

DOI: 10.12264/JFSC2020-0346

山东近海春季口虾蛄空间分布与关键环境因子及生物学特性的关系

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}

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: 性别和年龄等生物学特征对口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)栖息地分布有重要影响。为探究口虾蛄空间分布与关键环境因子及生物学特性的关系, 本研究基于 2017 年 5 月山东近海底拖网调查数据, 对获得的口虾蛄样品依据性别和年龄划分, 将雌、雄和当年、非当年生口虾蛄相对生物量作为响应变量, 利用 BP 神经网络模型研究口虾蛄的栖息地分布特征, 分析不同性别、年龄口虾蛄空间分布和关键环境因子的关系。结果表明, 春季雌、雄口虾蛄分布无明显差异, 均分布于近岸海域; 当年生口虾蛄在各调查站位均匀分布, 而非当年生口虾蛄更趋向于近岸集中分布。通过逐步法筛选出经度、表层温度、表层盐度和水深为关键环境因子, 对口虾蛄相对生物量有显著影响。雌雄口虾蛄适宜栖息环境存在性别差异, 其中在经度 120.5°E~121.5°E 范围内, 雌性口虾蛄的适宜性高于雄性, 且对盐度的适宜性相对较高; 对低温和水深的适应范围雄性较雌性更好。非当年生口虾蛄对关键环境因子的变化更为敏感, 其中当年生对低经度的适宜性高于非当年生口虾蛄, 而对较高经度和较浅水深的适宜性较差。本研究通过对不同性别和年龄间的空间分布和关键环境因子的适宜性进行比较、分析, 揭示了除环境因素外口虾蛄自身生物学特征对其栖息地和资源量的影响, 旨为山东近海口虾蛄栖息地的保护和资源的合理利用提供参考。

关键词: 口虾蛄; BP 模型; 性别; 年龄; 关键环境因子适宜性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)09-1184-11

山东近海栖息环境优越, 是黄、渤海渔业资源主要的索饵、产卵和育肥场, 对山东近海渔业资源的维持具有重要作用^[1]。随着捕捞强度、人类活动和环境污染造成海洋生态环境变化不断加剧, 黄海的生物资源群落结构发生较大改变^[2-6]。传统的鱼类资源严重衰退, 甲壳类的比重逐渐提升, 尤其是口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)已逐渐成为山东近海的重要经济物种。

口虾蛄属节肢动物门(Arthropoda)、甲壳纲(Crustacea)、口足目(Stomatopoda)、虾蛄科(Squillaidae)、口虾蛄属^[7], 喜栖息于 10~100 m 水深, 广泛分布于我国近岸海域, 从俄罗斯大彼得海湾到日本、菲律宾、马来半岛等地均有分布^[8]。口虾

蛄资源量较大, 繁殖能力较强^[9], 是我国近岸海域体型较大的暖温性经济甲壳类^[10]。近年来, 有关口虾蛄生物学性状和空间分布特征的研究较多, 张新明等^[11]研究不同性别口虾蛄的形态性状对体重的影响, 孙东昱等^[12]对不同地区口虾蛄形态进行比较研究, 许莉莉等^[13]和李明坤等^[14]分别对海州湾和山东近海南部海域的口虾蛄进行资源量分布特征和季节变化规律研究。需要指出的是, 以往研究未涉及口虾蛄生物学特性与其分布的关系, 特别是不同性别和年龄的个体对环境因子的适宜性差异, 对口虾蛄的空间分布特征还待进一步探究。

本研究通过探究口虾蛄空间分布与关键环境

收稿日期: 2020-10-17; 修订日期: 2020-11-12.

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

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, 研究方向为渔业资源评估与管理. E-mail: zhangclg@ouc.edu.cn

因子的关系, 并将性别和年龄作为重要影响因素, 比较分析不同性别和年龄口虾蛄空间分布和关键环境因子的影响和适宜性差异, 旨在为山东近海海域口虾蛄渔业资源的合理捕捞、科学管理和栖息地保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

口虾蛄相对渔获量数据来自 2017 年 5 月进行的底拖网调查。调查海域为 119°E~123°E、35°N~37°N, 系统采样设置 48 个站位(图 1)。口虾蛄相对生物量按照拖网 1 h 和拖速 2 kn 标准化处理, 样品处理按照《海洋调查规范》(SC/T 9403-2012)进行^[15], 环境数据采用非结构化网格-有限体积方法^[16]的 FVCOM (finite-volume coastal model) 陆架模式对调查站位的实测环境数据进行模拟得到, 包括水深(Depth)、表层温度(SST)、底层温度

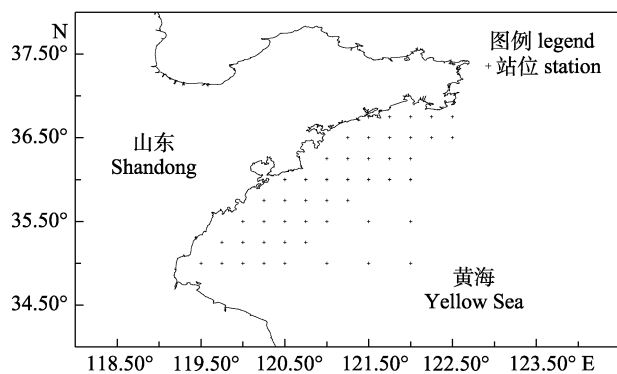
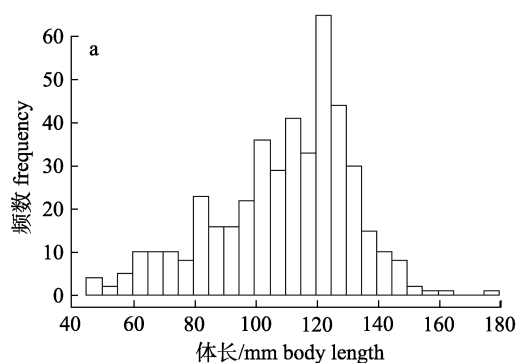


图 1 山东近海渔业资源与环境调查站位示意图

Fig. 1 Fishery resources and environment survey station in the coastal waters along Shandong



(SBT)、表层盐度(SBS)、底层盐度(SBS)。

1.2 年龄组的划分

口虾蛄等甲壳类与鱼类生长规律不同, 呈周期性蜕壳-生长节律^[17], 一般的生长方程较难拟合其生长变化速度, 从而较难鉴别其年龄。因此, 考虑到口虾蛄生长的季节性变化^[18], 本研究采用季节性生长方程^[19]对其生长过程进行拟合, 公式为:

$$L_t = L_{\infty} \left\{ 1 - e^{-K(t-t_0) - \frac{CK}{2\pi} \sin[2\pi(t-t_s)]} \right\}$$

式中, L_t 为 t 龄时的体长; L_{∞} 为口虾蛄生长的极限体长; K 为口虾蛄的生长参数; t_0 为口虾蛄理论生长起点年龄, 本研究取 $t_0 = 0$ ^[20]; t_s 为“夏季点”, 表示其生长率最高的时间; C 为生长季节性波动的幅度。

以 6 mm 为组距进行分组^[21], 绘制春季口虾蛄的体长频率分布图。运用 ELEFAN (electronic length frequency analysis)^[22]方法计算口虾蛄生长参数: $L_{\infty} = 197.95$ mm、 $K = 0.66$ 和 $t_s = 0.64$ 。由此, 估算口虾蛄各年龄的平均体长^[23], 从而划分当年生和非当年生口虾蛄的体长范围, $L_1 = 104.1$ mm。根据季节性生长方程估算口虾蛄春季当年与非当年生口虾蛄的体长范围分别为: (0, 105] 和 (105, L_{∞}) mm (图 2)。

1.3 因子筛选和模型的构建

对口虾蛄相对生物量进行对数转换得到 $\log_{10}(Y+1)$, 使其服从正态分布^[24], 作为响应变量即输出层, 选取经度、纬度以及表层温度、底层

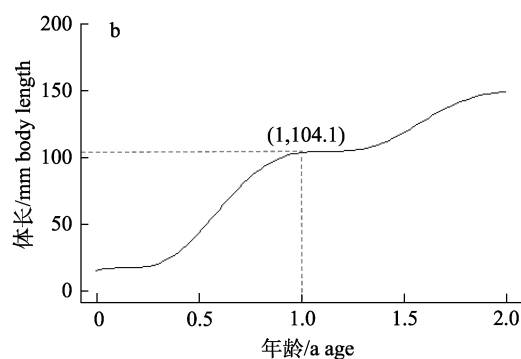


图 2 山东近海口虾蛄春季体长频率分布(a)和 ELEFAN 拟合的生长曲线(b)

Fig. 2 Spring body length frequency distribution (a) and the growth curves (b) estimated by ELEFAN of *Oratosquilla oratoria* in coastal waters of Shandong in spring

温度、表层盐度、底层盐度和水深 7 个环境因子, 作为解释变量即输入层。采用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)^[25]进行多重共线性检验, 筛选得到可以加入模型的因子。由于在渔业生态系统中可能存在大量非线性、非可加性过程^[26], 本研究选择应用最为广泛的 BP 模型^[27], 该模型能够较好地处理非线性关系^[28], 且模型的预测准确性更高, 更适合用于口虾蛄物种分布的研究。

BP 模型是一种按误差逆向传播算法训练的多层前馈网络^[29], 通过调整内部大量节点之间相互连接的关系达到处理信息的目的, 具有模拟分布存储及学习能力^[30], 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, 不断调整预测结果以达到预期值。该模型的构建通过 R3.3.2 软件中的“neuralnet”包实现(R Core Team, 2017), 没有特定的数学方程表示^[29]。

一般条件下若 VIF 超过 10, 则变量之间存在严重的多重共线性问题^[31]。本研究采用逐步法^[28]将因子逐一加至模型当中, 根据残差平方和(resi-

dual sum of squares, SSE)^[32]判断模型是否构建结束。残差平方和越小, 模型的拟合效果越好, 当其不再变化时即得到最适模型。模型选择的解释变量即为与口虾蛄的空间分布具有密切关系的关键环境因子。

2 结果与分析

2.1 口虾蛄空间分布

春季(表 1)口虾蛄雌性个体相对生物量为 20.96 kg/h, 雄性个体相对生物量为 26.00 kg/h, 其雌雄相对生物量比为 0.806, 雌性相对于雄性口虾蛄相对生物量较少。雌雄口虾蛄个体数量比为 1.083, 雌雄口虾蛄个体数量相差不大。同时, 雌雄口虾蛄空间分布基本保持一致, 均分布于近岸海域, 且随纬度的增加其相对生物量呈上升趋势(图 3)。

当年和非当年生口虾蛄个体数量比为 0.579, 当年生口虾蛄个体数量较非当年生个体相对较少(表 1); 当年和非当年生口虾蛄相对生物量分别为 8.50 kg/h 和 38.45 kg/h, 其相对生物量比为 0.221,

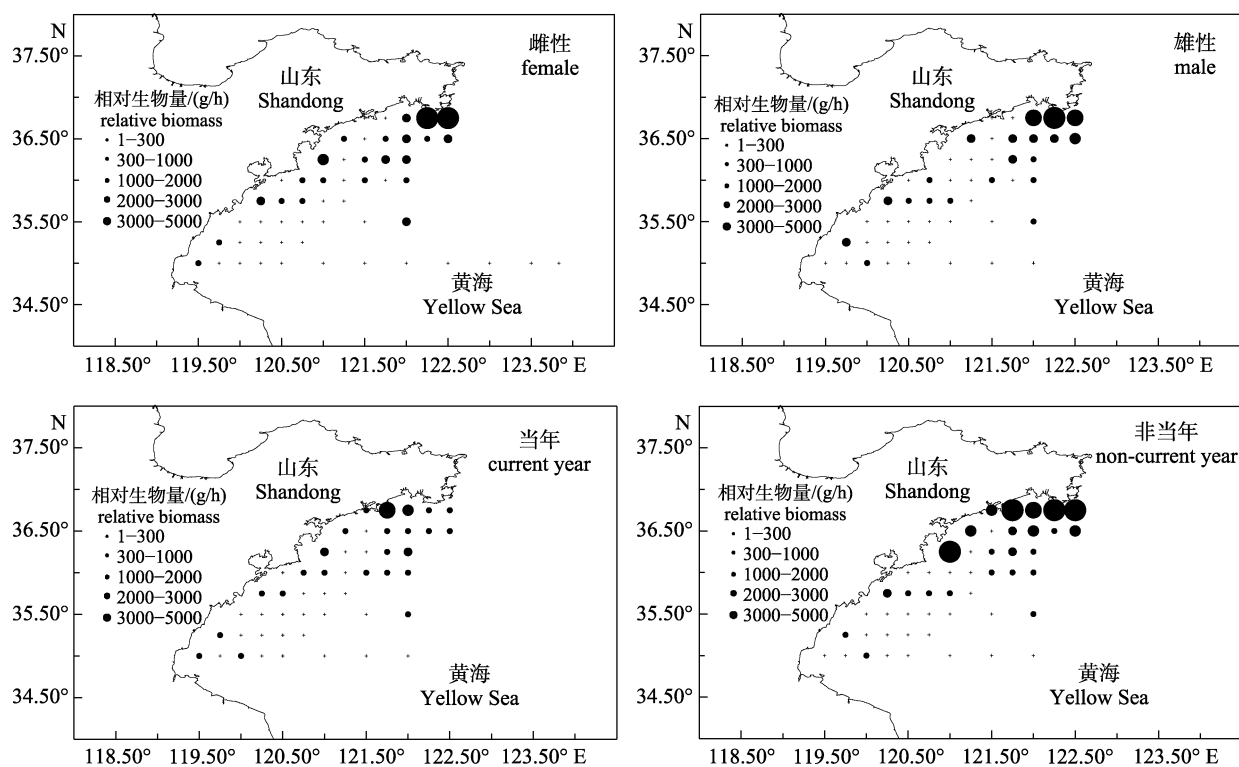


图 3 山东近海春季不同性别和年龄口虾蛄空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of *Oratosquilla oratoria* of different genders and ages in the coastal waters of Shandong in spring

表 1 山东近海春季口虾蛄不同性别、
年龄的相对生物量及比例
Tab. 1 The relative biomass and proportions of
different genders and ages of *Oratosquilla oratoria*
in the coastal waters of Shandong in spring

生物学特性 biological character	相对生物量 /(kg/h) relative biomass	相对生 物量比 relative bio- mass ratio	个体数量比 individual number ratio
雌性 female	20.96	0.806	1.083
雄性 male	26.00		
当年生 current year	8.50	0.221	0.579
非当年生 non-current year	38.45		

非当年生口虾蛄相对生物量明显较高。同时, 当年与非当年生口虾蛄空间分布存在差异, 其中当年生口虾蛄个体在各调查站位分布较均匀, 而非当年生个体更趋向于近岸集中分布(图 3)。

2.2 关键环境因子筛选

多重共线性检验结果表明, 纬度、底层温度和水深的 VIF 值均大于 10, 表明之间存在严重的多重共线性, 在建模前应给予删除。通过适当的方法进行调整^[33], 本研究中底层水温较表层水温的波动幅度大, 与实际情况不符, 因此给予删除。去除底层水温之后, 各因子 VIF 明显降低, 均可作为解释变量加入到模型的构建当中。

BP 模型选出经度、表层温度、表层盐度和水深为关键环境因子对口虾蛄的相对生物量有显著影响(表 2)。但在不同性别和年龄条件下, 各关键环境因子的贡献程度存在明显差异: 雌性口虾蛄中表层温度的贡献程度最大, 为 42.00%。其次为经度、水深和表层盐度, 贡献率分别为 25.55%、16.89%和 15.56%。对当年生口虾蛄贡献率最高的环境因子为水深, 48.37%; 其次是经度、表层温度和表层盐度, 贡献率分别为 21.44%、15.71%和 14.48%。而雄性和非当年生口虾蛄经度的贡献程度最高分别为 32.94%和 32.37%, 水深的贡献率最小, 分别为 17.95%和 18.11%。

2.3 性别的影响

雌雄口虾蛄相对生物量随经度、表层盐度和水深的变化趋势基本一致, 与表层温度的变化趋势存在一定差异(图 4)。随经度增加整体呈上升趋势; 随表层盐度的增加先减少后增加再减少; 随

表 2 不同条件下各关键环境因子的贡献程度
Tab. 2 The contribution degree of each key
environmental factor under different conditions

环境变量 environment variable	不同条件 different condition				%
	雌 female	雄 male	当年生 current year	非当年生 non-current year	
E	25.55	32.94	21.44	32.37	
SST	42.00	21.05	15.71	25.56	
SSS	15.56	28.06	14.48	23.96	
Depth	16.89	17.95	48.37	18.11	

注: E 表示经度, SST 表示表层温度, SSS 表示表层盐度, Depth 表示水深。
Note: E means longitude; SST means surface temperature; SSS means surface salinity; Depth means water depth.

水深加深呈先下降后上升。在经度方面, 雌性口虾蛄相对生物量随经度增加逐渐增加, 而雄性口虾蛄则在经度为 120.5°E~121.5°E 范围内出现略微下降; 在温度方面, 雌性口虾蛄相对生物量在 17℃之前, 随温度的升高呈下降趋势; 而雄性则表现为上升趋势; 在盐度方面, 雌性口虾蛄相对生物量在盐度超过 31.8 时开始下降, 而雄性在 31.7 时开始下降; 在水深方面, 雌性口虾蛄相对生物量在水深超过 37 m 时开始增加, 而雄性则在超过 47 m 时开始增加。

2.4 年龄的影响

当年和非当年生口虾蛄相对生物量随表层温度、表层盐度和水深的整体变化趋势基本一致, 而随经度变化趋势存在较大差异(图 5)。随表层温度升高先增加后波动下降; 随表层盐度增大呈先下降后上升再下降的趋势; 随水深的加深先下降后上升。在经度方面, 当年生口虾蛄相对生物量随经度增加先下降后上升再下降, 而非当年生口虾蛄则随经度增加呈逐渐上升趋势; 在温度方面, 非当年生口虾蛄生物量在温度到达 17.5~17.75℃, 其相对生物量较当年生个体出现明显增加, 在 17.75~18.5℃非当年较当年生个体出现急剧下降; 在盐度方面, 当年和非当年生口虾蛄均在 31.6 时开始上升, 且到 31.7 时开始下降, 其中非当年生口虾蛄相对生物量较当年生个体变化剧烈; 在水深方面, 当年生与非当年生个体在水深下降至 40 m 左右时开始出现上升, 当年生口虾蛄

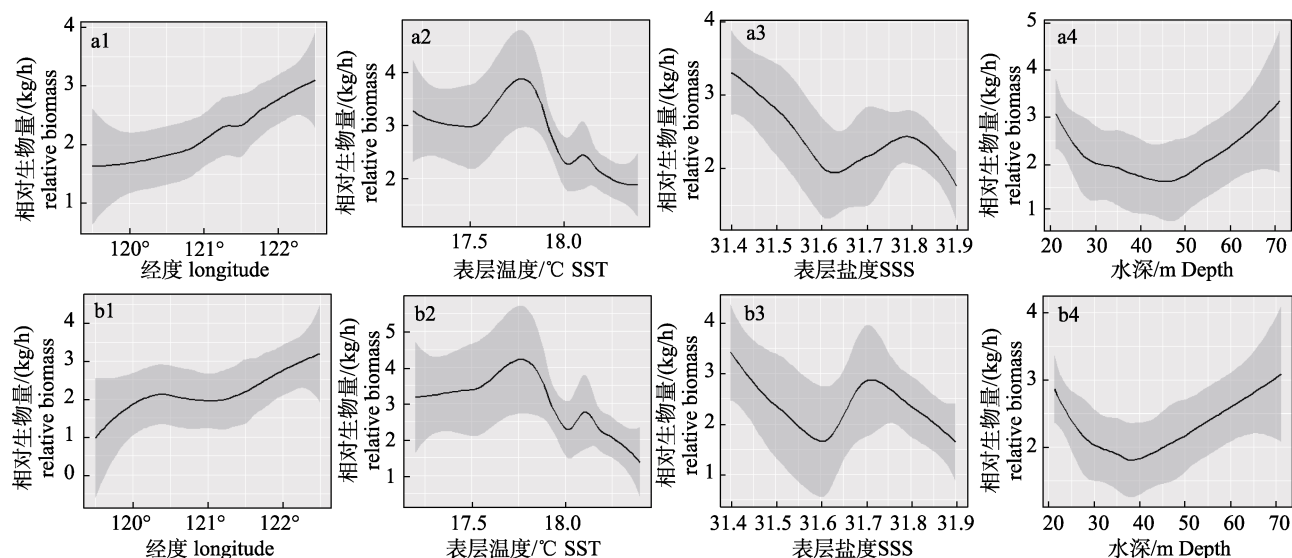


图 4 关键环境因子与不同性别口虾蛄相对生物量之间的关系

a. 雌性; b. 雄性.

Fig. 4 Relationship between key environmental factors and relative biomass of *Oratosquilla oratoria* with different genders

a. Female; b. Male.

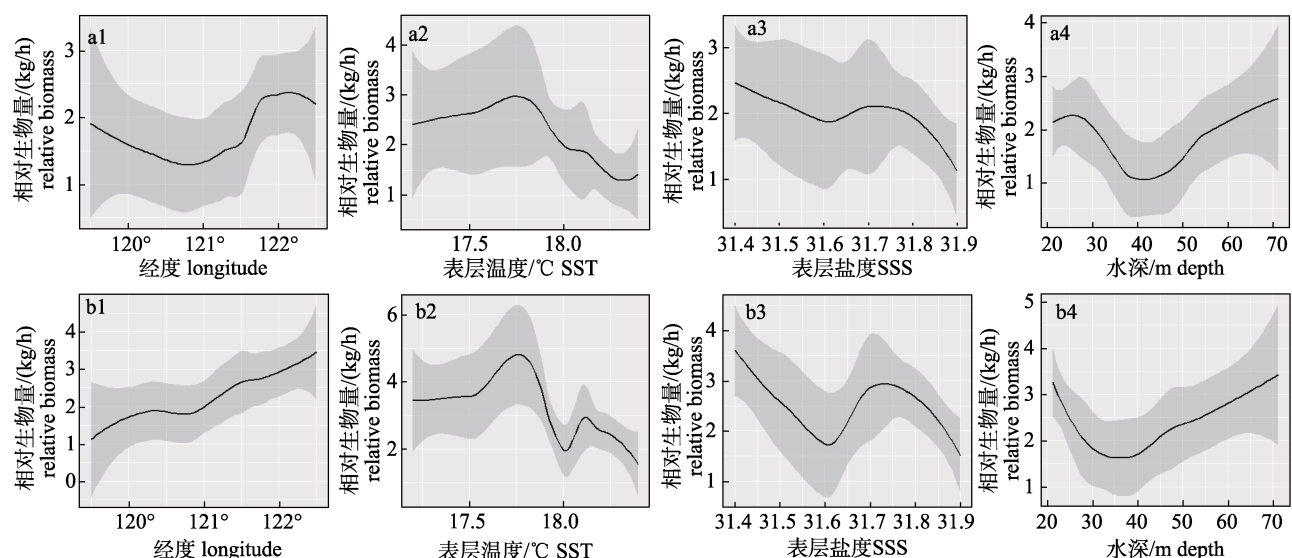


图 5 关键环境因子与不同年龄口虾蛄相对生物量之间的关系

a. 当年生个体; b. 非当年生个体.

Fig. 5 The relationship between key environmental factors and relative biomass of *Oratosquilla oratoria* with different ages

a. Individuals born in the current year; b. Individuals born in the non-current year.

相对生物量在水深达到 25 m 左右之前呈上升趋势,而非当年生个体则在水深 40 m 以浅,呈下降趋势。

3 讨论

3.1 性别和年龄对空间分布的影响

口虾蛄是典型的性别二态性物种^[12],大部分

口虾蛄雌雄个体的生长具有明显差异。蒋霞敏等^[34]在研究黑斑口虾蛄(*Oratosquilla kemp*)的形态参数时发现,雌雄个体的身体各部分生长速度在不同阶段有所差异。本研究中春季雌雄口虾蛄空间分布基本一致,分布在近岸海域,符合口虾蛄相对生物量春、夏季近岸较高的规律^[28]。性别造成的形态差异并未引起雌雄口虾蛄空间分布的明显

差异,一方面可能与雌雄口虾蛄的形态差异对口虾蛄资源分布的影响较小,在空间分布中难以表现出来有关;另一方面,口虾蛄为广温、广盐性种类^[9],对栖息环境的盐度和温度具有较强的适应性。同时,春季雌性口虾蛄个体质量明显小于雄性。该结果可能与口虾蛄的生活周期有关,3—5月为性腺生长和成熟阶段^[9],雌性口虾蛄将更多的能量用于产卵前的准备,梅文骧等^[35]研究也表明性别对口虾蛄的耗氧率有显著影响,性腺发育良好的雌体,为更多地积累卵黄,必须从外界吸收比雄性个体更多的物质和能量以满足需要,其代谢水平较高故耗氧率也高,使春季雌性口虾蛄较雄性个体质量相对较低。从形态差异考虑可能与雌性个体平均体长相对较小^[12]有关,随体长的增加口虾蛄的耗氧量明显增大;从捕食能力考虑,雌雄口虾蛄第二颚足具有显著差异,其与口虾蛄的捕食强度有密切关系,进而影响口虾蛄的空间分布。相关研究表明^[36],第二颚足是鉴别虾蛄种类的重要依据,其形态特征反映了口虾蛄的捕食方式和捕食能力^[37-38]。王春琳等^[39]对口虾蛄进行生物学观察,也发现第二颚足的长度限制了口虾蛄对饵料生物的攻击范围。雄性口虾蛄第二颚足明显大于雌性^[12],因此,对生物的捕食能力和被捕食者的数量和栖息分布等存在影响,从而对雌雄口虾蛄的分布和个体质量差异产生影响。

王春琳等^[9]研究表明口虾蛄寿命一般为2年,因此本研究区分了当年生和非当年生个体。春季当年和非当年生口虾蛄相对生物量存在明显差异,当年生个体分布较均匀,而非当年生较当年生更趋向于近岸集中分布。该结果可能与口虾蛄个体大小和繁殖特性有关。当年生口虾蛄个体较小,运动、捕食能力较差,相关研究表明^[9]口虾蛄个体大小、海区饵料生物的变化等都会对其食性造成影响。同时,口虾蛄一周年达到性成熟^[7],当年生口虾蛄均未达到性成熟年龄,不存在近岸洄游^[40]、产卵^[14]和繁殖等过程,从而使当年生个体倾向于相对稳定的空间分布。此外,也可能与当年与非当年生口虾蛄所处的生活阶段不同^[41],对关键环境因子耐受性以及饵料生物的要求在一定程度上可能存在差异有关。

3.2 环境因子的影响

雌雄口虾蛄相对生物量随经度、表层温度、表层盐度和水深的变化趋势整体上基本保持一致,但仍存在一定差异。在经度方面,雌性口虾蛄相对生物量随经度的增加逐渐增加,而雄性口虾蛄在经度为120.5°E~121.5°E出现略微下降。该结果可能与底质类型有关,李明坤等^[14]研究表明,春季高值聚集站位的底质类型均为淤泥质粉砂,而经度在120.5°E~121.5°E时其底质类型为砂-粉砂-黏土、砂质粉砂和粉砂质砂为主,不适合口虾蛄栖息,从而在该经度范围内相对生物量相对较少。同时,雌雄口虾蛄对适宜栖息地的底质类型可能存在差异,导致雌雄口虾蛄相对生物量随经度增加表现出差异。在温度方面,口虾蛄是变温动物,体温由栖息水域的水温决定,为达到控制体温的目的,只能通过积极改变所处水域位置以更好地满足栖息条件^[42]。雌雄口虾蛄相对生物量随表层温度的变化存在差异,雌性口虾蛄相对生物量在温度低于17.5℃时呈下降趋势,而雄性呈上升趋势。该结果与徐海龙等^[43]得出的当温度由14℃上升至16℃时,耗氧率出现明显增加的趋势的结果有所不同,低温抑制了口虾蛄的器官组织的活动性能,导致其体内的各种生化反应速度处于较低水平。本研究在温度低于17.5℃时雌性口虾蛄相对生物量变化趋势较之前研究有所不同,可能是雌雄个体对低温的适应性差异有关。在盐度方面,雌雄口虾蛄相对生物量与表层盐度的变化趋势基本一致,雄性口虾蛄在表层盐度超过31.7时出现下降,雌性超过31.8出现下降。该结果可能与雌雄口虾蛄对表层盐度的适应性差异有关,雌性口虾蛄对盐度的适应范围较雄性广。陈小庆等^[44]采用BIOENV分析表明,浮游动物的丰度与表层海水盐度的相关性较高,可能通过对浮游生物的影响进而对雌性口虾蛄与盐度关系造成影响。在水深方面,雌性口虾蛄在水深超过37m时相对生物量开始增加,而雄性口虾蛄则在水深47m左右开始上升。该结果可能与其生物学特性有关,相关研究表明口虾蛄主要分布在5~60m的浅海海域^[45],春季其分布重心基本位于水深0~30m范围内^[14],本研究结果符合以往研究规律。

超过一定深度其相对生物量随水深加深而增加,可能因为本研究调查站位对应的水深集中在 20~50 m,只有个别站位水深超过 50 m 且相对生物量相对较高,从而在深水区模型过高地拟合口虾蛄相对生物量与水深的关系。另外,本研究中相对生物量最低时雄性口虾蛄栖息的水深较雌性更深,可能与水深作为一个综合性影响因子^[46]有关,水深通过温度、盐度、溶解氧、饵料生物等其他因素共同作用,影响雌雄口虾蛄的相对生物量,从而对结果造成一定的影响。

当年和非当年生口虾蛄相对生物量随经度变化趋势相差较大。一方面可能是由于当年生口虾蛄的尾肢和尾节较非当年生口虾蛄个体小,而尾肢和尾节的长短与口虾蛄游泳能力有关^[47],因此当年生口虾蛄游泳能力相对较差,更容易受海流的影响导致其较难趋向于最适条件分布。另一方面,当年生口虾蛄体长较小,其第二颚足较短^[37-38]导致其捕食能力较差,受饵料生物的栖息分布影响较小,使其对环境的适应性更广。在温度和盐度方面,非当年生较当年生个体变化趋势更为明显,可能与当年生口虾蛄相对较小有关,当年生口虾蛄个体较小,相对生物量较非当年生口虾蛄相对较小,导致其变化趋势相对较弱。在温度达到 18℃后非当年生口虾蛄相对生物量出现短暂的上升,可能与口虾蛄相对生物量受各环境因子综合作用有关。而当年和非当年生个体随盐度变化趋势基本一致,但在较高盐度时,当年生较非当年生个体的相对生物量低,其可能是因为当年生个体对高盐海域的耐受能力差。相关研究表明随着表层盐度的升高,仔虾的摄食率持续下降^[48],从而对当年生口虾蛄相对生物量产生影响。此外,可能与山东海域的海流作用影响有关,如黄海暖流、黄海冷水团等,进而会对口虾蛄的时空分布产生一定的影响。在水深方面,当年生口虾蛄在较浅水域呈上升趋势,而非当年生个体呈下降趋势。造成该差异可能与其栖息的水温、繁殖特性和生活史特征有关。唐启升等^[49]研究指出,春季近岸海域水温升高较快,饵料生物生长迅速,能够为当年生口虾蛄提供充足的饵料生物;潘国良等^[50]研究也发现随着月平均底温的升高,口虾蛄

有从较深海域向较浅海域移动的趋势。虽然口虾蛄整体上在近岸海域进行索饵和产卵^[14],但当年生个体不进行生殖活动,为减少因距离洄游的能量消耗,将更多能量用于生长,可能在未达到近岸、温度能够满足其生长的适宜栖息海域分布,从而未进一步向近岸浅水区迁移。此外,在分析当年生口虾蛄相对生物量与经度、表层温度和表层盐度关系时其偏离值与非当年生个体相比相对较大,可能与有效调查样本量的大小有关。同时,也可能受环境因子贡献程度的影响,当年生个体中经度、表层温度和表层盐度对模型的贡献程度远小于水深,因此对其结果造成影响,导致其偏离值较大。

4 结语

本研究将口虾蛄根据性别和年龄进行划分,并将其相对生物量作为响应变量构建不同 BP 模型,比较分析性别和年龄对其空间分布和关键环境因子的关系,为进一步探究影响口虾蛄适宜栖息地的分布因素提供参考。在未来模型构建和评估研究中,应考虑研究对象的生物学特性,在确保有效样本数据的同时,考虑口虾蛄的雌雄比例及年龄组成,以提高分析口虾蛄资源分布现状模型质量,为海洋渔业资源管理和可持续开发和利用提供依据。

参考文献:

- [1] Chen D G. Fishery Ecology in the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991: 478-480. [陈大刚. 黄渤海渔业生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 478-480.]
- [2] Rice J, Gislason H. Patterns of change in the size spectra of numbers and diversity of the North Sea fish assemblage, as reflected in surveys and models[J]. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53(6): 1214-1225.
- [3] Rijnsdorp A D, van Leeuwen P I, Daan N, et al. Changes in abundance of demersal fish species in the North Sea between 1906-1909 and 1990-1995[J]. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53(6): 1054-1062.
- [4] Gislason H, Rice J. Modelling the response of size and diversity spectra of fish assemblages to changes in exploitation[J]. ICES Journal of Marine Science, 1998, 55(3):

- 362-370.
- [5] Jin X S, Tang Q S. Changes in fish species diversity and dominant species composition in the Yellow Sea[J]. Fisheries Research, 1996, 26(3-4): 337-352.
- [6] Xu B D, Jin X S. Variations in fish community structure during winter in the southern Yellow Sea over the period 1985–2002[J]. Fisheries Research, 2005, 71(1): 79-91.
- [7] Hamano T, Nagai Y. Burrows and larvae of *Oratosquilla oratoria* (de Haan, 1844) (Stomatopoda, Crustacea) and information on its population dynamics in Ishikari Bay[J]. Aquaculture Science, 1989, 37(3): 157-161.
- [8] Kodama K, Shimizu T, Yamakawa T, et al. Reproductive biology of the female Japanese Mantis shrimp *Oratosquilla oratoria* (Stomatopoda) in relation to changes in the seasonal pattern of larval occurrence in Tokyo Bay, Japan[J]. Fisheries Science, 2004, 70(5): 734-745.
- [9] 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.]
- [10] Liu R Y. Checklist of Marine Biota of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2008: 654-660. [刘瑞玉. 中国海洋生物名录[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 654-660.]
- [11] Zhang X M, Cheng S F. Effect and curve fitting of morphological traits to body weight between male and female Mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(6): 82-91. [张新明, 程顺峰. 不同性别口虾蛄形态性状对体重的影响分析及曲线拟合[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(6): 82-91.]
- [12] Sun D Y, Wang L, Q S Y, et al. Morphological comparison of *Oratosquilla oratoria* stocks along the coast of Haiyang and Yantai[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(1): 154-164. [孙东昱, 王蕾, 邱盛尧, 等. 海阳和烟台近岸口虾蛄群体的形态比较[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(1): 154-164.]
- [13] 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.]
- [14] 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.]
- [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) 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, 2008. [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. 中华人民共和国推荐性国家标准: 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.]
- [16] Chen C S, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [17] Yang C C, Dai Z Y, Wang A M, et al. Research progress of molting for crustacean aquatic animals[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2019, 32(4): 42-46, 69. [杨成聪, 戴振炎, 王爱民, 等. 甲壳类水产动物蜕壳研究进展[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2019, 32(4): 42-46, 69.]
- [18] Kodama K, Shiraishi H, Morita M, et al. Verification of lipofuscin-based crustacean ageing: Seasonality of lipofuscin accumulation in the stomatopod *Oratosquilla oratoria* in relation to water temperature[J]. Marine Biology, 2006, 150(1): 131-140.
- [19] Somers I F. On a seasonally oscillating growth function[J]. Fishbyte, 1988, 6(1): 8-11.
- [20] Li Z. The study on the performances of length-frequency analysis methods on the simulated and real fishery data sets[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. [李壮. 渔业体长频数分析法在模拟和实际渔业中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.]
- [21] Geng Y L, Zhang C L, Han D Y, et al. Estimation of growth parameters of *Oratosquilla oratoria* based on fishery-independent and-dependent data collected from the Coast of Shandong Province[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(4): 756-764. [耿玉玲, 张崇良, 韩东燕, 等. 基于科学调查与渔业生产数据的山东近海口虾蛄生长参数估算[J]. 中国水产科学, 2019, 26(4): 756-764.]
- [22] Pauly D, David N. ELEFAN I, a BASIC program for the objective extraction of growth parameters from length-frequency data[J]. ICLARM Contribution, 1981, 32(32):

- 205-211.
- [23] Pauly D. Theory and Management of Tropical Multispecies Stocks: A Review, with Emphasis on the Southeast Asian Demersal Fisheries[M]. Metro Manila: ICLARM, 1979.
- [24] Beverton R J H, Holt S J. On the Dynamics of Exploited Fish Populations[M]. Dordrecht: Springer, 1993.
- [25] Kabacoff R I. R in Action: Data Analysis and Graphics with R[M]. Greenwich: Manning Publications, 2011: 1474.
- [26] Guan W J, Chen X J, Gao F, et al. Environmental effects on fishing efficiency of *Scomber japonicus* for Chinese large lighting purse seine fishery in the Yellow and East China Seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(6): 949-958. [官文江, 陈新军, 高峰, 等. 海洋环境对东、黄海鲈鱼灯光围网捕捞效率的影响[J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 949-958.]
- [27] 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): 105-109. [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): 105-109.]
- [28] Li P C, Zhang C L, Ren Y P, et al. Relationship between *Oratosquilla oratoria* spatial distribution and environmental factors in coastal Shandong[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1515-1523. [李鹏程, 张崇良, 任一平, 等. 山东近海口虾蛄空间分布特征及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1515-1523.]
- [29] 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.]
- [30] 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.]
- [31] Yu X M. Study on diagnostic methods of multicollinearity in logistic regression[D]. Dalian: Dalian Medical University, 2010. [于晓牧. logistic 回归多重共线性诊断方法的研究[D]. 大连: 大连医科大学, 2010.]
- [32] Huo T B, Ma B, Tang F J, et al. Growth models and life-history pattern of *Esox lucius* in Ertixhe River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(3): 316-323. [霍堂斌, 马波, 唐富江, 等. 额尔齐斯河白斑狗鱼的生长模型和生活史类型[J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 316-323.]
- [33] Cheng C M. Comprehensive experimental course of economics and business[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2013: 97. [程春梅. 经济与工商专业综合实验教程[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2013: 97.]
- [34] Jiang X M, Zhao Q S, Wang C L. Analysis on morphological parameters of *Oratosquilla kempfi*[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2000, 39(S1): 268-270. [蒋霞敏, 赵青松, 王春琳. 黑斑口虾蛄的形态参数关系的分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(S1): 268-270.]
- [35] Mei W X, Wang C L, Xu S L, et al. A preliminary study on oxygen consumption, oxygen consumption rate and suffocation points of *Oratosquilla oratoria*[J]. Marine Fisheries, 1993, 15(6): 250-255. [梅文骧, 王春琳, 徐善良, 等. 口虾蛄耗氧量、耗氧率及窒息点初步研究[J]. 海洋渔业, 1993, 15(6): 250-255.]
- [36] Caldwell R L, Dingle H. Stomatopods[J]. Scientific American, 1976, 234(1): 80-89.
- [37] Patek S N, Caldwell R L. Extreme impact and cavitation forces of a biological hammer: Strike forces of the peacock Mantis shrimp *Odontodactylus scyllarus*[J]. Journal of Experimental Biology, 2005, 208(19): 3655-3664.
- [38] Patek S N, Korff W L, Caldwell R L. Deadly strike mechanism of a Mantis shrimp[J]. Nature, 2004, 428(6985): 819-820.
- [39] 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.]
- [40] 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.]
- [41] Yin F, Wang C L, Zhou S, et al. Optimal salinities and temperature for different phases of Mantis shrimp (*Oratosquilla kempfi*) larvae[J]. Fisheries Science, 2005, 24(11): 4-6. [尹飞, 王春琳, 周帅, 等. 黑斑口虾蛄幼体不同发育阶段的温度、盐度耐受性研究[J]. 水产科学, 2005, 24(11): 4-6.]
- [42] Chen Y J. Research on the adaptive behavior preference of *Eriocheir sinensis* H. Milne-Edwards to temperature[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. [陈永进. 中华绒螯蟹对温度的适应性行为偏好研究[D]. 南京: 南

- 京农业大学, 2014.]
- [43] 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, 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.]
- [44] Chen X Q, Chen B, Huang B, et al. Analysis on community structure of zooplankton in Zhoushan fishing ground and its adjacent area in summer[J]. Zoological Research, 2010, 31(1): 99-107. [陈小庆, 陈斌, 黄备, 等. 夏季舟山渔场及邻近海域浮游动物群落结构特征分析[J]. 动物学研究, 2010, 31(1): 99-107.]
- [45] Jin X S, Cheng J S, Qiu S Y, et al. Integrated Research and Evaluation on Fisheries Resources in Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 350-357. [金显仕, 程济生, 邱盛尧, 等. 黄渤海渔业资源综合研究与评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 350-357.]
- [46] Qiu Y S. The regional changes of fish community on the northern continental shelf of South China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 1988, 12(4): 303-313. [邱永松. 南海北部大陆架鱼类群落的区域性变化[J]. 水产学报, 1988, 12(4): 303-313.]
- [47] Biology Committee of the General Committee of China Encyclopedia, Encyclopedia of China Publishing House. Encyclopedia of China, Biology. II [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1992: 920. [中国大百科全书总委员会《生物学》委员会, 中国大百科全书出版社. 中国大百科全书, 生物学. II [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992: 920.]
- [48] Liu H Y, Zhang S, Xing K, et al. The effect of salinity on survival, food intake, and burrowing behavior in post-settlement Mantis shrimp, *Oratosquilla oratoria*[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 121-128. [刘海映, 张嵩, 邢坤, 等. 盐度对口虾蛄仔虾摄食、存活和掘穴的影响[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 121-128.]
- [49] Tang Q S, Ye M Z. The Exploitation and Conservation of Nearshore Fisheries Resources off Shandong[M]. Beijing: Agriculture Press, 1990. [唐启升, 叶懋中. 山东近海渔业资源开发与保护[M]. 北京: 农业出版社, 1990.]
- [50] Pan G L, Zhang L, Zhu Z J, et al. Spatial-temporal distribution of the biomass of *Oratosquilla oratoria* in the coastal waters of south Zhejiang during spring[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(2): 366-370. [潘国良, 张龙, 朱增军, 等. 浙江南部近岸海域春季口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)生物量的时空分布[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(2): 366-370.]

Spatial distribution of spring *Oratosquilla oratoria* in Shandong offshore and the relationships with environmental factors and biological characteristics

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

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. 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: Gender and age are important biological characteristics of *Oratosquilla oratoria*, and may affect the habitat distribution and the responses to crucial environmental factors. In order to study the role of these biological characteristics in influencing its spatial distribution and the relationships with environmental factors, we developed the BP neural network models to predict the distribution of *O. oratoria* based on the data collected from the Shandong offshore trawl survey in May 2017. The samples of *O. oratoria* were classified according to their gender and age, and the relative biomass of females/males and individuals of current/non-current year were used as the response variables in the model to compare the differences in spatial distribution and environmental adaptability of different genders and ages. The results showed that both female and male *O. oratorias* were mainly distributed in the coastal waters in spring. Meanwhile, the current-year individuals tended to be evenly distributed among survey stations, whereas the non-current individuals tended to concentrate nearshore. Longitude, surface temperature, surface salinity and water depth were selected as the key environmental factors that had important effects on relative biomass of *O. oratorias*, according to the stepwise selection method. The relative biomass of female *O. oratorias* is higher than that of male, within the longitude range of 120.5°E–121.5°E and within the range of high water salinity; meanwhile, relatively low temperature and water depth favored male more than female. At the same time, the non-current-year individuals were more suitable to the changes of key environmental factors. The current-year individuals were more suitable to the low longitude than the non-current-year individuals, but were poorly suited to higher longitude and shallow water depth. We compared the differences of spatial distribution among genders and ages, and analyzed the suitability of environmental factors and the impact of biological characteristics of *O. oratorias*, in order to provide references for the protection of *O. oratorias* habitat and the rational utilization of resources.

Key words: *Oratosquilla oratoria*; BP model; gender; age; key environmental factor; suitability

Corresponding author: ZHANG Chongliang. E-mail: zhangclg@ouc.edu.cn