022 年春季(4 月)、秋季(11 月)、2023 年夏季(7 月)进行的共 11 个航次的单船底拖网调查获得的 98 条分布点数据。调查网具为单船底拖网,其网口拉紧周长 50 m、网身拉紧长度 48 m、下纲 37 m、上纲 30 m、网囊目大 25 mm。每个站位设定拖网时间 1 h,平均拖速控制在 3 节。渔业调查与样品采集均按照《海洋调查规范》有关规定进行^[25]。采集的信息通过 Excel 删除记录重复位点数据;为防止预测结果过度拟合,将分布点数据导入 ENM Tools 软件中,自动匹配环境影响因子栅格大小,筛选去除同一栅格中的冗余位点^[26],最后筛选出共计 81 条分布点数据(图 1)。

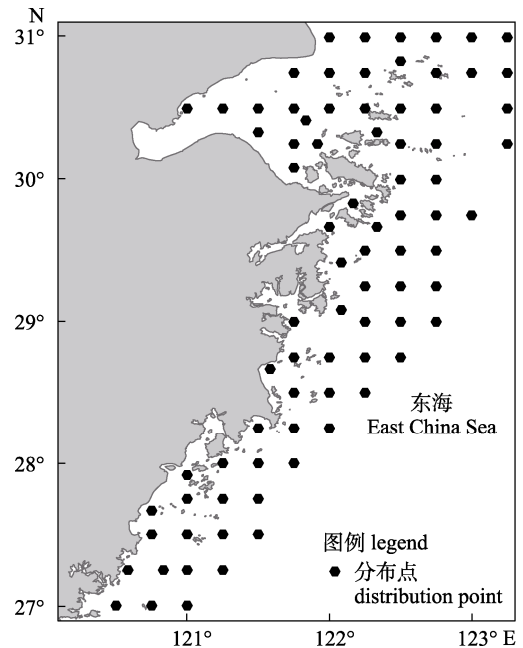


图 1 浙江近岸黄鲫分布点

Fig. 1 Distribution points of *Setipinna taty* in the coastal waters of Zhejiang

1.2 海洋环境数据

海洋环境数据集(1910—2009 年)来源于全球海洋环境数据库(Global Marine Environment Datasets, GMED)。本研究选取 9 个环境变量用于模型构建,其中包括 3 个化学因子,即初级生产力(primary productivity)、叶绿素 a (chlorophyll a)和酸碱度(pH)以及 6 个物理因子,即表层温度最大值(maximum sea surface temperature)、表层温度最小值(minimum sea surface temperature)、盐度(salinity)、波高(wave height)、潮汐平均值(tide average)和深度(depth)。数据集坐标系统一为 WGS1984,空间分辨率为 5'(约 9.2 km)。所有环境数据通过 Arc GIS 10.8 软件处理。

1.3 物种分布模型

1.3.1 MaxEnt 模型原理 MaxEnt 模型最早于 2006 年由 Phillips 等^[27]提出,是基于最大熵原理构建的物种分布预测模型。该模型根据已知物种分布点数据和环境影响因子,模拟物种在自然条件下所需的基础生态位,对其在研究范围内的适宜分布区进行预测^[28-29]。

1.3.2 环境变量的相关性检验与筛选 将 98 个分布点的所有数据和环境变量导入 MaxEnt 3.4.4 软件

(https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/), 勾选随机种子(random seed), 将 75% 的分布点用于训练集以拟合模型, 剩余 25% 的分布点用于测试集以评估模型, 正规化参数(regularization multiplie)设置为 1, 选用 Bootstrap 抽样方法, 背景点数的最大数目(max number of background points)设定为 10000, 最大迭代次数(maximum iterations)设置为 500; 为消除随机性和重复数值, 重复运算(reolicates)设定为 10 次, 取其平均值为潜在分布概率, 并采用刀切法(Jackknife)检验各环境变量在模型运行中的重要

性和贡献率^[30], 其余软件参数为系统默认值, 以 logistic 格式输出结果。为避免构建的数据过度拟合影响模型结果^[31], 需要对影响因子进行相关性剔除。采用 ENM tools 工具中的“Correlation”进行 Pearson 相关系数检验, 得到影响因子相关性系数热图(图 2), 同时结合 MaxEnt 模型的刀切法所得的贡献率, 剔除相关性过高($|r| \geq 0.8$)和贡献率小于 1%^[32-33]的深度、表层温度最小值与波高 3 个影响因子, 将表层温度最大值、盐度、初级生产力、pH、叶绿素 a 以及潮汐平均值 6 个影响因子用于构建模型。

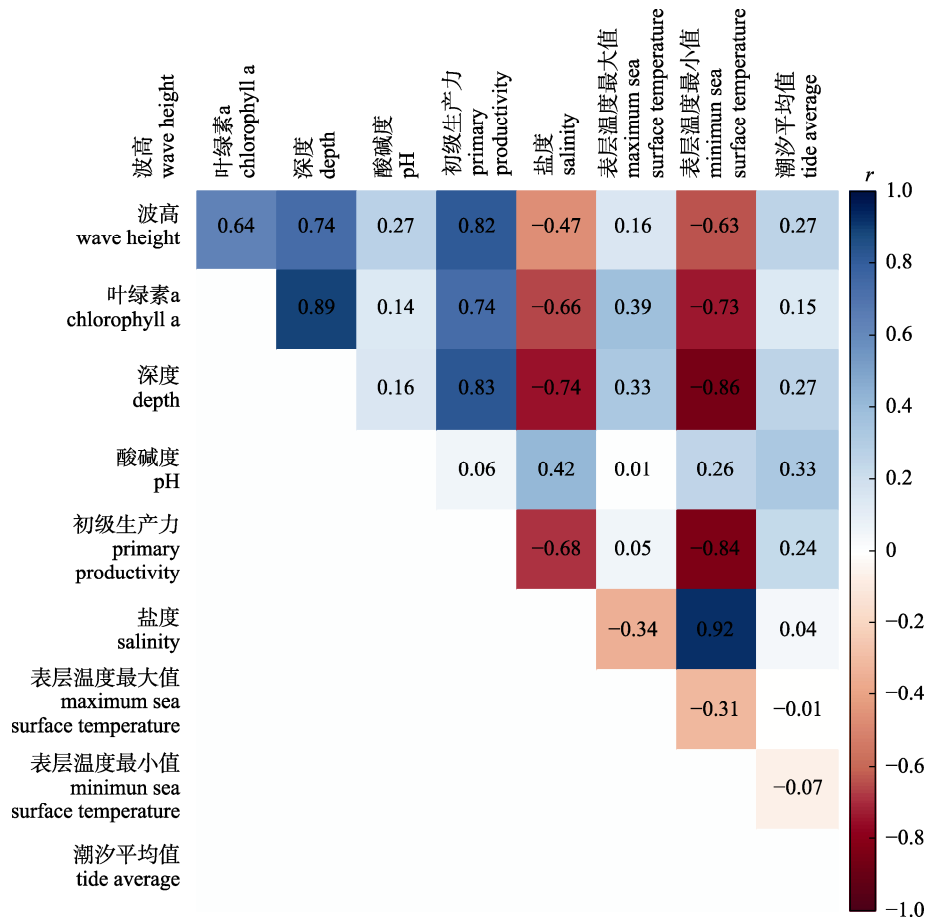


图 2 影响因子 Pearson 相关性系数

Fig. 2 The Pearson correlation coefficients of influence factors

1.3.3 MaxEnt 模型精度检验 本研究采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)对模型进行验证, 通过计算 ROC 曲线下的面积(area under curve, AUC)的大小作为衡量模型精确度的指标, 其范围为 0~1; AUC>0.7, 即可判定该模型可用来模拟物种潜在分布^[34];

AUC 数值越大, 表明模拟的精度越高。

1.3.4 主要影响因子的确定 基于筛选后的环境变量, MaxEnt 模型采用两种方法评估其对黄鲫分布的影响。一种为 PC-PI 法, 贡献百分率(percent contribution)为各个环境变量对黄鲫分布的贡献程度, 其值越高, 说明该环境变量对黄鲫分布的

影响越大;置换重要性(permutation importance)是通过随机置换环境变量值,依据模型模拟结果的 AUC 值(曲线下面积)变化来评估环境变量的重要性。AUC 值是模型预测准确性的评估指标,其值越高,模型对物种分布的预测能力越强。其次是刀切法检验因子得分法,其判定依据是“仅此变量”条带越长,说明该变量对物种分布预测能力越强;“除此变量”条带排除某一特定变量,若模型性能显著下降(即条带较短),则表明该变量具有独特的信息,对物种分布较为重要。综合两种方法,确定影响黄鲫分布的主要影响因子。结合前人在运用 MaxEnt 模型对潜在适宜适生区进行预测的相关研究^[35-36],本研究以预测概率 $P=0.5$ 为预测阈值。

1.3.5 预测适生区划分 利用 Arc GIS 10.8 格式转换工具将 MaxEnt 软件输出的 ASC II 格式文件转换为 Raster 格式文件,使用分析工具对其进行重分类,选取适宜的阈值,本研究将黄鲫的适生等级划分为非适生区($P<0.05$)、低适生区($0.05\leq P<0.3$)、中适生区($0.3\leq P<0.5$)和高适生区($P\geq 0.5$)^[37]。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型精度检验

黄鲫 MaxEnt 模型的 AUC 检验值如图 3,平

均 AUC 值为 0.812,所有模型 10 次迭代后的标准差均低于 0.02 (0.014),表明模型运行稳定,结果波动性较小。综合所述,黄鲫 MaxEnt 模型的预测性能较好,具有较强的预测精度及可信度^[38],可支持后续分析。

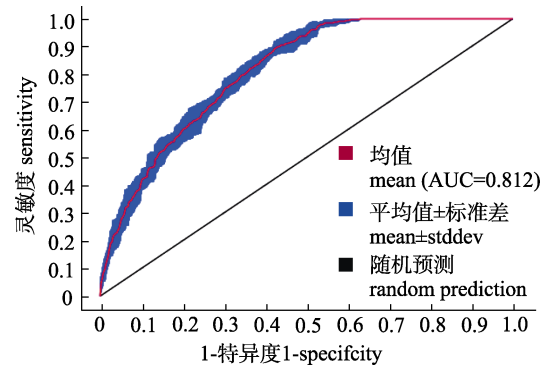


图 3 MaxEnt 模型检验的 ROC 曲线

Fig. 3 ROC curve of MaxEnt model test

2.2 物种对环境因子的响应

物种分布环境变量的贡献率和置换重要性如表 1 所示,盐度和叶绿素 a 贡献率分别为 49.10%、31.70%,累计贡献率达 80.80%,置换重要性分别为 14.50%、46.30%;剩余环境因子平均贡献率均低于 10%,表明以上盐度和叶绿素 a 是黄鲫分布的主要影响因子。其中盐度的贡献百分率最高,是影响黄鲫分布的重要因子。

表 1 物种分布环境变量的贡献率及置换重要性

Tab. 1 Contribution rate and permutation importance values of environmental variables in species distribution

环境变量 environmental variable	单位 unit	贡献率/% percent contribution	置换重要性/% permutation importance
盐度 salinity		49.10	14.50
叶绿素 a chlorophyll a	mg/m ³	31.70	46.30
酸碱度 pH		7.40	7.20
表层温度最大值 maximum sea surface temperature	°C	5.10	11.30
初级生产力 primary productivity	mg C/(m ² ·d·cell)	3.60	14.80
潮汐平均值 tide average	m	3.10	5.90

经刀切法检验得到各环境变量对黄鲫分布的影响如图 4 所示,叶绿素 a>初级生产力>盐度>潮汐平均值>pH>表层温度最大值,使用所有影响因子时得到的测试增益值为 0.812。其中,单独使用叶绿素 a 和初级生产力因子进行检验时,所获得的训练增益值均超过 0.68,说明该变量含有对模

型最有用的信息,表明其对黄鲫分布的影响较大;盐度和潮汐平均值的训练增益值为 0.60~0.68,对模型构建也有一定影响,表明其对黄鲫分布的影响具有一定的参考信息;其余变量训练增益值低于 0.60,对模型的影响有限,表明对黄鲫分布的影响较小。使用去除该变量外的其他影响因子进

行检验时, 叶绿素 a、pH、初级生产力以及盐度因子的训练增益值减小, 表明其含有其他影响因子不具备的独特信息, 对黄鲫分布的影响较为重要; 其中, 叶绿素 a 和 pH 因子的训练增益值减小最大, 说明它们具有其他影响因子中更多不存在的信息, 表明其影响黄鲫潜在适生区分布的因素更多。

结合 PC-PI 法与刀切法检验因子得分法, 影响黄鲫潜在适生区分布的主要因子为盐度、叶绿素 a 和初级生产力。

响应曲线是表示黄鲫出现概率与影响因子变

化的响应(图 5)。结果表明, 盐度介于 28.7~29.0 时, 黄鲫的出现概率达到最高; 盐度 29.0~30.0 时, 黄鲫存在的概率随着盐度的升高而逐渐增加; 随之缓慢降低, 达到 32 时黄鲫存在的概率随着盐度的增加呈急剧下降趋势。初级生产力响应曲线随着初级生产力升高, 黄鲫的出现概率先升高后降低, 当初级生产力为 2700 mg C/(m²·d·cell)时, 黄鲫的出现概率随着初级生产力升高而增加, 随后趋于不变。叶绿素 a 响应曲线随着叶绿素 a 增加呈上升趋势, 随后趋于不变。

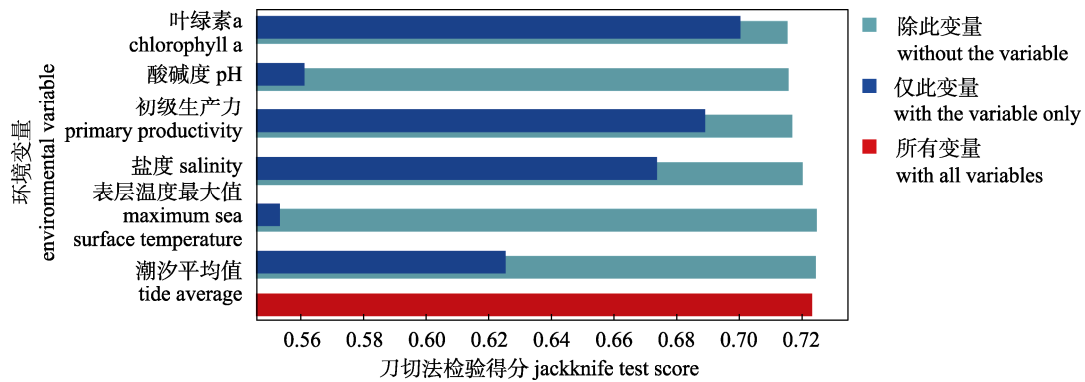


图 4 刀切法检验影响因子对黄鲫分布影响的重要程度

Fig. 4 The importance of influence factors on the distribution of *Setipinna taty* tested by jackknife method

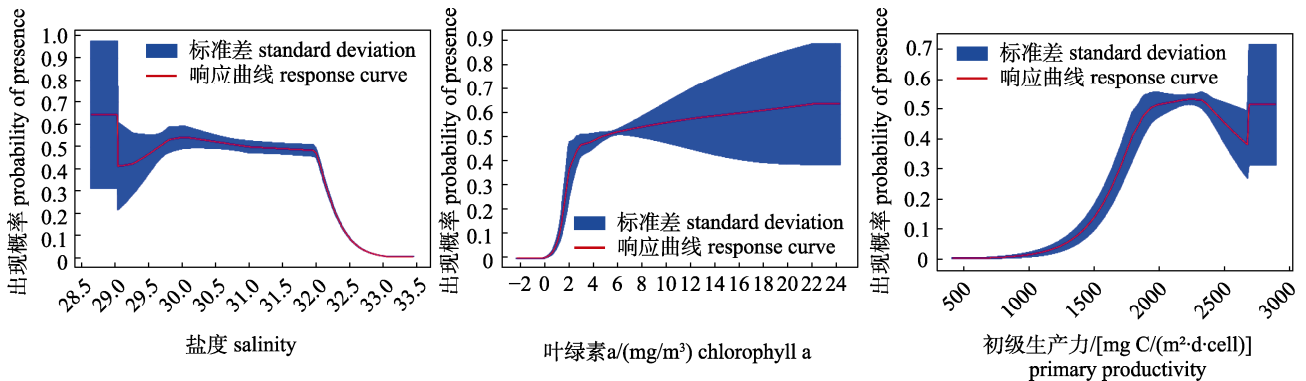


图 5 3 个主要影响因子的响应曲线

Fig. 5 Response curves of three major impact factors

2.3 物种的适生区分布

浙江近岸黄鲫适生区如图 6 所示, 黄鲫高适生区主要集中于舟山渔场北部、杭州湾、三门县、象山县附近海域以及温州近岸海域, 占研究区域总面积的 22.88%; 中适生区主要分布于禁渔区内舟山渔场 29°7'N~30°7'N, 122°E~123°2'E 海域、鱼山渔场 28°2'N~29°3'N, 122°2'E~123°E 海域以及高适

生区边缘, 占总面积的 68.85%; 低适生区主要分布在中适生区边缘, 占总面积的 8.27%。

3 讨论

3.1 环境变量对黄鲫潜在适生区分布的影响

环境变量的综合性影响是物种空间分布格局的主要驱动因素之一, 不同物种分布的影响因子

存在较大差异^[34]。本研究结果表明, 盐度、叶绿素 a 以及初级生产力是影响黄鲫浙江近岸海域适生区分布的主要因素, 其中盐度是影响黄鲫分布的重要因素。盐度能够影响鱼类的生态生理特征, 控制鱼类洄游和集群等行为, 在一定程度上可以直接驱动鱼类栖息空间的变动^[39]。本研究中调查

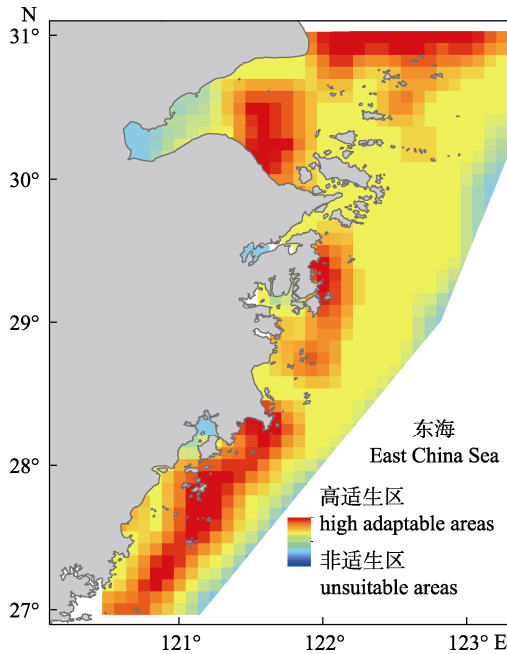


图 6 黄鲫适生区分布

Fig. 6 Distribution of suitable areas for *Setipinna taty*

分布点数据以春季与夏季为主, 结果显示, 浙江近岸海域黄鲫在盐度 28.7~29.0 出现概率最高, 这与张孟海等^[40]研究发现性成熟的黄鲫适盐范围区间为 28.98~30.0 的结果较为相近, 推测黄鲫出现概率高可能是由于此时为黄鲫繁殖期, 盐度过高或者太低都会对黄鲫的性腺发育产生抑制作用, 从而影响其分布。本研究发现, 黄鲫的出现概率与叶绿素 a 呈正相关关系, 相关研究表明^[41]黄鲫受叶绿素 a 含量影响较大。叶绿素 a 常被用作评估浮游植物现存量及其波动状况的重要指标^[42], 在一定范围内叶绿素 a 含量与浮游动植物含量呈正相关关系, 大量的浮游生物吸引黄鲫聚集索饵^[43], 此外, 黄鲫的出现概率随着初级生产力的升高逐渐增加, 究其原因为初级生产力的高低直接影响浮游动物的分布^[44], 黄鲫的饵料来源以浮游动物为主。因此, 初级生产力和叶绿素 a 的变化直接影响浮游

动物的分布, 进而影响黄鲫的分布。

3.2 浙江近岸黄鲫适生区分布特征

MaxEnt 模型预测结果显示, 调查海域黄鲫高适生区集中分布于舟山渔场北部、杭州湾、象山县、三门县附近海域以及温州近岸海域, 其余潜在适生区以高适生区为中心向外扩张。以往研究结果表明^[45-46]我国近海经济鱼类产卵场主要分布于近岸或河口附近, 黄鲫产卵场主要位于温台渔场的南北鹿列岛附近海域、鱼山渔场的三门湾附近海域, 以及舟山渔场的杭州湾附近海域, 这与本研究黄鲫高适生区分布区域基本吻合。这一分布特征可能与浙江近岸的地理环境以及其产卵习性相关。黄鲫是近岸小型鱼类, 每年 3 月中旬, 东海部分黄鲫群体会向浙江近岸海域集中产卵^[47]; 而受淡水径流、海流水团的影响, 近岸海域叶绿素 a 浓度较高^[42], 浮游生物繁盛, 不仅为黄鲫产卵群体提供了适宜的环境条件, 同时也有利于孵化后的幼鱼进行索饵和生长。温州近岸海域黄鲫高适生区分布范围较广, 出现这一现象的原因一方面是该海域在浙江沿岸海流和台湾暖流影响下, 营养盐类丰富, 黄鲫受浮游饵料生物栖息深度影响, 其分布水域渐浅; 另一方面该海域属暖温带海区, 以暖水性物种占优势^[48], 黄鲫高适生区的分布特征也进一步印证了其适应近海暖水性环境的生物学特性。此外, 刘勇等^[12]研究东海区黄鲫的洄游路线发现, 南部群体越冬行为明显, 适生区有向南迁移的趋势, 这可能也是原因之一。黄鲫也会摄食一定的虾类^[49], 其高适生区分布于舟山渔场北部海域, 这可能是因为该海域受长江径流、沿岸上升流、黄海冷水团等多种水团的综合影响, 浮游生物、虾类资源丰富且种类繁多^[50], 为黄鲫提供了良好的索饵栖息地。

3.3 最大熵模型在潜在适生区预测中的适用性及局限性

随着技术的发展, 物种分布模型在海洋生态学研究 and 生物多样性保护方面发挥了重要作用, 当海洋环境特征复杂多变时, 获取物种的分布点和环境影响因子数据的难度系数较大^[19]。与其他物种分布模型相比, MaxEnt 模型可以使用少量的物种分布点和环境变量数据预测物种潜在分布范

围, 具有操作简单、运算快、稳定性好以及预测结果精度高等优点^[37]。本研究仍存在一定的局限性, 由于当前环境影响因子(1910—2009 年)没有季节性数据, 无法预测其季节变化分布情况, 为保证模型的预测精度, 本研究未将调查分布点数据的时间尺度划分为季节后再对黄鲫潜在适生区进行预测, 其预测结果与实际情况可能存在偏差。此外, 在实际情况中, 影响鱼类适生区选择的因素有许多, 气候变化、底质类型、饵料生物以及种间竞争等可能也会对其适生区选择有驱动作用, 这可能影响物种潜在适生区分布的预测精准性, 如黄鲫的分布与其食性季节变化密切相关, 其分布随栖息海域中饵料生物的季节波动而改变^[11], 因此, 后续研究还需考虑更多的影响因子纳入到模型中, 进一步提高模型的模拟精度, 以期更加全面、客观地分析黄鲫潜在适生区的分布特征, 为黄鲫资源保护和可持续利用提供科学基础。

致谢: 浙江省海洋水产研究所渔业资源与生态研究室诸位老师对本项调查工作给予了倾力支持与协助, 特表谢忱!

参考文献:

- [1] Zhang L L, Zhou Y D, Jiang R J, et al. Spatial niche of major fish species in spring in the coastal waters of central and southern Zhejiang Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 659-666. [张琳琳, 周永东, 蒋日进, 等. 浙江中南部近岸海域春季主要鱼类空间生态位[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 659-666.]
- [2] Lu Z H, Miao Z Q, Lin N. The structure and diversity fish communities in spring in the middle sea area of Zhejiang Province and adjacent region[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2009, 28(1): 51-56. [卢占晖, 苗振清, 林楠. 浙江中部近海及其邻近海域春季鱼类群落结构及其多样性[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2009, 28(1): 51-56.]
- [3] Rui Y, Jiang R J, Wang H X, et al. Characteristics of fish community structure and its relationship with environmental factors in Dachenyang spawning ground reserve[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(6): 995-1007. [芮银, 蒋日进, 王好学, 等. 大陈洋产卵场保护区鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2022, 46(6): 995-1007.]
- [4] 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(自然科学版), 2013, 43(5): 30-36.]
- [5] Mu X X, Zhang C, Zhang C L, et al. The fisheries biology of the spawning stock of *Scomberomorus niphonius* in the Bohai and Yellow Seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(6): 1308-1316. [牟秀霞, 张弛, 张崇良, 等. 黄渤海蓝点马鲛繁殖群体渔业生物学特征研究[J]. 中国水产科学, 2018, 25(6): 1308-1316.]
- [6] Yu C G, Yan X J, Jiang Q L, et al. Cause analysis of resources change and reconstruction strategy of *Larimichthys crocea* Daiqu Group in the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(4): 616-625. [俞存根, 严小军, 蒋巧丽, 等. 东海岱衢族大黄鱼资源变动的的原因探析及重建策略[J]. 水产学报, 2022, 46(4): 616-625.]
- [7] Shi D F, Zhang K, Cai Y C, et al. Population structure of *Trichiurus japonicus* in northern South China Sea and parameters of its growth, mortality and maturity[J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(5): 51-59. [史登福, 张魁, 蔡研聪, 等. 南海北部带鱼群体结构及生长、死亡和性成熟参数估计[J]. 南方水产科学, 2020, 16(5): 51-59.]
- [8] Li S F, Yan L P, Li C S, et al. The analysis of fish composition pattern in the northern East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(4): 384-392. [李圣法, 严利平, 李长松, 等. 东海北部鱼类组成特征分析[J]. 水产学报, 2004, 28(4): 384-392.]
- [9] 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.]
- [10] Zhang L Y, Zhang Y P, Zhou Z D, et al. The genetic diversity of *Setipinna tenuifilis* in the 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.]
- [11] Guo A, Zhou Y D, Jin H W, et al. Seasonal changes on food composition and feeding habitat of *colilia mystus* (Linnaeus) in the East China Sea[J]. Modern Fisheries Information, 2010, 25(8): 10-13, 27. [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]. 现代渔业信息, 2010, 25(8): 10-13, 27.]
- [12] 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): 255-260. [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): 255-260.]
- [13] Gábor L, Jetz W, Zarzo-Arias A, et al. Species distribution models affected by positional uncertainty in species occurrences can still be ecologically interpretable[J].

- Ecography, 2023, 2023(6): e06358.
- [14] Schickele A, Goberville E, Leroy B, et al. European small pelagic fish distribution under global change scenarios[J]. Fish and Fisheries, 2021, 22(1): 212-225.
- [15] Gamliel I, Buba Y, Guy-Haim T, et al. Incorporating physiology into species distribution models moderates the projected impact of warming on selected Mediterranean marine species[J]. Ecography, 2020, 43(7): 1090-1106.
- [16] Chen X Z, Zhu G P. Habitat of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the Bransfield Strait based on ensembled species distribution model[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(3): 390-401. [陈洵子, 朱国平. 基于物种分布集成模型的布兰斯菲尔德海峡南极磷虾栖息地研究[J]. 水产学报, 2022, 46(3): 390-401.]
- [17] Wang C Y, Xu Y W, Gu H F, et al. Potential geographical distribution of harmful algal blooms caused by the toxic dinoflagellate *Karenia mikimotoi* in the China Sea[J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167741.
- [18] Zhang T, Zhao T Y, Luan J, et al. Analysis of the influence of environmental factors on the distribution of occasional species in the Haizhou Bay based on species distribution model[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(7): 69-78. [张涛, 赵天亚, 栾静, 等. 基于物种分布模型分析环境因子对海州湾偶见种资源分布的影响[J]. 海洋学报(中文版), 2023, 45(7): 69-78.]
- [19] Yang X L, Yang C J, Hu C Y, et al. Application of species distribution models in the prediction of marine potential habitat: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 2063-2072. [杨晓龙, 杨超杰, 胡成业, 等. 物种分布模型在海洋潜在生境预测的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 2063-2072.]
- [20] Wei X J, Xu D P, Liu Q W, et al. Predicting the potential distribution range of *Batocera horsfieldi* under CMIP6 climate change using the MaxEnt model[J]. Journal of Economic Entomology, 2024, 117(1): 187-198.
- [21] Cao R X, Guan W J, Gao F, et al. Prediction of chub mackerel fishing ground distribution in the East China Sea and Yellow Sea based on maximum entropy model and habitat suitability index model[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(9): 72-81. [曹睿星, 官文江, 高峰, 等. 基于最大熵和栖息地指数模型预测东、黄海日本鲭渔场分布[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 72-81.]
- [22] Liu L L, Zhao L, Lin S Y, et al. Predicted distribution of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the Amundsen Sea using MaxEnt and GARP[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(2): 399-411. [刘璐璐, 赵亮, 蔺诗颖, 等. 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, 2023, 54(2): 399-411.]
- [23] Lefkaditou E, Politou C Y, Palialexis A, et al. Influences of environmental variability on the population structure and distribution patterns of the short-fin squid *Illex coindetii* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the Eastern Ionian Sea[J]. Hydrobiologia, 2008, 612: 71-90.
- [24] Chen P, Chen X J. Analysis of habitat distribution of Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) in the southwest Atlantic Ocean using maximum entropy model[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(6): 893-902. [陈芑, 陈新军. 基于最大熵模型分析西南大西洋阿根廷滑柔鱼栖息地分布[J]. 水产学报, 2016, 40(6): 893-902.]
- [25] State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey: GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范第 6 部分 海洋生物调查: GB/T 12763.6-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [26] Warren D L, Matzke N J, Cardillo M, et al. ENMTools 1.0: An R package for comparative ecological biogeography[J]. Ecography, 2021, 44(4): 504-511.
- [27] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [28] Li Y C, Guo Q Q, Liu H, et al. Prediction of the potential distribution of introduced predatory mite *Neoseiulus cucumeris*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5219-5229. [李玉闯, 郭倩倩, 刘怀, 等. 引种捕食螨胡瓜新小绥螨在中国的适生区分布预测[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5219-5229.]
- [29] Ying B K, Tian K, Guo H Y, et al. Predicting potential suitable habitats of *Kandelia obovata* in China under future climatic scenarios based on MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 224-234. [应邦青, 田阔, 郭浩宇, 等. 基于 MaxEnt 模型预测未来气候变化情境下红树秋茄(*Kandelia obovata*)在中国潜在适生区的变化[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 224-234.]
- [30] Zhao R N, He Q Q, Chu X J, et al. Prediction of potential distribution of *Carpinus cordata* in China under climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3833-3843. [赵儒楠, 何倩倩, 褚晓洁, 等. 气候变化下千金榆在我国潜在分布区预测[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3833-3843.]
- [31] Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(4): 365-372. [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.]
- [32] Chao B X, Hu W J, Chen B, et al. Potential suitable habitat of mangroves and conservation gap analysis in Guangdong Province with MaxEnt modeling[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3785-3794. [晁碧霄, 胡文佳, 陈彬,

- 等. 基于 MaxEnt 模型的广东省红树林潜在适生区和保护空缺分析[J]. 生态学报, 2020, 39(11): 3785-3794.]
- [33] Tang Y X, Pi J, Liu X H, et al. Predicting potential distribution of *Corbicula fluminea* under climate change scenarios using MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4250-4259. [唐杨欣, 皮杰, 刘新华, 等. 基于最大熵模型预测气候变化下河蚶在中国的潜在分布[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4250-4259.]
- [34] Xie M, Zhang X X, Luo Y, et al. Application of MaxEnt model for selection of suitable tree species in dry-hot valley of Yunnan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3689-3707. [谢孟, 张学星, 罗燕, 等. 基于 MaxEnt 模型的云南干热河谷适生树种选择[J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3689-3707.]
- [35] Zhou B J, Wang Y J, Ma C L, et al. Analysis of potential habitat of *Torreya yunnanensis* based on MaxEnt and ArcGIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4485-4493. [周炳江, 王玉洁, 马长乐, 等. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 的云南榿树潜在生境分析[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4485-4493.]
- [36] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems[J]. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [37] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. Diversity and Distributions, 2011, 17(1): 43-57.
- [38] Li G L, Wang W J, Li B X, et al. Potential geographic distribution of *Costaria costata* in China based on the MaxEnt model and ArcGIS[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(12): 1588-1601. [李国梁, 汪文俊, 李宝贤, 等. 基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 预测多肋藻在中国海域的适生分布特征[J]. 中国水产科学, 2021, 28(12): 1588-1601.]
- [39] Zhu H C, Tang J H, Wu L, et al. Relationship between the resource density of *Larimichthys polyactis* and the habitat environment factors in summer in Jiangsu coastal waters, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(10): 2881-2886. [朱海晨, 汤建华, 吴磊, 等. 江苏近海夏季小黄鱼资源密度与栖息环境关系探讨[J]. 应用生态学报, 2024, 35(10): 2881-2886.]
- [40] Zhang M H, Sun T Q, Li Y M, et al. On the seasonal distribution of sexually matured zunast in Southern Bohai Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1994(4): 72-80. [张孟海, 孙同秋, 李永明, 等. 渤海南部性成熟黄鲫季节分布的研究[J]. 海洋湖沼通报, 1994(4): 72-80.]
- [41] Zhao P, Jiang R J, Yin R, et al. Species composition and relationship with environmental factors of fish eggs and larvae in Qixing Islands spawning ground reserve[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(11): 1311-1326. [赵芑, 蒋日进, 印瑞, 等. 七星列岛产卵场保护区鱼卵、仔稚鱼种类组成及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2023, 30(11): 1311-1326.]
- [42] Li X S. Autumn zooplankton community structure in Yangtze River Estuary and its adjacent waters[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022. [李小松. 长江口及其邻近海域秋季浮游动物群落结构研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.]
- [43] Liu K, Yu C G, Zheng J, et al. Analysis of functional groups characteristics and niche of major fish species in the coastal waters of Zhoushan Islands in spring and autumn[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2021, 48(5): 592-605. [刘坤, 俞存根, 郑基, 等. 舟山群岛近岸海域春秋两季主要鱼类功能群特征及其生态位分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2021, 48(5): 592-605.]
- [44] Zhang H B, Pei S F, Zhu Y X, et al. Study on the distribution characteristic of primary productivity and its controlling factors in Bohai Bay in the early summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6416-6424. [张海波, 裴绍峰, 祝雅轩, 等. 初夏渤海湾初级生产力分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6416-6424.]
- [45] Zhou Y D, Li S F, Yu C G, et al. Atlas of Three Fields, One Corridor and Protected Areas for Major Economic Categories in East China Sea District[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018. [周永东, 李圣法, 俞存根, 等. 东海区主要经济种类三场一通道及保护区图集[M]. 北京: 海洋出版社, 2018.]
- [46] 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]. Haiyang Xuebao, 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.]
- [47] Li J S, Zhang Q Y, Zheng Y J, et al. 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, 等. 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.]
- [48] Liu X X, Gao C X, Tian S Q, et al. Distribution of *Setipinna taty* optimal habitats in the South inshore area of Zhejiang Province based on the habitat suitability index[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1485-1495. [柳晓雪, 高春霞, 田思泉, 等. 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[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1485-1495.]
- [49] 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.]
- [50] He X B, Yu C G, Qin T, et al. The analysis of the community characteristics of shrimps in Zhoushan fishing ground and its adjacent waters[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(3): 553-559. [何贤保, 俞存根, 覃涛, 等. 舟山渔场及附近海域虾类群落结构特征分析[J]. 水生生物学报, 2013, 37(3): 553-559.]

Study on the potential suitable areas of *Setipinna taty* in Zhejiang coastal sea area based on MaxEnt model

LI Qiqun^{1,2}, JIANG Rijin², ZHAO Peng^{1,2}, ZHANG Qihong^{1,2}, LIU Mingzhi^{1,2}, SHEN Jiarong^{1,2}, ZHANG Hongliang², ZHU Wenbin², LONG Xiangyu²

1. Marine and Fisheries Research Institute, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;

2. Zhejiang Marine Fisheries Research Institute; Scientific Observing and Experimental Station of Fishery, Resources for Key Fishing Grounds, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resources of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China

Abstract: There are many coastal islands in Zhejiang Province. Affected by multiple factors such as Zhejiang-Fujian Coastal Current, Taiwan Warm Current, and diluted river water, an ecological environment with abundant nutrients and sufficient food, which provides an ideal habitat and food source for many marine organisms, has been formed. Fish adapt significantly to these environmental factors, such as water temperature, salinity, depth, chlorophyll a concentration, and pH, and usually only grow and reproduce in specific environments. Therefore, it is of positive significance for the sustainable utilization of fishery resources and fishery management to study the selection of suitable areas for fish and its relationship with environmental factors and to predict the distribution of the potentially suitable areas. *Setipinna taty* is widely distributed in the coastal waters of China. It has attracted much attention due to its rapid growth, early sexual maturity, and strong resource recovery ability. In recent years, the fishing species in Zhejiang coastal waters have gradually shifted to small fish due to the decline of fishery resources. As one of the main fishing species in Zhejiang coastal waters at present, the protection and sustainable utilization of *Setipinna taty* resources are particularly important. However, there is still a lack of research on the distribution of potential suitable areas of *Setipinna taty*. Based on 81 distribution points recorded during the bottom trawl survey of the spawning ground in the offshore area of Zhejiang Province, in combination with six marine environmental data such as salinity, chlorophyll a, and primary productivity, we used the maximum entropy model to predict the spatial distribution of the potentially suitable areas of *Setipinna taty*, explore the relationship between its distribution and the main influencing factors, and comprehend the distribution characteristics of *Setipinna taty*. The research also explored the relationship between its distribution and major influencing factors. The results were as follows: (1) The MaxEnt model demonstrated good prediction accuracy and reliability (AUC=0.812) for simulating potentially suitable areas for *Setipinna taty*. (2) Salinity, chlorophyll a, and primary productivity were identified as key factors affecting the distribution of potentially suitable areas for *Setipinna taty*; among them, the percent contribution of salinity was the highest (PC=49.10%), which was an important factor affecting its distribution. (3) The high suitability areas for *Setipinna taty* were concentrated in the north of Zhoushan fishing ground, the waters around Hangzhou Bay, Xiangshan County, Sanmen County, and the coastal waters of Wenzhou, accounting for approximately 22.88% of the sea area. The remainder of the potential suitability area was centered around the high suitability area. The objective of this study was to offer a theoretical foundation for the protection and sustainable utilization of *Setipinna taty* resource in the coastal waters of Zhejiang. In addition, the important role of environmental factors in fish distribution was revealed by predicting the potential suitable area of *Setipinna taty* in the coastal waters of Zhejiang. We should fully consider and monitor the changes in key environmental factors in future protection of fishery resources to ensure the sustainable development of fishery resources.

Key words: MaxEnt; potentially suitable area; *Setipinna taty*; influence factors; Zhejiang coastal sea area

Corresponding author: JIANG Rijin. E-mail: jiangridge@163.com