DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.2020091

山东近海口虾蛄空间分布特征及其与环境因子的关系

李鹏程^{1,2},张崇良^{1,2},任一平^{1,2,3},徐宾铎^{1,2},薛莹^{1,2},李明坤^{1,2}

1. 中国海洋大学水产学院,山东 青岛 266003;

2. 海州湾渔业生态系统教育部野外观测研究站, 山东 青岛 266003;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室,海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室,山东 青岛 266237

摘要:近年来口虾蛄(Oratosquilla oratoria)为代表的甲壳类生物在海洋生态系统中的数量和经济地位有着显著的 增长,但其空间分布规律及与环境因子的关系尚不明确。为了解山东近海海域口虾蛄的栖息分布规律及其主要环 境因子的影响,本研究根据 2016—2017 年在山东近海进行的 4 个航次渔业资源和环境调查,采用广义线性模型、 广义可加模型以及多层前馈神经网络模型等方法,比较分析了口虾蛄的空间分布特征及环境因子的关系。结果表 明,口虾蛄的资源密度在季节间存在明显差异,夏季密度最高,春、秋季次之,冬季最低;近岸资源密度高于远岸, 且由南到北呈逐渐增加的趋势。模型分析表明,纬度、海水底层温度和底层盐度对口虾蛄的资源密度分布有显著 影响。3 种模型中,广义可加模型的拟合效果最好,多层前馈神经网络模型预测准确性最好。本研究通过不同模型 结果的比较,揭示了影响山东近海口虾蛄的空间分布特征与关键环境因子的关系,旨在为口虾蛄的合理开发和利 用提供理论支撑。

关键词:口虾蛄;广义线性模型;广义可加模型;多层前馈神经网络模型;模型比较;环境因子效应;山东近海中图分类号:S931 文献标志码:A 文章编号:1005-8737-(2020)12-1515-09

口虾蛄(Oratosquilla oratoria)属于节肢动物 门(Arthropoda)、甲壳纲(Crustacea)、软甲亚纲 (Malacostraca)、口足目(Stomatopota)、虾蛄科 (Squillidae)、口虾蛄属(Oratosquilla)^[1],广泛分布 于俄罗斯、日本、中国及东南亚海域^[2],是山东近 海渔业的高产种类^[3-4]。近年来,由于过度捕捞、 人类活动及环境污染造成的海洋生态环境变化^[5], 以口虾蛄为代表的甲壳类生物资源在受损的海洋 生态系统中得到迅速增长,为合理开发口虾蛄的 经济价值,对口虾蛄资源的科学管理势在必行。 因此,预测口虾蛄资源密度的空间分布变化,探 究其资源分布与环境因子的关系,可以为口虾蛄 渔业管理提供基础资料。

本研究聚焦于口虾蛄的空间分布与环境因子的关系,以往的相关研究多采用单一的统计方法

进行建模预测,缺乏模型间的比较分析,如刘修 泽等^[6]和吴强等^[7]运用 Pearson 相关分析分别研究 了辽东湾和莱州湾口虾蛄的空间分布和影响因素, 许莉莉等^[8]采用相关性分析研究了海州湾及邻近 海域口虾蛄资源分布规律,李明坤等^[9]利用 Moran's *I* 指数和分布重心法等研究了 4 个季节口 虾蛄的空间自相关特征。在以往的研究中最常用 的模型是物种分布模型(species distribution models, SDMs),如广义线性模型(generalized linear models, GLM)和广义可加模型(generalized linear models, GLM)和广义可加模型(generalized additive models, GAM)^[10]。其中 GAM 能够灵活地拟 合数据复杂关系,更好的处理非线性和非连续型 变量。此外,越来越多的研究者开始将人工神经 网络(artificial neural network, ANNs)^[11-12]中的多 层前馈神经网络模型(back propagation neural

收稿日期: 2020-04-06; 修订日期: 2020-05-27.

基金项目:国家自然科学基金项目(31802301);国家重点研发计划项目(2018YFD0900906).

作者简介:李鹏程(1995-),男,硕士研究生,主要从事渔业资源评估与管理研究. E-mail: 17805450993m@sina.cn

通信作者: 张崇良, 副教授, 主要从事渔业生态动力学和渔业资源评估与管理研究. E-mail: zcl.0903@163.com

network models, BP-NNM)用于物种分布的研究。 它能够并行分布处理数据,且对变量的共线性较 稳健。本研究根据 2016—2017 年在山东近海进行 的底拖网调查和环境数据,构建 GLM、GAM 与 BP-NNM 3 种物种分布模型进行对比,分析环境 因子对口虾蛄空间分布的影响,旨在为山东近海 口虾蛄的资源保护和利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

口虾蛄样品来自 2016 年 10 月, 2017 年 1 月、 5 月和 8 月在山东近海 119.3°E~123.5°E、 35°N~37°N 调查海域采用系统抽样设置 63 个站 位(图 1),进行的 4 个航次渔业资源调查,获得口 虾蛄有效总资源量 192.32 kg/h,有效样本量 18759 个。使用单拖渔船的功率为 220 kW,拖速 为 2~3 kn,每站作业时间为 0.5~1 h。调查网具的 网口宽约 15 m,网口高度约为 7.5 m,网囊网目大 小为 17 mm。环境数据来自同步使用的 CTD (型 号为 CTD75M/1167),样品处理和环境数据测定 等均按照《海洋调查规范》(SC/T 9403-2012)进行^[13], 口虾蛄数据按照拖网时间(1 h)和拖速(2 kn)进行 标准化,得到口虾蛄的资源量(g/h)。



1.2 模型方法

在描述物种分布与环境关系的众多模型中, 广义线性模型(GLM)被广泛应用^[14-15]。GLM 是在 标准线性模型的基础上发展得到的,模型假设响 应变量不再局限于正态分布而是服从于指数分布 族中的某一种分布,极大地扩展了标准线性模型, 其表达式^[16]为:

$$g(\mu_{\rm Y}) = \beta_0 + \sum_i^n \beta_i \chi_i + \varepsilon$$

式中, $g(\mu_Y)$ 为连接函数, μ_Y 为 Y的条件均值, Y为响 应变量, β_0 为截距, β_i 为回归系数, χ_i 为解释变 量, ε 为误差项。

GLM 不能处理复杂的响应关系^[17],为此产生了 广义加法模型(GAM)^[18-19]。GAM 是 GLM 的半参数 化扩展形式,不仅对预测变量进行独立的平滑处理, 且以加性方式计算响应变化的程度,使得变量间的 线性和非线性关系得以很好地展现。表达式^[20]为:

$$g(\mu_i) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \varepsilon$$

式中, $g(\mu_i)$ 为关联函数; μ_i 为响应变量; β_0 为截 距; n为预测变量数目; f_i 为样条平滑函数; x_i 为 解释变量, ε 为误差项。

人工神经网络(ANNs)是一种模仿动物神经网络 行为特征,进行分布式并行信息处理的算法数学模 型^[21],通过调整内部大量节点之间相互连接的关 系,从而达到处理信息的目的。具有模拟分布存 储及学习能力和模拟复杂的非线性关系^[22]等特 点。BP-NNM是 ANNs 中最基础、应用最为广泛 的模型^[23],相关统计表明在各种 ANNs 的应用中, 80%的人使用 BP-NNM^[24-25]。BP-NNM 是一种按 误差逆向传播算法训练的多层前馈网络^[26],是通 过自身学习来实现高度复杂的非线性映射,能够 学习和存贮大量输入-输出模式映射关系,而无 需事前描述这种映射关系的数学方程^[26]。

1.3 变量选择

为了排除因子间相关关系的影响,本研究采 用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)对 海水表层温度、表层盐度、底层温度、底层盐度 和水深 5 个环境因子,以及季节、经度和纬度 3 个时空因子进行多重共线性检验。√VIF>2表明 其存在多重共线性^[27],因此去除海水表层温度这 一因子。根据 AIC 值和累计偏差解释率检验模型 的拟合效果。AIC 计算公式如下:

AIC=2k-2lnL

式中, k 为参数个数, L 是似然函数。

将资源密度(Y)进行对数转化,得到 log₁₀ (Y+1),使其分布服从正态分布,并作为响应变 量。本研究采用逐步回归的方法进行模型的拟合 ^[28],运用卡方检验(chi-square test)评估因子对响应 变量影响的显著性^[29]。

1.4 模型预测性能的评估

本研究采用交叉验证检验和对比 3 种模型的 预测效果。从 144 个样本数据中随机抽取 80%作 为训练数据建立模型, 20%作为预测数据对模型 的拟合效果进行评估。根据预测值(*P_i*)与真实值 (*O_i*)的误差判断模型的预测效果,即将预测值与 真实值进行线性回归得到均方根误差(root mean square error, RMSE)、斜率(slope)、截距(intercept) 和决定系数 *R*²的平均值重复交叉验证 100 次。其 中斜率表示预测值与真实值的拟合程度^[30],当斜 率趋向于 1 时表明预测值和真实值越接近,表明 模型对数据的拟合效果越好,反之越差。

均方根误差(RMSE)作为衡量模型预测准确 度的指数,能够反应模型预测值的离散程度^[31]。 RMSE 值越小,表示模型预测的准确性越高,描 述实验数据更精确。计算公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (O_i - P_i)^2}$$

式中, *O_i*代表真实值; *P_i*代表预测值; *n* 代表真实 值个数。

决定系数 R² 表示在因变量 Y 的总平方和中, 由自变量 X 引起的平方和所占的比例^[32]。R²一般 用来对预测模型拟合程度的总体评价,当 R² 越接 近 1 时,表示预测模型的参考价值越高,越接近 0 时,模型参考价值越低。

$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$

式中,SSE代表误差平方和;SST代表总离差平方和。

2 结果与分析

2.1 口虾蛄空间分布

口虾蛄的分布整体上呈近岸资源密度较高、 远岸资源密度较低,从北到南递减的趋势。口虾 蛄主要分布在 36°N 以北海域。春、夏、秋、冬各 季节口虾蛄的平均资源密度分别为 27.00 kg/km²、 68.90 kg/km²、23.29 kg/km²和 7.93 kg/km²,由高 到低依次为夏季>春季>秋季>冬季。从季节变化 来看,在春、夏季,口虾蛄近岸资源密度较高,远 岸资源密度较低,秋、冬季,口虾蛄远岸资源密度 较高,近岸海域资源密度较低(图 2,表 1)。

表 1 山东近海各季节口虾蛄平均资源密度

 Tab. 1
 Average resource density of Oratosquilla oratoria in different seasons in Shandong coastal waters

季节 season	平均资源密度/(kg/km ²) average resource density
春季 spring	27.00
夏季 summer	68.90
秋季 autumn	23.29
冬季 winter	7.93

2.2 口虾蛄分布的影响因子

GLM、GAM和BP-NNM3种模型的累积偏差解释率分别为44.02%、46.90%和41.95%(表2), GAM拟合效果最好。在GLM中,纬度、海水底层温度和海水底层盐度等因子的影响效果显著(P<0.05),纬度的贡献率最大为40.19%,海水底层温度和底层盐度的贡献率分别为1.91%和1.92%。GAM中纬度、海水底层盐度和底层温度的影响显著(P<0.05),纬度的贡献率最大为

表 2 三种模型拟合结果 Tab. 2 Fitting results of three models

模型 model	加入的 因子 added factor	累积偏差解释率 /% accumulated deviance ex- plained	贡献率 /% importance	卡方检验 chi- square test	AIC
GLM	Ν	40.19	40.19	< 0.001	430.27
	SBT	42.10	1.91	< 0.01	426.55
_	SBS	44.02	1.92	< 0.05	422.70
GAM	Ν	40.60	40.60	< 0.001	430.27
	SBS	45.20	4.60	< 0.05	422.91
	SBT	46.90	1.70	< 0.05	419.89
BP-NNM	Ν	18.30	18.30	-	-
	SBT	37.48	19.18	-	-
	SBS	41.95	4.47	-	-

注: N 表示纬度; SBS 表示海水底层盐度; SBT 表示海水底层温度; <0.05 表示差异显著; <0.01 和<0.001 表示差异极显著; BP-NNM 模型不提供卡方检验和 AIC 结果.

Notes: N represents latitude; SBS represents bottom salinity; SBT represents bottom temperature; less than 0.05 represents significant difference; less than 0.01 and less than 0.001 represent extremely significant difference; BP-NNM model does not provide chi-square test and AIC results.



40.60%;其次是海水底层盐度贡献率为 4.60%, 海水底层温度贡献率较低为 1.70%;在 BP-NNM 中贡献率最大的是海水底层盐度,为 19.18%;纬 度和海水底层温度的贡献率分别为 18.30%和 4.47%。

2.3 环境变量的影响效应

在 GLM 中(图 3), 纬度、海水底层温度和底 层盐度对口虾蛄的资源密度影响显著(P<0.05); 口虾蛄的资源密度随着纬度、海水底层温度、海 水底层盐度的升高而增加。

在 GAM 中(图 4), 纬度、海水底层温度和底 层盐度对口虾蛄的资源密度影响均显著(P<0.05),

资源密度随海水底层温度呈线性正相关关系;资源密度随着底层盐度的升高先增加后趋于平缓,最适底层盐度为32;口虾蛄资源密度随纬度的增加先迅速增加后趋于平稳,最适纬度约为36.50°N。

2.4 预测性能评估

GLM 和 GAM 的均方根误差、斜率、截距和 *R*² 均相差不大,两种模型的预测性能基本相同。 BP-NNM 的均方根误差值为 0.397,明显小于 GLM 和 GAM; *R*² 为 0.140,低于 GLM 和 GAM (表 3)。

在 BP-NNM 中(图 5), 口虾蛄资源密度随纬度 增加整体上呈逐渐增长的趋势, 随海水底层温度



图 3 各影响因子与口虾蛄资源密度之间的关系

Fig. 3 Relationship analysis diagram between each influence factor and resource density of Oratosquilla oratoria





Fig. 4 Relationship analysis diagram between each influence factor and resource density of Oratosquilla oratoria





Fig. 5 Relationship analysis diagram between each influence factor and resource density of Oratosquilla oratoria

表 3 3 种模型交叉验证结果 Tab. 3 Cross-validation results of the three models

模型 mode	均方根误差 root mean squared error	斜率 slope	截距 intercept	决定系数 <i>R</i> ²
GAM	1.045	0.440	1.121	0.422
GAM	1.051	0.437	1.123	0.417
BP-NNM	0.397	0.494	0.199	0.140

增加先减少后增加的趋势,随底层盐度的增加呈 先减少后增加的趋势。

3 讨论

3.1 口虾蛄的空间分布

研究表明,山东近海海域口虾蛄在 36°N 以北 海域资源密度相对较高,夏季平均资源密度为 68.90 kg/km²,明显高于其他 3 个季节。该研究结 果与以往研究相一致,符合夏季>秋季>春季>冬 季这一规律。如相关研究表明口虾蛄集中分布于 122°E 以西,35.5°N 以北 30 m 以浅的海域^[9],谷德 贤等^[33]发现 2009 年天津海域口虾蛄平均资源密 度的季节排序为 8 月(夏)>10 月(秋)>5 月(春)>12 月(冬),刘修泽等^[6]认为辽东湾口虾蛄平均生物 量资源密度月间排序为 8 月>9 月>11 月>6 月。口 虾蛄资源密度的季节变化可能是由口虾蛄季节性 增长、生态学习性和相关渔业活动等共同决定的。 口虾蛄存在明显的季节性生长,夏末至秋末生长 速度最快^[34], 生物量得到有效的积累, 同时口虾 蛄上一年新生个体生长、繁殖成为补充群体^[9]。 此外,由于休渔期捕捞强度下降,可能导致夏季 口虾蛄资源密度得到较大的恢复。禁渔期之后受 捕捞强度的影响,秋季口虾蛄资源密度相对下 降。春季, 口虾蛄处于性腺生长与成熟阶段(3-5 月)^[34],摄食能量大部分用于性腺的发育和成熟, 少部分用于个体生长,可能导致口虾蛄资源密度 有所降低。冬季,口虾蛄处于越冬阶段具有掘穴 过冬习性[35],捕获率降低可能导致口虾蛄资源密 度相对较低。春、夏季近岸资源密度较高,秋、 冬季远岸资源密度较高; 该结果符合口虾蛄的生 活史特征,相关研究表明口虾蛄存在季节性迁移, 12 月至翌年 3 月低温期向深水区迁移^[7],进行越 冬生活,4—10月是产卵期和幼体育肥期^[7]。春、 夏季近岸资源密度较高,这可能由于口虾蛄经过 漫长越冬之后,春、夏季在近岸进行觅食和补充 能量,同时为产卵做准备。秋、冬季口虾蛄远岸 资源密度较高,可能与口虾蛄完成交配之后开始 向深水区迁移, 趋向于在深水区越冬有关。

3.2 环境因子的影响效应

纬度、底层温度和底层盐度等环境因子在 3 种模型中均为显著影响因子。其中,温度作为影 响海洋生物的重要生态因子,能够直接影响生物的 新陈代谢是影响口虾蛄生命活动的重要因素^[36-37]。 王波等^[37]发现口虾蛄生活海域水温大致在 6~ 31 ℃,最适温度在 20~27 ℃。本研究中口虾蛄资 源密度随底层温度的增加总体呈上升趋势,这可 能与口虾蛄是变温动物, 趋向于聚集在最适温度 分布有关,口虾蛄常栖息于海底洞穴中,底层海 水温度直接影响其栖息环境,从而导致生长、发 育及生命活动直接受底层温度的影响,因此,只 有在一定温度范围内才能正常生存,在一定范围 内其生命活动随温度的升高应大致呈先上升后下 降的趋势,存在口虾蛄生存最适温度。此外本研 究中口虾蛄随底层温度升高总体呈上升趋势,未 出现下降阶段,可能与各调查站位海域温度在 6.26~27.12 ℃,均未超过最适温有关。

盐度作为重要的海洋生态因子, 与海洋生物 的耗氧影响和机体的渗透压调节有关^[38], 刘海映 等^[39]发现盐度对口虾蛄体重增长有较明显的影 响,盐度为32生长最快,其次盐度为28和36,而 盐度为24 生长最慢。本研究中, 口虾蛄资源密度 随海水底层盐度的增加总体上呈上升趋势,同时 在底层盐度为32 左右时口虾蛄资源密度最大。这 可能与环境中盐度变化影响口虾蛄的能量消耗有 关,海水盐度过高或过低均会增加用于调节渗透 压平衡的能量消耗,只有维持在最适盐度条件下, 口虾蛄用于维持渗透压稳定消耗的能量最低,更 多的用于口虾蛄生物量的积累;同时口虾蛄的耗 氧率也和盐度相关,在盐度最适时耗氧率最低, 耗氧率与口虾蛄的代谢直接相关, 耗氧率越低其 代谢过程越慢,口虾蛄能量消耗越低,可能导致 口虾蛄资源密度增大,在最适盐度即盐度为32时 口虾蛄资源密度最大。

纬度作为一个时空因子对口虾蛄资源密度分 布存在影响,在研究海域口虾蛄资源密度随纬度 的增加呈上升趋势。该结果与李明坤等^[9]发现山 东近海南部口虾蛄重心分布由春季到冬季逐渐向 南移动规律相符合。需要注意的是,纬度作为一 个综合性的影响因子可能通过水深、离岸距离等 综合作用影响口虾蛄分布。随着纬度的增加离岸 距离和水深相应减小,相关研究表明口虾蛄季节 间在深、浅水区短距离洄游,春、夏季口虾蛄分 布重心离岸较近基本位于 20~30 m 水深范围内^[9], 即春、夏季口虾蛄向近岸浅水区分布,可能导致 高纬度口虾蛄资源密度增加,秋、冬季口虾蛄向 深水区进行越冬生活,可能导致低纬度口虾蛄资 源密度较低。

本研究 3 种模型的累积偏差解释率相对较低, 均未超过 50%。一方面说明现有的解释变量不能 够完全反映该物种栖息地的生境,可能存在其他 的环境因子如离岸距离和底质类型等与口虾蛄的 分布存在密切关系。王春琳等^[40]发现口虾蛄喜栖 息于软硬适中的泥质底中,许莉莉等^[8]发现海州 湾口虾蛄主要分布在砂-粉砂-黏土、黏土质砂和 砂质底质中,以上研究表明底质类型与口虾蛄的 空间分布有密切的关系,可能影响口虾蛄的资源 密度。另一方面可能是由采样误差引起的,相关研 究表明样品采集的准确性直接影响着研究结果^[41]。 在样品的采集过程中受人为操作、调查站位分布 的影响可能降低响应变量与解释变量的关系,从 而导致累积偏差解释率相对较低。

3.3 模型的比较

3种模型中,GLM和GAM两种模型在解释变 量的选择和交叉验证结果上基本保持一致, GAM 各方面均优于 GLM。口虾蛄的资源密度与环境因 子之间可能并非简单的线性关系,更多的是一种 非连续、非线性的关系,因此 GAM 较 GLM 更适 合, GAM 和 BP-NNM 相比, GAM 的累积偏差解释 率最高表明模型的拟合效果最好,但均方根误差 较大表明模型预测的准确性较低, BP-NNM 模型 的均方根误差最小该预测模型具有较好的精确度, 但累积偏差解释率最小模型对数据的拟合效果最 差,该结论与栾静等^[29]发现的模型对现有数据的 拟合效果不能保证模型的预测性能结论相一致, 可能是因为 GAM 对训练的数据存在过度拟合现 象. 偏离了对真实值的解释导致模型对训练集之 外的数据集的预测准确性能较差。此外,为了避 免数据无法拟合和便于模型对响应变量的解释,

GLM和GAM没有考虑解释变量之间的交互效应, 可能导致模型的预测的准确性降低。而 BP-NNM 具有自身学习和并行处理^[11]的特点来实现高度复 杂的非线性映射,从而通过不断学习提高模型预 测的准确性^[42]。但通过不断调整训练集和学习方 法,在降低对数据拟合偶然性的同时可能导致模 型对训练数据的拟合效果降低,可能导致模型的 累积偏差解释率较低。

4 结语

本研究利用 3 种不同模型分析口虾蛄资源密 度空间分布与环境因子之间的关系,纬度、海水 底层温度和底层盐度在不同模型中均为影响口虾 蛄分布的重要因子。随着海洋生态环境的破坏和 捕捞压力的增强等多方面原因, 传统的经济鱼类 资源出现衰退甚至濒临枯竭,而口虾蛄由于其生 命周期短、繁殖能力强等特点,已成为山东近海 重要的经济种类。由于缺乏行之有效的管理和针 对性保护策略的缺失, 口虾蛄捕捞产量开始逐年 下降。因此,结合山东近海口虾蛄的空间分布特 征及关键影响因子,提出捕捞强度季节间差异和 栖息地保护等策略,对口虾蛄资源的保护和合理 开发具有重要意义。今后研究需要更广泛的环境 数据,结合更为完善的模型方法,研究不同物种 的空间分布特征并探讨影响其分布的关键影响因 子,旨在为栖息地的保护及资源的合理开发和利 用提供依据。

参考文献:

- [1] Du X W. Genetic population genetic variation of Oratosquilla oratoria in eastern coastal waters of China[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2016. [杜欣蔚. 中国东部 近海口虾蛄群体遗传多样性研究[D]. 舟山: 浙江海洋大 学, 2016.]
- [2] Yang C, Su X R, Li T W. Reproduction and artificial propagation of mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*)[J]. Shandong Fisheries, 2004, 21(3): 9-11. [杨春, 苏秀榕, 李太武. 口虾蛄的繁殖和人工育苗[J]. 齐鲁渔业, 2004, 21(3): 9-11.]
- [3] Fisheries Bureau, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China Fishery Statistical Yearbook 2006[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 9. [中华人

民共和国农业部渔业局.中国渔业统计年鉴2006[M].北 京:中国农业出版社,2006:9.]

- [4] Ding G, Zhang D Z, Zhang H B, et al. Genetic diversity of Oratosquilla oratoria population in Shandong sea area[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(1): 254-256. [丁鸽, 张代臻,张华彬,等.山东海域口虾蛄种群的遗传多样性 研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 254-256.]
- [5] Yu C G, Chen Q Z, Chen X Q, et al. Species composition and quantitative distribution of fish in the Zhoushan fishing ground and its adjacent waters[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 410-417. [俞存根,陈全震,陈小庆, 等. 舟山渔场及邻近海域鱼类种类组成和数量分布[J]. 海 洋与湖沼, 2010, 41(3): 410-417.]
- [6] Liu X Z, Guo D, Wang A Y, et al. The resource characteristics and their variation of *Oratosquilla oratoria* in Liaodong Bay[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(3): 602-608.
 [刘修泽, 郭栋, 王爱勇, 等. 辽东湾海域口虾蛄的资源特征及变化[J]. 水生生物学报, 2014, 38(3): 602-608.]
- [7] Wu Q, Chen R S, Huang J X, et al. Fishery biology characteristics, temporal and spatial distribution of *Oratosquilla oratoria* in Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(8): 1166-1177. [吴强,陈瑞盛,黄经献,等. 莱州湾口虾蛄的生物学特征与时空分布[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1166-1177.]
- [8] Xu L L, Xue Y, Jiao Y, et al. Population structure and spatial distribution of *Oratosquilla oratoria* in Haizhou Bay and adjacent waters[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(4): 28-36. [许莉莉,薛莹, 焦燕,等. 海州湾及邻 近海域口虾蛄群体结构及资源分布特征[J]. 中国海洋大 学学报(自然科学版), 2017, 47(4): 28-36.]
- [9] Li M K, Xu B D, Xue Y, et al. Spatial distribution characteristics and seasonal variation of *Oratosquilla oratoria* in the southern coastal waters of Shandong Province[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(8): 1749-1758. [李明坤, 徐宾 铎, 薛莹, 等. 山东南部近海口虾蛄空间分布特征及其季 节变化[J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1749-1758.]
- [10] Yu H, Jiao Y, Carstensen L W. Performance comparison between spatial interpolation and GLM/GAM in estimating relative abundance indices through a simulation study[J]. Fisheries Research, 2013, 147: 186-195.
- [11] Lek S, Delacoste M, Baran P, et al. Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology[J]. Ecological Modelling, 1996, 90(1): 39-52.
- [12] Pearson R G, Dawson T P, Berry P M, et al. SPECIES: A spatial evaluation of climate impact on the envelope of species[J]. Ecological Modelling, 2002, 154(3): 289-300.
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey, Part 6: Marine biological

survey GB/T 2763.6-2007[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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, 2008.]

- [14] Austin M P, Meyers J A. Current approaches to modelling the environmental niche of eucalypts: implication for management of forest biodiversity[J]. Forest Ecology and Management, 1996, 85(1-3): 95-106.
- [15] Brito J C, Crespo E G, Paulo O S. Modelling wildlife distributions: Logistic multiple regression vs overlap analysis[J]. Ecography, 1999, 22(3): 251-260.
- [16] Chen X J, Gao F, Guan W J, et al. Review of fishery forecasting technology and its models[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(8): 1270-1280. [陈新军, 高峰, 官文江, 等. 渔情预报技术及模型研究进展[J]. 水产学报, 2013, 37(8): 1270-1280.]
- [17] Yee T W, Mitchell N D. Generalized additive models in plant ecology[J]. Journal of Vegetation Science, 1991, 2(5): 587-602.
- [18] Frescino T S, Edwards T C Jr, Moisen G G. Modeling spatially explicit forest structural attributes using generalized additive models[J]. Journal of Vegetation Science, 2001, 12(1): 15-26.
- [19] Lehmann A, Overton J M, Leathwick J R. GRASP: Generalized regression analysis and spatial prediction[J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2-3): 189-207.
- [20] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized Additive Models[M]. London/New York: Chapman and Hall, 1990: 135-136.
- [21] Zhang X Q. Application of artificial neural networks in iron and steel materials research[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2012, 40(2): 59-63. [张修群. BP 神经网 络在钢铁工业中的应用[J]. 金属材料与冶金工程, 2012, 40(2): 59-63.]
- [22] Wang J X. Application of intelligent control technology in intelligent building[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2004.
 [王金选. 智能控制技术在智能建筑中的应用[D]. 厦门: 华侨大学, 2004.]
- [23] Fan J N, Wang Z L, Qian F. Research progress structural design of hidden layer in BP artificial neural networks[J]. Control Engineering of China, 2005, 12(S1): 109-113. [范佳 妮, 王振雷, 钱锋. BP 人工神经网络隐层结构设计的研究 进展[J]. 控制工程, 2005, 12(S1): 109-113.]
- [24] Wang K. Application of BP in digital tube word recognition[J]. China Data Communications, 2004, 6(11): 88-91. [王 坤. BP 在数码管字识别中的应用[J]. 中国数据通信, 2004, 6(11): 88-91.]
- [25] Zhang L, Hu C, Qian F. An overview of the improved methods for solving the problem of local minimum in the BP algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2004, 17(9):

33-34, 50. [张磊, 胡春, 钱锋. BP 算法局部极小问题改进的研究进展[J]. 工业控制计算机, 2004, 17(9): 33-34, 50.]

- [26] Xin H T, Yang D J, Kang J. Application of BP neural network algorithm in evaluation of high-tech products[J]. Business Economy, 2010(24): 26-28. [辛海涛,杨殿军,康靖.
 BP 神经元网络算法在高新技术产品评价中的应用[J]. 商业经济, 2010(24): 26-28.]
- [27] Kabacoff R. R in Action: Data Analysis and Graphics with R[M]. Greenwich: Manning Publications, 2011.
- [28] Wood S N. Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models[J]. Journal of the American Statistical Association, 2004, 99(467): 673-686.
- [29] Luan J, Zhang C L, Xu B D, et al. Relationship between catch distribution of Portunid crab (*Charybdis bimaculata*) and environmental factors based on three species distribution models in Haizhou Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 889-901. [栾静, 张崇良, 徐宾铎, 等. 海州湾 双斑蟳栖息分布特征与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 889-901.]
- [30] Yao L. The quantitative analysis and microscopic prediction model of vehicle emissions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. [姚磊. 机动车尾气排放量化分 析及微观预测模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.]
- [31] Hyndman R J, Koehler A B. Another look at measures of forecast accuracy[J]. International Journal of Forecasting, 2006, 22(4): 679-688.
- [32] Li J W, Chen C H, Sun Y, et al. A method of total partial regression sum of squares for selecting variables in the linear model[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2007, 20(2): 126-127. [李进文, 陈朝辉, 孙燕, 等. 多元线性回归模型 变量选择的总偏回归平方和法[J]. 数理医药学杂志, 2007, 20(2): 126-127.]
- [33] Gu D X, Liu M L. Analysis on the population structure and abundance of *Oratosquilla oratoria* in Tianjin sea area[J]. Hebei Fisheries, 2011(8): 24-26. [谷德贤, 刘茂利. 天津海 域口虾蛄群体结构及资源量分析[J]. 河北渔业, 2011(8): 24-26.]
- [34] Wang C L, Xu S L, Mei W X, et al. A biological basic character of *Oratosquilla oratoria*[J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1996, 15(1): 60-62. [王春琳, 徐善良, 梅 文骧, 等. 口虾蛄的生物学基本特征[J]. 浙江水产学院学 报, 1996, 15(1): 60-62.]
- [35] Cliff A D, Ord K. Spatial autocorrelation: A review of existing and new measures with applications[J]. Economic Geography, 1970, 46: 269-292.
- [36] Xu H L, Liu H Y, Lin Y J. Effect of temperature and salinity on respiration of Mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*)[J]. Fisheries Science, 2008, 27(9): 443-446. [徐海龙, 刘海映,

1523

林月娇. 温度和盐度对口虾蛄呼吸的影响[J]. 水产科学, 2008, 27(9): 443-446.]

- [37] Wang B, Zhang X L, Sun P X. On biological characters and artificial seedling-rearing techniques of Mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*)[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1998, 16(2): 64-73. [王波,张锡烈, 孙丕喜. 口虾蛄的生物学特征及其人工苗种生产技术[J]. 黄渤海海洋, 1998, 16(2): 64-73.]
- [38] Zhang S, Dong S L, Wang F. Progress of studies on energy metabolism of decapod[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1998, 5(4): 89-92. [张硕, 董双林, 王芳. 虾蟹类能 量代谢的研究进展[J]. 中国水产科学, 1998, 5(4): 89-92.]
- [39] Liu H Y, Xu H L, Lin Y J. The effect of salinity on survival and growth of Mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*) in Dalian coast[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2006, 21(2): 180-183. [刘海映, 徐海龙, 林月娇. 盐度对口虾蛄

存活和生长的影响[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(2): 180-183.]

- [40] Wang C L, Xu S L, Mei W X, et al. Preliminary observations on appendage morphology and living behaviors of *Oratosquilla oratoria*[J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1996, 15(1): 9-14. [王春琳, 徐善良, 梅文骧, 等. 口虾蛄 的附肢形态及生活习性的初步观察[J]. 浙江水产学院学 报, 1996, 15(1): 9-14.]
- [41] Jing Y J. Quality control of sanitary emergency inspection[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2010, 20(6): 1531-1533. [敬永计. 突发公共卫生事件检验的质量 控制[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(6): 1531-1533.]
- [42] Ling Z. Freeway traffic prediction based on BP neural network[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
 [凌智. 基于 BP 神经网络的高速公路车流量预测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.]

Relationship between *Oratosquilla oratoria* spatial distribution and environmental factors in coastal Shangdong

LI Pengcheng^{1, 2}, ZHANG Chongliang^{1, 2}, REN Yiping^{1, 2, 3}, XU Binduo^{1, 2}, XUE Ying^{1, 2}, LI Mingkun^{1, 2}

- 1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
- Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China;
- 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China

Abstract: Recently, *Oratosquilla oratoria* (Crustacea) abundance and economic status have significantly increased in marine ecosystems, but the relationship between spatial distribution and environment factors is still unclear. To understand *O. oratoria* habitat distribution and the influence of the main environmental factors, the present study was carried out in 2016–2017 in the coastal waters of Shandong. Four surveys of the fishery resources and environmental factors were carried out, and the results were analyzed comparatively using generalized linear, generalized additive, and back propagation neural network models to determine the relationships between *O. oratoria* spatial distribution and environmental factors. The results indicated significant seasonal differences in *O. oratoria* density, with the highest density in summer, followed by spring and autumn, and the lowest in winter. *O. oratoria* density in the near shore was higher than that in the far shore, and it gradually increased from south to north. The model analysis showed that latitude, bottom-layer temperature, and bottom-layer salinity significantly affected *O. oratoria* density distribution. Among the three models, the generalized additive model was the best fit, and the back propagation neural network model had the best prediction accuracy. By comparing the results of the different models, this study revealed *O. oratoria* spatial distribution characteristics and key environmental factors affecting distribution, and provided theoretical support for rational *O. oratoria* fisheries development and utilization.

Key words: *Oratosquilla oratoria*; generalized linear model; generalized additive model; back propagation neural network model (BP-NNM); model comparison; environmental factors effect; coastal Shangdong

Corresponding author: ZHANG Chongliang. E-mail: zcl.0903@163.com