

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20211214002

http://www.yykxjz.cn/

李宝贤, 李国梁, 姚海芹, 申欣, 鲁晓萍, 梁洲瑞, 刘福利, 张朋艳, 汪文俊. 基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 对巨藻在我国适生情况的分析. 渔业科学进展, 2023, 44(2): 118-126  
LI B X, LI G L, YAO H Q, SHEN X, LU X P, LIANG Z R, LIU F L, ZHANG P Y, WANG W J. Potential geographic distribution of *Macrocystis pyrifera* in China based on MaxEnt model and ArcGIS. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(2): 118-126

# 基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 对巨藻 在我国适生情况的分析\*

李宝贤<sup>1,2</sup> 李国梁<sup>2</sup> 姚海芹<sup>2</sup> 申欣<sup>1</sup> 鲁晓萍<sup>2</sup> 梁洲瑞<sup>2</sup>  
刘福利<sup>2</sup> 张朋艳<sup>2</sup> 汪文俊<sup>2①</sup>

(1. 江苏海洋大学 江苏省海洋生物技术重点实验室 江苏 连云港 222005;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东 青岛 266071)

**摘要** 发展新养殖对象及异地栽培需首先掌握物种的生态适应性。有关巨藻(*Macrocystis pyrifera*)在我国海区适应性的研究甚少, 海区养殖效果不理想, 我国巨藻养殖业发展欠佳。本研究采用 MaxEnt 构建了巨藻的物种分布模型, 当特征组合为乘积型特征(product features)、二次型特征(quadratic features)和片段化特征(hinge features), 正则化参数为 0.8 时, 模型预测性能最佳; 综合考虑环境因子的相关性及对模型的贡献率, 筛选出 6 项环境因子用于模型构建, 其中, 光强与温度对巨藻自然分布的影响最大, 在光强不低于 2  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、年均温度范围 10.5~17.0 $^{\circ}\text{C}$  条件下, 巨藻的适生概率较高。采用所构模型结合 ArcGIS 预测巨藻在我国的适生区: 主要分布于黄渤海, 约占该海域面积的 13.17%, 其中, 边缘适生区为 5.46%, 低适生区为 2.85%, 中适生区为 1.20%, 高适生区为 3.66%, 表明辽东湾、渤海湾是巨藻引种养殖和藻场建设的适宜海域。

**关键词** 巨藻; MaxEnt; ArcGIS; 适生区域

**中图分类号** S931.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)02-0118-09

巨藻(*Macrocystis pyrifera*)属于褐藻门、海带目、巨藻科、巨藻属(刘永定等, 2001), 分布于美洲太平洋沿岸, 自阿拉斯加州经加拿大、加利福尼亚州沿海至墨西哥, 据报道, 澳大利亚、新西兰、秘鲁、智利等地也有分布(Mansilla *et al*, 2011)。巨藻为多年生大型海藻, 生长速度快, 在美国西海岸附近海域中盛产的一种巨藻的日生长率可达 0.6 m (Mateus *et al*, 1976)。巨藻具有重要的经济价值, 含有丰富的蛋白质、维生素、矿物质, 可作为食品添加剂, 用于家禽、

家畜、鲍鱼养殖饲料, 国内外大量使用巨藻生产褐藻胶, 提炼甘露醇(Hernan *et al*, 1977)。相比石油和煤炭, 甲烷为更清洁低碳的能源, 而巨藻经微生物分解可以产生大量甲烷, 因此, 它又是一种极具潜力的生物能源海藻(Ghosh *et al*, 1981; 朱永良, 1984)。近年来, 山东及辽东半岛的藻场修复取得一定进展, 但海藻场的建设需要更加注重其生态功能和实际效果。目前, 我国藻场建设中多使用一年生海藻, 而巨藻是多年生海藻, 增殖成功后可以长期维持。巨藻作为“海底森林”

\* 国家重点研发计划项目(2018YFD0901500)、国家藻类产业技术体系(CARS-50)、国家海洋水产种质资源库项目、中国水产科学研究院基本科研业务费“创新团队”项目(2020TD27)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20\_1276)共同资助。李宝贤, E-mail: 15251281535@163.com

① 通信作者: 汪文俊, 研究员, E-mail: wjwang@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2021-12-14, 收修改稿日期: 2022-01-13

的主要海洋植物之一,其在海洋生态系统中具有饵料、栖息地、净化水体和碳汇等多个功能。

目前,对巨藻资源的利用还处于自然资源阶段,全球尚未建立成熟的巨藻栽培产业。我国海藻栽培规模大、物种丰富,在发展巨藻栽培产业中进行了一定的尝试。自 1978 年从墨西哥引进巨藻幼苗和配子体(刘恬敬等, 1981; 索如瑛等, 1986)以来,建立了巨藻潜筏式养殖技术(王飞久等, 1999),研究了光强和光时对巨藻配子体发育和幼孢子体生长的影响(胡敦清, 1984; 胡敦清等, 1986),解析了巨藻幼苗的光合生理特征(凌晶宇等, 2014),在保种、繁育和养殖技术上取得了一定的突破。但发展养殖新对象以及异地栽培要考虑物种的海区适应性,目前对巨藻在我国海区的适应性知之甚少,海区养殖效果并不理想。

生态位模型(ecological niche models, ENMs)是一种重要的定量分析工具,被广泛用于预测物种潜在的栖息适生区。目前主要采用的 ENMs 有 BIOCLIM、CLIMEX、DOMAIN、GARP 和 MaxEnt 等。基于生态位理论,用最大熵原理作为统计分析工具,以物种在已知分布区的信息以及目标区的环境变量为基础,通过比较该物种在已知分布区的生态环境变量来预测其占有的生态位,使用 Java 语言编写了 ENMs 程序 MaxEnt (Phillips *et al*, 2008)。MaxEnt 仅考虑目标物种在所在区域的“出现”情况(presence-only),综合考虑各种给定环境因子下物种出现的最大熵,从而对物种在预测区域的适生情况进行分析,是一种利用已知部分信息对未知信息进行预测或推断的通用方法。MaxEnt 模型是与 ArcGIS 结合效果最好、具有较高预测精度且应用最为广泛的 ENMs (张华纬等, 2020),常用于动物、林草等适生区的预测,如黑麂等濒危动物保护区预测(陈智强等, 2021)、不同时期的柃木分布格局(孟影等, 2020)、气候变化对西南地区高山植被分布的影响(熊巧利等, 2019)。生态位模型在海藻中的应用主要集中在入侵风险方面(Martín-García *et al*, 2017),基于发展养殖新对象的研究较少。

巨藻作为一种优质的大型经济褐藻,其商业化开发利用具有重要的经济价值和生态意义,作为外来物种,巨藻在我国海区栽培的生态安全性、是否会成为入侵物种的风险也有待明确。本研究采用 MaxEnt 软件对巨藻在我国海区的适生情况进行预测,初步评价其生态入侵风险,以期发展为巨藻增殖提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据获取及筛选

#### 1.1.1 环境数据

本研究环境数据来源于全球海

洋生物扩散模型环境数据库 Bio-ORACLE (<http://bio-oracle.org/>)中的 2000—2014 年期间月平均值的气候数据编制的图层,其空间分辨率为 5 arcmin (约为 9.2 km),下载格式为栅格格式(\*.tif)。选取对巨藻生长产生影响的环境因子用于适生模型预测,共计 21 项,分别为 bio1-最大海流流速(currents velocity. Max)、bio2-年均海流流速(currents velocity. Mean)、bio3-最小海流流速(currents velocity. Min)、bio4-最大铁浓度(iron. Max)、bio5-年均铁浓度(iron. Mean)、bio6-最小铁浓度(iron. Min)、bio7-最大光照强度(light at bottom. Max)、bio8-年均光照强度(light at bottom. Mean)、bio9-最小光照强度(light at bottom. Min)、bio10-最大氮浓度(nitrate. Max)、bio11-年均氮浓度(nitrate. Mean)、bio12-最小氮浓度(nitrate. Min)、bio13-最大磷浓度(phosphate. Max)、bio14-年均磷浓度(phosphate. Mean)、bio15-最小磷浓度(phosphate. Min)、bio16-最大盐度(salinity. Max)、bio17-年均盐度(salinity. Mean)、bio18-最小盐度(salinity. Min)、bio19-最大温度(temperature. Max)、bio20-年均温度(temperature. Mean)、bio21-最小温度(temperature. Min)。

将栅格格式(\*.tif)的环境数据导入 ArcGIS 10.2 转换成\*.asc 格式,使用 MaxEnt (V 3.4.1)进行贡献率分析,去除对巨藻生长贡献率为 0 的环境因素,将剩余的因素使用 ENMTools (V 1.3)进行相关性分析。相关性分析是研究变量间密切程度的一种统计方法(Tran *et al*, 2010)。在线性相关分析中,相关系数是描述线性关系程度和方向的量,一般用  $r$  表示,根据本研究实际情况,对环境变量进行相关性分析,相关系数  $|r| > 0.8$  定义为高度相关。本课题组对随机法和最大贡献率法与相关性结合的方法进行比对,发现采用最大贡献率结果的假阳性更低(李国梁等, 2021)。

**1.1.2 巨藻分布位点** 本研究使用的巨藻分布数据在全球生物多样性信息网络 GBIF (<http://www.gbif.org/>)中下载。收集 1901—2020 年巨藻分布位点共 6379 处,去除馆藏标本位点,获得巨藻有效自然分布位点共计 5682 处的经纬度数据。按照 MaxEnt 要求的文件格式,将巨藻的实际分布地点按照物种名、经度和纬度的顺序储存为\*.csv 格式的文件并导入 Excel 中去除错误、记录重复位点数据。为防止预测结果过拟合,使用 ENMTools 去除冗余位点。

### 1.2 MaxEnt 参数优化

通过 ENMTools 来调整 MaxEnt 模型正则化参数(regularization multiplier, RM)和特征组合(feature combination, FC)参数,分析不同参数下模型的复杂

度,选择复杂度最小的模型参数,最后比较分析 MaxEnt 模型默认参数和调整参数预测结果,讨论 MaxEnt 模型复杂度对预测结果的影响(朱耿平等,2016)。RM 和 FC 参数对 MaxEnt 模型复杂度有较大影响。在 MaxEnt 默认设置中,RM=1;FC 有 5 种,即:线性特征(linear features)、二次型特征(quadratic features)、片段化特征(hinge features)、乘积型特征(product features)和阈值性特征(threshold features)。

赤池信息量准则(Akaike information criterion correction, AIC)是衡量统计模型拟合优良性的一种标准,可以评估模型的复杂度和此模型拟合数据的优良性,信息量准则优先考虑 AIC 值(即 AICc)最小的模型(Akaike *et al.*, 1973)。ENMTools 通过计算 MaxEnt 模型不同参数条件下的 AIC 值来评价模型的复杂度。本研究将 RM 设置为 0~4,每次增加 0.1,采用 31 个特征组合(FC),共计 1240 项参数组合。

### 1.3 预测模型构建运行

将筛选处理后的分布数据、环境数据分别导入 MaxEnt 模型,随机选取 25%的巨藻分布点作为测试集(test data),剩余 75%作为训练集(training data),根据优化结果设置 RM 和 FC,构建环境变量响应曲线,并采用刀切法检测环境变量的重要性,以 Logistic 格式输出概率分布预测图。

采用接受者操作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)分析法对预测结果进行精度检验。AUC 是 ROC 曲线与横坐标围成的面积,AUC 值越接近 1,说明环境变量与预测的物种地理分布模型之间的相关性越大,即模型预测的结果越准确(王运生等,2007)。

### 1.4 预测适生区划分

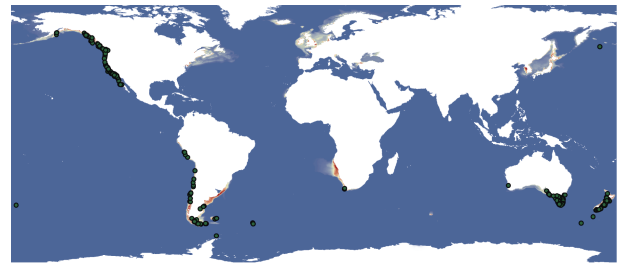
利用 ArcGIS 的格式转换工具(conversion tools)将 \*.asc 格式转化为栅格格式,再利用分析工具(analysis tools)的再分类(reclassify)功能对其进行适生等级的划分,选定合适的阈值,将巨藻的适生等级划分为高度适生区(>0.5)、中适生区(0.3~0.5)、低适生区(0.1~0.3)、边缘适生区(0.05~0.1)、非适生区(<0.05),最终获得巨藻在中国的潜在适生分布范围。

## 2 结果与分析

### 2.1 分布位点筛选结果

将分布数据导入 ENMTools 软件中,与 \*.asc 格式的环境数据相结合,筛选去除同一栅格中的冗余位

点,最后筛选出共计 368 项分布数据,如图 1 所示,将其保存为 \*.csv 格式的文件并导入 MaxEnt 模型。



• 巨藻分布位点 Distribution of *Macrocyctis pyrifera*

图 1 巨藻全球分布

Fig.1 Global distribution of *Macrocyctis pyrifera*

### 2.2 环境因子筛选结果

根据实际情况,使用 MaxEnt 进行贡献率分析,去除对巨藻生长贡献率为 0 的环境因素,将剩余因素使用基于 R 语言开发的 ENMTools 进行相关系数分析。环境变量的相关系数 $|r|>0.8$  定义为高度相关(图 2),从中筛选贡献率最高的用于后续建模,共筛选 6 个环境因子(bio4、bio9、bio10、bio14、bio16 和 bio20),即最大铁浓度、最小光照强度、最大氮浓度、年均磷浓度、最大盐度、年均温度用于建立模型。

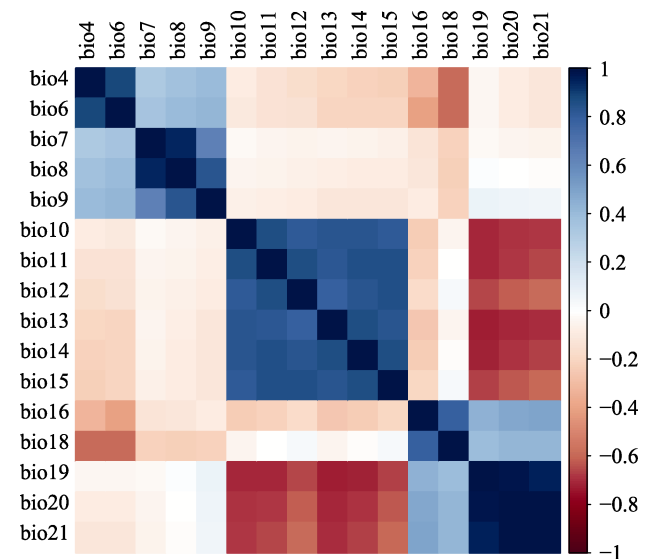


图 2 环境因子相关系数热图

Fig.2 Heat map of correlation coefficient of environmental factors

### 2.3 MaxEnt 参数优化结果

利用 R 语言对 RM 和 FC 参数组合进行优化,比较所得 1240 项组合的 AIC 值大小(图 3),筛选出最适参数组合为 RM—乘积型特征、二次型特征和片段化特征,FC—0.8,确定 MaxEnt 各优化参数设置见表 1。

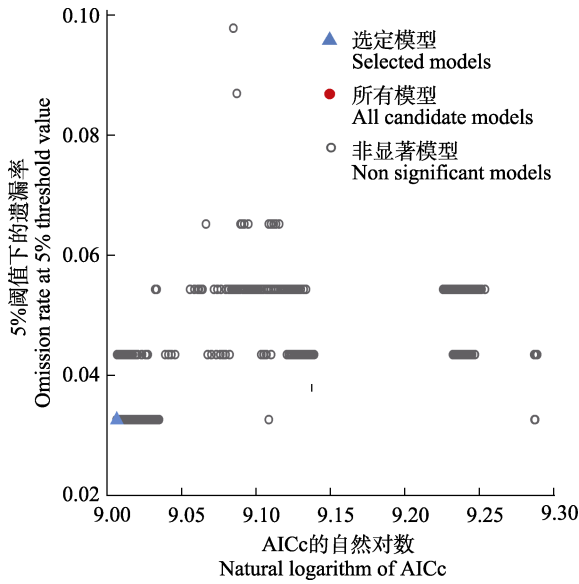


图 3 MaxEnt 参数设置 AICc 大小  
Fig.3 Parameter setting values of MaxEnt

表 1 MaxEnt 参数设置值  
Tab.1 Parameter setting values of MaxEnt

选项 Option	参数 Parameter	
	默认值 Default value	设置值 Setting value
特征组合 Feature combination	Auto features	Product features Quadratic features Hinge features
正则化参数 Regularization multiplier	1	0.8
随机选取测试集比例 Randomly selected test set percentage	0	25.0
重复迭代次数 Number of iterations repeated	1	10.0

### 2.4 MaxEnt 模型预测结果的检验

采用 ROC 曲线对巨藻在中国适生区预测结果进行精度检验, 高贡献率环境因子组模型预测结果的平均 AUC 值为 0.980, 标准差为 0.002 (图 4)。检测值远远大于随机模型的 AUC 值 0.5, 表明该模型预测性能比随机模型好, 即所构建的模型预测巨藻分布区结果可信度高。

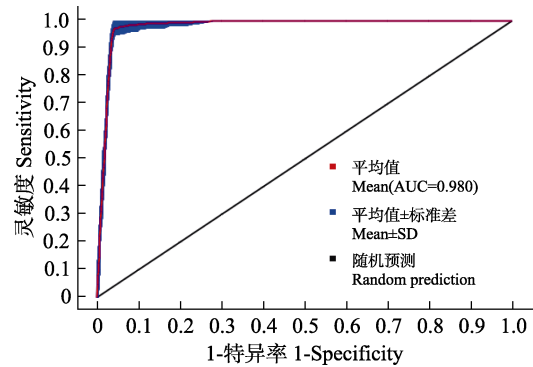


图 4 MaxEnt 模型对巨藻预测结果 ROC 曲线检验  
Fig.4 ROC curve verification of prediction for *M. pyrifera* by MaxEnt model

刀切法(Jackknife)检验了环境变量对 MaxEnt 模型的影响(图 5), 当单个环境因子时, 最小光照强度(bio9)训练正态化增益超过 2.0, 为重要性最大的环境因子, 其次为年均温度(bio20)、最大铁浓度(bio4)对模型的影响较高, 训练正态化增益均超过 1.0。该检验结果显示, 环境因子中的光温对巨藻的生长分布具有较大影响, 这与巨藻目前的生长环境相符。

### 2.5 巨藻预测适生区与环境因子的关系

将筛选过后的巨藻分布数据(\*csv)和环境数据(\*asc)导入 MaxEnt 预测软件, 随机选取 25%的巨藻

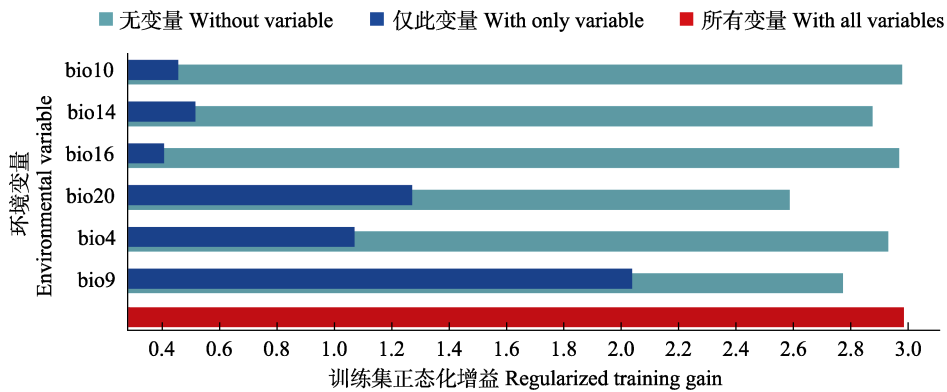


图 5 刀切法对环境因子重要性检验  
Fig.5 Test of AUC based on environmental factors importance by Jackknife method

分布点作为测试集, 剩余 75% 作为训练集, 根据默认参数、优化参数结果分别设置 RM 和 FC, 构建环境变量响应曲线, 以 Logistic 格式输出概率分布预测图, 上述过程重复 10 次, 主要环境因子的响应曲线见图 6。

以分布概率 0.5 为阈值, 划分巨藻生态适应性环境因子的范围。结果显示, 巨藻适宜分布的条件为: 年均温度的适宜范围为 10.5~17.0℃, 最适温度为 15.0℃; 最小光照强度适宜范围为 2.0~20  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ; 最大盐度在 26~34 时适宜巨藻分布, 盐度为 30 时分布概率最大; 最大氮浓度范围为 6.0~18.0 mg/L, 海水中氮浓度为 9.0 mg/L 时最适宜巨藻分布; 巨藻可在平均

磷浓度为 0.5~1.1 mg/L 范围内分布, 0.7 mg/L 时最适宜巨藻分布; 最大铁浓度为 0.021 mg/L 时巨藻分布概率最大。

## 2.6 巨藻在我国北方海域潜在适生区

将筛选过的巨藻分布数据(\*csv)和环境数据(\*asc)导入 MaxEnt 预测软件, 随机选取 25% 的巨藻分布点作为测试集, 剩余 75% 作为训练集, 根据默认参数、优化参数结果分别设置 RM 和 FC, 构建环境变量响应曲线, 以 Logistic 格式输出概率分布预测图, 上述过程重复 10 次。

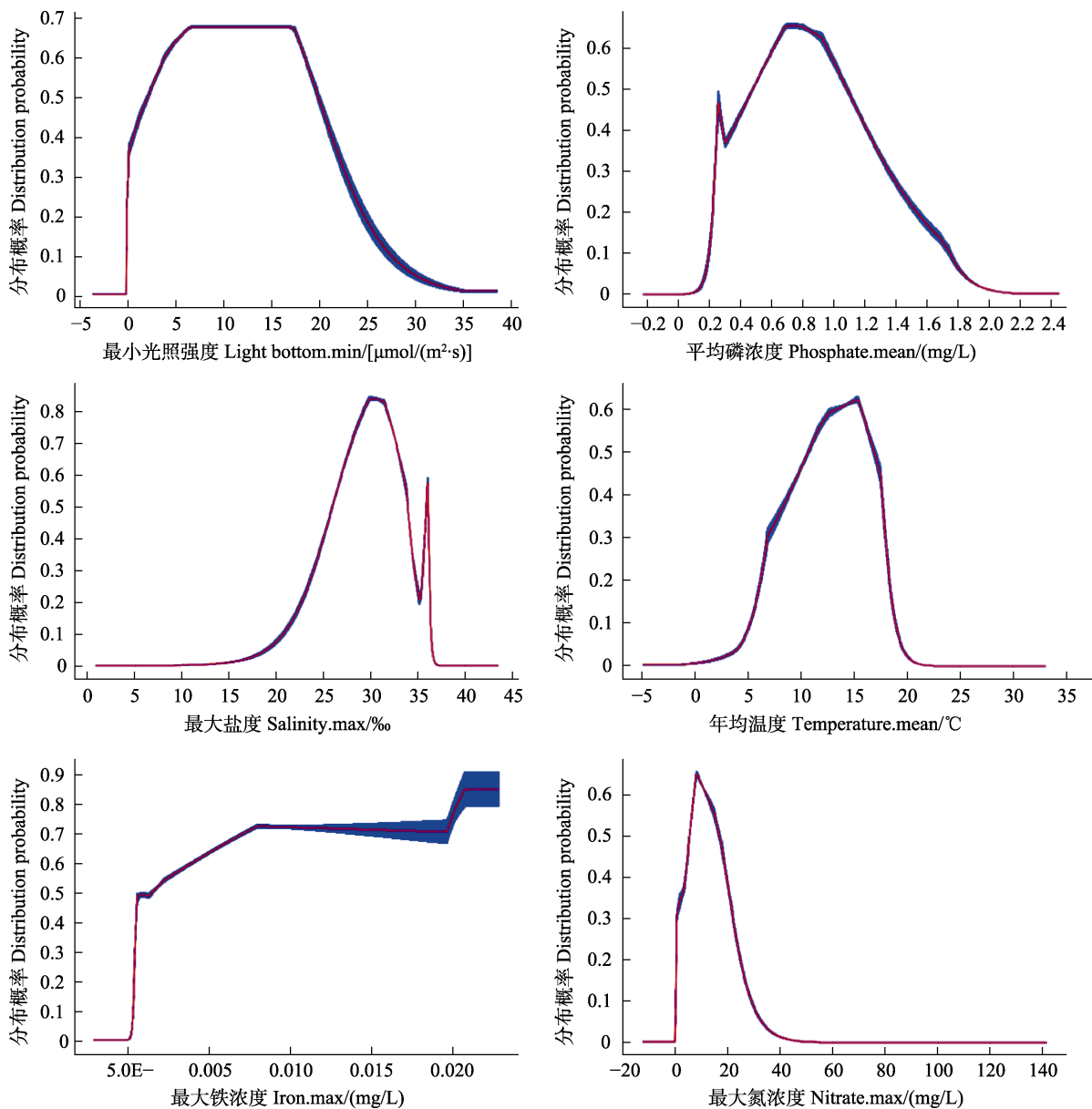


图6 环境因子的响应曲线

Fig.6 Response curve of environmental factors

MaxEnt 预测结合 ArcGIS 结果见图 7, 预测适生区域为辽东湾、渤海湾及滨海湾, 其中, 非适生区面积占比为 86.83%, 边缘适生区为 5.46%, 低适生区为 2.85%, 中适生区为 1.20%, 高适生区为 3.66% (表 2)。

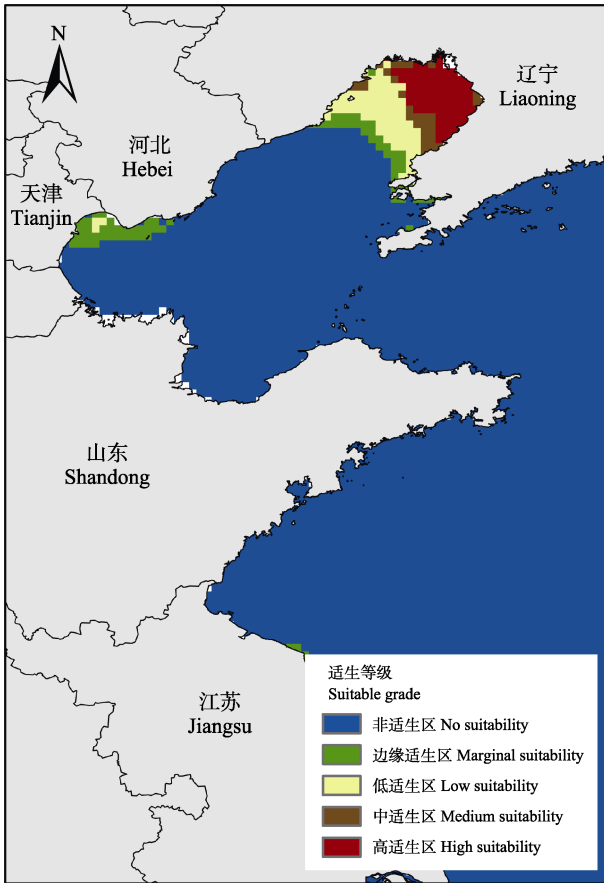


图 7 预测适生区结果

Fig.7 Prediction results of suitabilities

表 2 MaxEnt 预测巨藻在中国黄渤海的适生区分布情况

Tab.2 MaxEnt predicts the distribution of *M. pyrifera* in the Yellow Sea and Bohai Sea of China

适生区等级 Suitable grade	适生概率范围 Probability range	频数 Frequency	占比 Percentage /%
非适生区 No suitability	0~0.05	6804	86.83
边缘适生区 Marginal suitability	0.05~0.1	428	5.46
低适生区 Low suitability	0.1~0.3	223	2.85
中适生区 Medium suitability	0.3~0.5	94	1.20
高适生区 High suitability	0.5~1	287	3.66
合计 Total		7836	

模型预测结果显示, 年均温度 10.5~17.0℃ 适宜巨藻分布, 15℃ 时最佳; 适宜巨藻自然分布的盐度范围为 26~34, 盐度为 30 时分布概率最大, 这与室内实验结果一致(芦薇薇, 2015)。同时, 本预测结果也与巨藻引种地的水温条件相符, 中国水产科学研究院

### 3 讨论

MaxEnt 默认参数的设置是对 6 个不同地理区域的 266 个物种数据进行模拟测试所得出的(Phillips *et al.*, 2008)。模型所模拟的分布范围介于潜在分布和现实分布之间, 使用时需从研究者目的出发调整模拟方案。本研究采用 AIC 值大小来评定统计模型拟合优良性, 衡量模型的复杂度, 优先考虑 AIC 值最小的模型。当参数组合为 RM—乘积型特征、二次型特征和片段化特征, FC 设置为 0.8 时 AIC 值最小, 且此时 AUC 值为 0.980, 远大于随机值 0.5, 表明本优化参数比默认参数更加准确。

使用缓冲区筛选数据会导致缓冲区相交, 从而把原本位于不同栅格的两个位点删除, 造成部分数据误删、部分冗余数据删除不彻底的现象(Dan *et al.*, 2010)。本研究为解决这一问题, 采用 ENMTools 处理巨藻在全球的分布位点数据, 将环境因子与分布数据相结合, 匹配分析环境因子的栅格大小, 删除同一栅格内的冗余分布数据。该方法较缓冲区筛选数据更准确快捷, 分析结果更加合理。

筛选过的分布数据显示, 巨藻自然分布主要集中在加拿大、美国和智利西海岸, 澳大利亚东南部海岸和新西兰东海岸。加拿大西海岸、新西兰东海岸以及智利西海岸南部的气候特征为温带海洋性气候, 美国西海岸为地中海气候, 澳大利亚东南角大陆地中海气候和温带海洋性气候。地中海气候和温带海洋性气候的地区温度适宜, 降水量充沛, 适宜巨藻生长。上述地区在 MaxEnt 模型的预测结果中皆有显示, 说明本研究筛选出用于模型构建的环境因子合适。

黄海水产研究所 1978 年从墨西哥引进巨藻(刘恬敬等, 1981), 引种地圣托马斯藻场冬季最低水温为 10~12℃, 夏季最高水温为 18~19℃, 说明本研究所构模型的预测结果准确。本预测结果显示, 适宜巨藻自然分布的最小光强为 2.0~20  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 说明巨藻对

低光强具有较好的适应性。海水光强与水深和透明度具有相关性。目前常用的海洋环境数据库 WOD2009、OceanColor、Hexacoral、AquaMaps、Halpern 均未收录海水深度数据。Bio-ORACLE 是收录环境参数最为齐全的,也是目前与 MaxEnt 模型适配度最高的海洋环境数据库(Tyberghein *et al.*, 2012),因此,本研究选用了 Bio-ORACLE。通过对巨藻分布区海洋数据的调查,巨藻一般垂直分布于低潮线下 5~20 m 水深处(Gerard, 1984; Graham, 1996)。我国 1978 年巨藻的引种地墨西哥圣托马斯水深在 10 m 左右,所取的成熟藻体长 24 m 以上(刘恬敬等, 1981)。可见,因藻体在海水中漂浮生长,藻体可生长的长度与垂直栖息水深并不呈正相关关系。渤海湾平均水深为 18 m (李原仪, 2017),与巨藻自然栖息地的水深相当,适宜底播增殖巨藻。目前,我国海藻筏式栽培的水深多在几米到二三十米之间,因此,在该区域筏式栽培巨藻也是合适的,说明所构模型虽未考虑水深参数,对预测结果的影响不大。适宜的海水流速(丁刚等, 2015)对于藻类生长具有促进作用,巨藻适宜生长在氮营养盐含量丰富、水急的水域(Zimmerman *et al.*, 1986),我国渤海湾氮浓度为 0.21 mg/L (徐菡悦, 2020),营养盐较为充足。此外,铁也是影响藻类生长的重要因素(王潇等, 2020),本研究发现,在众多环境参数中,铁离子浓度是影响模型的关键参数之一,最大铁离子浓度在 0.021 mg/L 时巨藻的分布概率最高。

MaxEnt 模型预测结果显示,巨藻在我国的适应区域较少,仅辽东湾存在一定的中高适生区,其余地区均为低适生区、边缘适生区和非适生区,说明巨藻能够自然扩散的海域受限。我国自 20 世纪 80 年代在青岛、荣成、长岛多地开展巨藻养殖试验,至今未见巨藻自然资源的形成,可见养殖巨藻在我国形成自然群体的几率较低。巨藻营底栖生活,以礁岩作为附着基。高适生区辽东湾、渤海湾底质以砂质粉砂、粉砂、砂质泥和淤泥为主(徐东浩等, 2012; 宫少军, 2017; 裘奕斐等, 2021),不利于巨藻自然生长,底质类型不利于巨藻附着。如果在高适生区建设巨藻藻场,必须依靠人造藻礁,其自然扩散风险非常有限。可通过控制海洋牧场附着基质的投放区域,控制巨藻生长的范围。

本研究通过分布位点和环境数据筛选及 MaxEnt 参数优化等将预测结果出现假阳性的可能降到最低,与相关实验结果进行验证,证明了预测分析的准确性。预测结果显示,巨藻在我国的适生区主要分布于辽东湾、渤海湾的部分区域,说明在该区域发展巨藻养殖和藻场建设具有较高可行性,同时,由于受到该

海区环境因子的限制,在当前气候条件下,巨藻成为入侵物种的风险较低。但随着气候环境变化,在中高适生区增殖巨藻仍应保持谨慎,需同时开展生态安全性监测和评价工作。

## 参 考 文 献

- AKAIKE H, PETROV B N, CZAKI F. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. 2nd International Symposium on Information Theory, 1973
- CHEN Z Q, ZHAO Z H, WANG Y F, *et al.* Activity rhythm analysis and potential suitable area prediction of *Muntiacus crinifrons* based on infrared camera technology and MaxEnt model. *Journal of Ecology*, 2021, 41(9): 3535–3547 [陈智强, 赵增辉, 王远飞, 等. 基于红外相机技术和 MaxEnt 模型的黑鹿(*Muntiacus crinifrons*)活动节律分析和潜在适生区预测. *生态学报*, 2021, 41(9): 3535–3547]
- DAN L W, RICHARD E G, MICHAEL T. ENMTools: A toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*, 2010, 33(3): 607–611
- DING G, WU H Y, XIN M L, *et al.* Effects of hydrodynamic conditions on the growth of *Sargassum thunbergii* seedlings. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2015, 31(4): 233–238 [丁刚, 吴海一, 辛美丽, 等. 水动力条件对鼠尾藻幼苗生长的影响. *广西科学院学报*, 2015, 31(4): 233–238]
- GERARD V A. The light environment in a giant kelp forest: Influence of *Macrocystis pyrifera* on spatial and temporal variability. *Marine Biology*, 1984, 84(2): 189–195
- GHOSH S, KLASS D L, CHYNOWETH D P. Bioconversion of *Macrocystis pyrifera* to methane. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1981, 31(3): 791–807
- GONG S J, ZHAO W, QIAO J G, *et al.* Analysis of sediment characteristics and sedimentary environment in the Western Bohai Bay. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2017, 32(3): 50–57 [宫少军, 赵卫, 乔吉果, 等. 渤海湾西部海域底质特征及其沉积环境分析. *天津科技大学学报*, 2017, 32(3): 50–57]
- GRAHAM M H. Effect of high irradiance on recruitment of the giant kelp *Macracystis* (*Phaeophyta*) in shallow water. *Journal of Phycology*, 1996, 32(6): 903–906
- HERNAN M, JOE M R, ROBERT C B. Studies to improve the extraction of mannitol and alginic acid from *Macrocystis pyrifera* a marine brown alga. *Economic Botany*, 1977, 31(1): 24–27
- HU D Q, WANG F J. Study on the relationship between light time and the growth of gametophytes and young sporophytes of *Macrocystis pyrifera*. *Marine Fisheries Research*, 1986, 7: 17–26 [胡敦清, 王飞久. 光照时间与巨藻配子体和幼孢子体生长关系的研究. *海洋水产研究*, 1986, 7: 17–26]
- HU D Q. Effect of light intensity on gametophyte growth and development of *Macrocystis pyrifera*. *Marine Fisheries*

- Research, 1984, 5: 21–26 [胡敦清. 光照强度对巨藻配子体生长发育的影响. 海洋水产研究, 1984, 5: 21–26]
- LI G L, WANG W J, LI B X, *et al.* Prediction of the suitable distribution of *Costaria costata* in Chinese waters based on MaxEnt model and ArcGIS. Chinese Fisheries Science, 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. 中国水产科学, 2021, 28(12): 1588–1601]
- LI Y Y. Numerical simulation of hydrodynamic environment in the Bohai Sea. Doctoral Dissertation of Tianjin University, 2017 [李原仪. 渤海水动力环境的数值模拟研究. 天津大学博士研究生学位论文, 2017]
- LING J Y, LIANG Z R, SUN X T, *et al.* Preliminary study on photosynthesis and respiration of giant algae seedlings. Journal of Fisheries, 2014, 38(6): 820–828 [凌晶宇, 梁洲瑞, 孙修涛, 等. 巨藻幼苗光合、呼吸作用的初步研究. 水产学报, 2014, 38(6): 820–828]
- LIU T J, SUO R Y, LIU X Y, *et al.* Introduction and artificial seedling raising of *Macrocystis pyrifera*. Marine Fisheries Research, 1981, 2: 69–79 [刘恬敬, 索如瑛, 刘绪炎, 等. 巨藻(*Macrocystis pyrifera*)引进与人工育苗. 海洋水产研究, 1981, 2: 69–79]
- LIU Y D, FAN X, HU Z Y. Research on algae in China. Wuhan: Wuhan Publishing House, 2001, 125 [刘永定, 范晓, 胡征宇. 中国藻类学研究. 武汉: 武汉出版社, 2001, 125]
- LU W W. Effects of temperature, light intensity and salinity on the growth and biochemical composition of juvenile sporophytes of *Macrocystis pyrifera*. Master's Thesis of Ocean University of China, 2015 [芦薇薇. 温度、光照强度和盐度对巨藻(*Macrocystis pyrifera*)幼孢子体生长和生化组成的影响. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2015]
- MANSILLA A, AVILA M. Using *Macrocystis pyrifera* (L.) C. Agardh from southern Chile as a source of applied biological compounds. Revista Brasileira De Farmacognosia-Brazilian Journal of Pharmacognosy, 2011, 21(2): 262–267
- MARTÍN-GARCÍA L, HERRERA R, MORO-ABAD L, *et al.* Predicting the potential habitat of the harmful cyanobacteria: Ecological niche model of invasive seaweeds. Harmful Algae, 2014, 34: 76–86
- MATEUS H, REGENSTEIN J M, BAKER R C. The amino acid composition of the marine brown alga *Macrocystis pyrifera* from Baja California, Mexico. Botanica Marina, 1976, 19(3): 155–159
- MENG Y, MA J M, WANG Y Q, *et al.* Simulation of *Loropetalum chinense* distribution pattern based on MaxEnt model. Journal of Ecology, 2020, 40(22): 8287–8296 [孟影, 马姜明, 王永琪, 等. 基于 MaxEnt 模型的榿木分布格局模拟. 生态学报, 2020, 40(22): 8287–8296]
- PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with MaxEnt: New extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161–175
- QIU Y F, WANG J, XU M. distribution and health risk assessment of heavy metals in seawater, sediments and organisms in coastal waters of Binhai County, Jiangsu Province. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science), 2021, 44(1): 71–78 [裘奕斐, 王静, 徐敏. 江苏滨海县近岸海域海水、沉积物和生物体重金属分布及健康风险评价. 南京师大学报(自然科学版), 2021, 44(1): 71–78]
- SUN X, LIU F L, LIANG Z R, *et al.* Prediction of the suitability of Arctic kelp in the Yellow Sea and Bohai Sea in China based on MaxEnt model. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(5): 71–77 [孙昕, 刘福利, 梁洲瑞, 等. 基于 MaxEnt 模型预测极北海带在我国黄渤海的适生情况. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 71–77]
- SUO R Y, LIU G Y, SHI Z J, *et al.* Submerged culture experiment of *Macrocystis pyrifera* in the coastal waters of Nan Huang Cheng. Marine Fisheries Research, 1986, 7: 1–7 [索如瑛, 刘光涌, 史致基, 等. 南隍城近海巨藻悬绳潜养实验. 海洋水产研究, 1986, 7: 1–7]
- TRAN P, SHAW R, CHANTRY G, *et al.* GIS and local knowledge in disaster management: A case study of flood risk mapping in Vietnam. Disasters, 2010, 33(1): 152–169
- TYBERGHEIN L, VERBRUGGEN H, PAULY K, *et al.* Bio-ORACLE: A global environmental dataset for marine species distribution modelling. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21(2): 272–281
- WANG F J, LIU G Y, ZHANG S, *et al.* Research on submerged raft culture technology of *Macrocystis pyrifera*. Progress in Fishery Sciences, 1999, 20(1): 64–68 [王飞久, 刘光涌, 张遂, 等. 巨藻筏式养殖技术的研究. 渔业科学进展, 1999, 20(1): 64–68]
- WANG X, LIU F L, LIANG Z R, *et al.* Effects of iron ions on the growth and development of kelp gametophyte clone lines. China Fisheries Science, 2020, 27(9): 1052–1061 [王潇, 刘福利, 梁洲瑞, 等. 铁离子对海带配子体克隆系生长发育的影响. 中国水产科学, 2020, 27(9): 1052–1061]
- WANG Y S, XIE B Y, WAN F H, *et al.* Application of ROC curve analysis in evaluating invasive species distribution model. Biodiversity, 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. 生物多样性, 2007, 15(4): 365–372]
- XIONG Q L, HE Y L, DENG F Y, *et al.* Response assessment of alpine vegetation to climate change in Southwest China based on MaxEnt model. Journal of Ecology, 2019, 39(24): 9033–9043 [熊巧利, 何云玲, 邓福英, 等. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估. 生态学报, 2019, 39(24): 9033–9043]
- XU D H, LI J, ZHAO J T, *et al.* Grain size distribution characteristics of surface sediments in Liaodong Bay and its geological significance. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(5): 35–42 [徐东浩, 李军, 赵京涛, 等. 辽东湾表层沉积物粒度分布特征及其地质意义. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(5): 35–42]
- XU H Y. Study on the transformation of nutritional status and nutrient benchmark in the Bohai Sea. Master's Thesis of the First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2020 [徐菡悦. 渤海营养状态转变及营养盐基



- 准研究. 自然资源部第一海洋研究所硕士研究生学位论文, 2020]
- ZHANG H W, ZHAO J, YAN B J, *et al.* Prediction of suitable habitat of *Lantana camara* in China based on MaxEnt model and GIS. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(11): 1420–1427 [张华伟, 赵健, 阎波杰, 等. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 的马缨丹在中国的适生区预测. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(11): 1420–1427]
- ZHU G P, QIAO H J. Impact of MaxEnt model complexity on prediction of potential distribution areas of species. *Biodiversity*, 2016, 24(10): 1189–1199 [朱耿平, 乔慧捷. MaxEnt 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. *生物多样性*, 2016, 24(10): 1189–1196]
- ZHU Y L. American research on marine farms. *Fishery Modernization*, 1984(3): 16–17, 48 [朱永良. 美国对海洋农场的研究. *渔业现代化*, 1984(3): 16–17, 48]
- ZIMMERMAN R C, KREMER J N. In situ growth and chemical composition of the giant kelp, *Macrocystis pyrifera*: Response to temporal changes in ambient nutrient availability. *Marine Ecology Progress Series*, 1986, 27: 277–285

(编辑 冯小花)

## Potential Geographic Distribution of *Macrocystis pyrifera* in China Based on MaxEnt Model and ArcGIS

LI Baoxian<sup>1,2</sup>, LI Guoliang<sup>2</sup>, YAO Haiqin<sup>2</sup>, SHEN Xin<sup>1</sup>, LU Xiaoping<sup>2</sup>, LIANG Zhouhui<sup>2</sup>,  
LIU Fuli<sup>2</sup>, ZHANG Pengyan<sup>2</sup>, WANG Wenjun<sup>2①</sup>

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Marine Biotechnology, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222005, China; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract** *Macrocystis pyrifera* is a large perennial brown alga used as a raw material in the chemical, energy, and medicine industries. It is also a high-quality material for the construction of seaweed beds with extremely high economic and ecological value. In the 1980s, *M. pyrifera* was introduced to China, and many experiments on its seedling and cultivation technologies were undertaken. However, research on its ecological adaptability is relatively challenging, and the aquaculture industry has not yet developed due to bottleneck problems. In the present study, the MaxEnt model was used to predict the suitability and potential invasion risk of *M. pyrifera* in China to lay a foundation for *M. pyrifera* culture industry development and marine ecological construction. Parameter optimization showed that the predictive performance of the model was the best when the feature combination was product, quadratic, and hinge features and the regularization multiplier was 0.8. Considering the correlation between environmental attributes and their contribution to the model, six environmental factors were selected to construct a prediction model for the suitability of *M. pyrifera*. Among these, light intensity and temperature produced the greatest impact on the natural distribution of *M. pyrifera*. For high suitable growth probability, the optimal light intensity was  $> 2 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and the optimum temperature range was 10.5–17°C. Combined with ArcGIS, the modeling results showed that the suitable habitats for *M. pyrifera* in China are mainly distributed in the Yellow Sea and Bohai Sea, accounting for approximately 13.17% of the sea area, with a marginal suitability of 5.46%, low suitability of 2.85%, moderate suitability of 1.20%, and high suitability of 3.66%. Furthermore, Liaodong Bay and Bohai Bay are suitable sea areas for the introduction and cultivation of *M. pyrifera* as well as the construction of *M. pyrifera* farms. Some areas in Liaodong Bay are highly suitable, indicating a certain risk of invasion. Therefore, ecological safety evaluations should be strengthened if *M. pyrifera* cultivation is promoted near this area.

**Key words** *Macrocystis pyrifera*; MaxEnt; ArcGIS; Potential suitable area

① Corresponding author: WANG Wenjun, E-mail: wjwang@ysfri.ac.cn