

文章编号: 1000-0615(2019)09-1914-11

DOI: 10.11964/jfc.20190511818

莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区鲈资源分布特征及其与环境因子的相关性分析

王新萌¹, 盛化香¹, 刘淑德², 方光杰¹,
于浩林¹, 唐衍力^{1*}, 梁振林³

(1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 山东省水生生物资源养护管理中心, 山东 烟台 264003;

3. 山东大学(威海)海洋学院, 山东 威海 264209)

摘要: 为研究环境因子对人工鱼礁区鲈分布的影响, 实验以莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区鲈为对象, 根据2014—2017年春季和秋季礁区三重刺网调查数据, 主要应用GAM模型研究了水温、盐度、pH、溶解氧、饵料生物和人工鱼礁等环境参数以及年份、月份对鲈单位捕捞努力量渔获量(CPUE)和各站位平均体长的影响。结果显示, 春季礁区和非礁区CPUE差异不显著, 秋季礁区CPUE高于非礁区, 是非礁区的3.53倍。礁区和非礁区体长差异不显著。三因素方差分析表明, 鲈CPUE受到年份、月份、人工鱼礁、年份和月份的交互作用影响, 平均体长则主要受到年份的影响。Delta GAM模型表明, 人工鱼礁和水温对CPUE影响显著, 鲈在人工鱼礁区出现的概率大于非礁区, 随着水温的升高, 鲈出现的概率降低; CPUE呈现先升高后降低的趋势, 并在8℃达到最高值; 饵料浮游植物丰度和浮游动物丰度是影响鲈平均体长的关键因子, 当硅藻丰度小于 3×10^5 个/m³时, 鲈平均体长随硅藻丰度上升而下降, 随后趋于稳定; 鲈平均体长随浮游动物丰度增加而呈现降低趋势。研究表明, 鲈主要分布在秋季水温较低时的人工鱼礁区, 体长较大的鲈主要出现在硅藻丰度和浮游动物丰度较低的区域。

关键词: 人工鱼礁; 鲈; 单位捕捞努力量渔获量(CPUE); 平均体长; 环境因子; 莱州湾
中图分类号: S 931 **文献标志码:** A

鲈(*Liza haematocheila*)隶属脊索动物门(Chordata)、辐鳍鱼纲(Actinopterygii)、鲻科(Mugilidae)、鲈属(*Liza*), 是广泛分布于西北太平洋沿岸的经济鱼类^[1]。在20世纪70—80年代, 鲈曾被引入亚速海, 并逐渐扩散到黑海, 由于其旺盛的繁殖能力, 也逐步成为当地经济鱼类之一^[2]。在我国, 鲈自辽东半岛至广东沿岸均有分布^[3], 主要栖息于水深不超过10 m的近岸水域或河口咸淡水交界处, 是一种近海广盐性鱼类^[1, 4]。20世纪80年代以来, 渤海渔业作业方式由拖网转为定置网^[5], 增加了对地方性物种花鲈(*Lateolabrax*

maculatus)、鲈、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)和日本蟳(*Charybdis japonica*)等渔业资源的捕捞压力, 近海的鲈资源由此衰退^[5-7]。2010—2011年, 通过对莱州湾游泳动物底拖网调查发现, 鲈资源有所恢复, 但效果并不显著^[8]。位于莱州湾的芙蓉岛人工鱼礁区建于2013—2014年, 水深为5~10 m。莱州湾沿岸多分布径流, 为鲈产卵、索饵、繁殖提供了良好的环境条件^[9], 使得鲈成为了礁区主要经济鱼类之一。

人工鱼礁区单一鱼种的研究主要有鱼类的

收稿日期: 2019-05-31 修回日期: 2019-07-10

资助项目: 山东省海洋与渔业科技创新项目(2017HYCX007)

通信作者: 唐衍力, E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn

摄食生态和行为特征^[10-12]、鱼类活动区域和近礁距离关系^[13-17]、鱼类栖息地利用模式^[16-17]。Herbig等^[14]研究了北墨西哥湾灰鳞鲈(*Balistes capriscus*)在人工鱼礁附近的活动范围以及昼夜行为特征, Lowry等^[15]对澳洲黑鲷(*Acanthopagrus australis*)在自然岩礁区和人工鱼礁区栖息和运动特征进行了比较研究。目前, 鲈资源的研究主要涉及不同地理群体间的遗传差异及形态差异等方面^[3, 18-19], 在人工鱼礁区的资源分布特征尚未见报道。

本实验以2014—2017年春季和秋季芙蓉岛人工鱼礁区三重刺网调查资料为基础, 运用GAM模型方法, 研究了鲈资源丰度和平均体长对水温、盐度、溶解氧、人工鱼礁、饵料生物丰度等重要环境参数的响应机制, 以期掌握莱州湾人工鱼礁区鲈分布特征, 合理开发利用人

工鱼礁区渔业资源提供参考。

1 材料与方方法

1.1 调查站位与时间

芙蓉岛人工鱼礁区海底平坦、底质以粗砂为主。礁区面积为66.861 0 hm², 2013年开始, 共投放石块礁和混凝土构件礁13.875万空m³。调查站位共设置7个, 其中, 站位1、2、3、4、5位于礁区内, 站位6、7位于礁区外, 根据鱼礁对礁区鱼类影响范围的研究结果^[20-21], 确定站位6、7在礁区外200 m处(图1)。2014—2017年每年春季(5月)和秋季(11月)对礁区渔业资源和海水环境进行调查, 但由于风浪、天气等因素, 调查的日期并不一致。

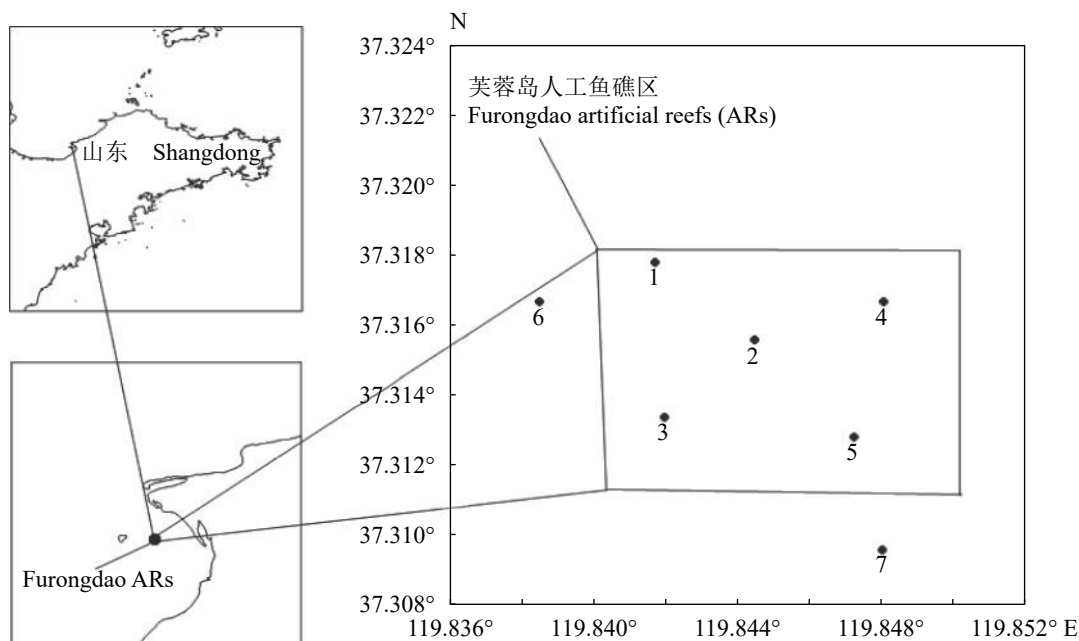


图1 芙蓉岛人工鱼礁区调查站位

Fig. 1 Location of Furongdao artificial reefs and investigation sites

1.2 调查渔具与数据采集

调查渔具为三重刺网, 主尺度为61 m×1.35 m, 其内网目尺寸为7 cm, 外网目尺寸为45 cm。每次调查设置1张三重刺网, 固定在距离海底0.5 m的位置, 放置时间为26 h。鲈单位捕捞努力量渔获量(CPUE)定义为每网每天捕获鲈的重量(g/net×d), 公式为:

$$CPUE = (24 \times c) / (n \times h)$$

式中, c 为每次调查获得鲈的重量(g), n 为每次调

查使用网具的数量, h 为每次调查的时间(d)。

各调查站位的水温、溶解氧、盐度和酸碱度由YSI多参数水质测量仪(Proplus)测得。根据《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)以及《海洋监测规范》(GB 17378-2007), 分别使用浅水III型浮游生物网和浅水I型浮游生物网采集浮游植物和浮游动物。实验室分析依据《中国海洋浮游生物图谱》^[22], 除浮游幼虫, 浮游植物和浮游动物鉴定到种或属。

1.3 数据处理

体长-体质量关系 应用幂函数拟合鲛的体长-体质量关系, 计算礁区鲛的条件因子和生长指数:

$$W = a \times L^b$$

式中, W 为鱼体质量(g), L 为鱼体长(mm), a 为条件因子, b 为生长指数。

环境因子对CPUE和平均体长的影响 鲛成鱼主要摄食浮游植物, 并摄食少量浮游动物^[1,4], 浮游植物主要为硅藻^[23-24]。本实验将浮游植物、浮游动物、水温、盐度、pH、溶解氧等作为可能对鲛分布产生影响的环境参数进行分析。

采用GAM模型分析鲛的CPUE、平均体长与各因子的关系。GAM模型的表达式如下:

$$g(Y) = \alpha \times \sum_{i=1}^n s_i(X_i) + \varepsilon$$

式中, g 为连接函数, Y 为响应变量, α 为截距, X_i 为第 i 个自变量, s_i 为第 i 个自变量的立方样条平滑函数, ε 为残差; 自变量包括底层水温(T, °C)、盐度(S)、溶解氧(DO, mg/L)、pH、硅藻(Bacillariophyta)丰度(个/m³)、浮游植物(Phytoplankton)丰度(个/m³)、浮游动物丰度(Zooplankton)(个/m³)、浮游动物生物量(mg/m³)、人工鱼礁(调查站点位于礁区为1, 位于非礁区则为0)等环境因子和年份、月份。

由于CPUE数据中含有部分0值, 本实验采用Delta方法对CPUE数据进行分析^[25-28], 分别应用二项分布的GAM模型(Binomial GAM)和高斯分布的GAM模型(Gaussian GAM)分析CPUE为非零值的概率和CPUE非0值与各因子之间的关系。Binomial GAM模型中 g 为Logit连接函数, Y 代表CPUE为非零值的概率, 当CPUE为0时, Y 为0, 否则为1。Gaussian GAM模型中, g 为恒等连接函数, Y 为 $\log_{10}(1+CPUE)$ 。

为避免模型的过度拟合, 本实验采用逐步回归的方法筛选对响应变量具有显著影响的自变量, 并通过比较模型的AICc值选择最优模型^[26]。GAM模型均使用R软件“mgcv”、“AICcmodavg”程序包运行。

2 结果

2.1 鲛CPUE、平均体长分析

鲛为芙蓉岛人工鱼礁区主要的生物资源,

2014—2017年共捕获494尾, 占各站位渔获物重量平均比例为31.9%。礁区春季鲛平均CPUE为 287.84 ± 254.95 g/(net×d), 秋季为 $3\ 600.22 \pm 1\ 816.96$ g/(net×d), 非礁区春季平均CPUE为 363.82 ± 630.16 g/(net×d), 秋季为 $1\ 017.43 \pm 1\ 205.38$ g/(net×d)。单因素方差分析表明, 春季礁区和非礁区CPUE差异不显著($F = 0.862$, $P = 0.362$), 秋季礁区CPUE显著高于非礁区($F = 12.660$, $P < 0.001$), 是非礁区的3.53倍(图2)。礁区鲛的体长范围为205~500 mm, 体长优势组为270~275 mm, 体质量范围为110.84~1 755.53 g, 体质量优势组为210.84~260.84 g(图3)。非礁区鲛体长范围为225~465 mm, 体质量范围为148.00~1 455.31 g(图4)。礁区和非礁区体长差异不显著($F = 0.076$, $P = 0.785$), 但体长超过350 mm的鲛主要出现在礁区(图4)。礁区鲛条件因子 $a = 2.450 \times 10^{-5}$, 生长指数 $b = 2.878$ (相关系数 $R^2 = 0.910$), 为异速生长(图5)。

应用三因素方差分析以及Pearson相关性分析初步探索各因子与鲛CPUE、平均体长的关系。三因素方差分析表明, 鲛CPUE主要受到年份、月份、人工鱼礁、年份和月份的交互作用影响($P < 0.01$, 表1), 鲛平均体长则主要受到年份的影响($P < 0.001$, 表1), 人工鱼礁、月份对平均体长的影响并不显著($P > 0.05$, 表1)。Pearson分析表明, CPUE与水温、溶解氧、硅藻丰度、浮游植物丰度、浮游动物生物量显著相关($P < 0.05$, 表2), 平均体长与溶解氧、硅藻丰度、浮游植物丰度显著相关。

2.2 各因子对CPUE的影响

Binomial GAM最优模型结果表明, 鲛出现

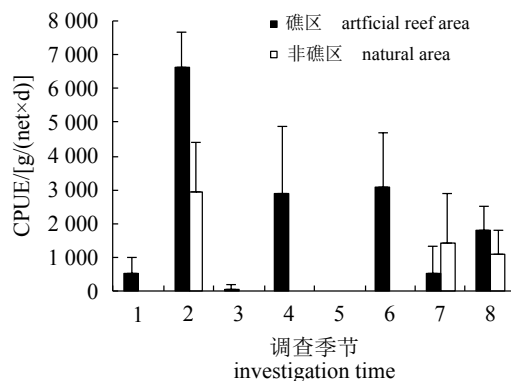


图2 CPUE季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of CPUE

1. spring, 2014; 2. autumn, 2014; 3. spring, 2015; 4. autumn, 2015; 5. spring, 2016; 6. autumn, 2016; 7. spring, 2017; 8. autumn, 2017

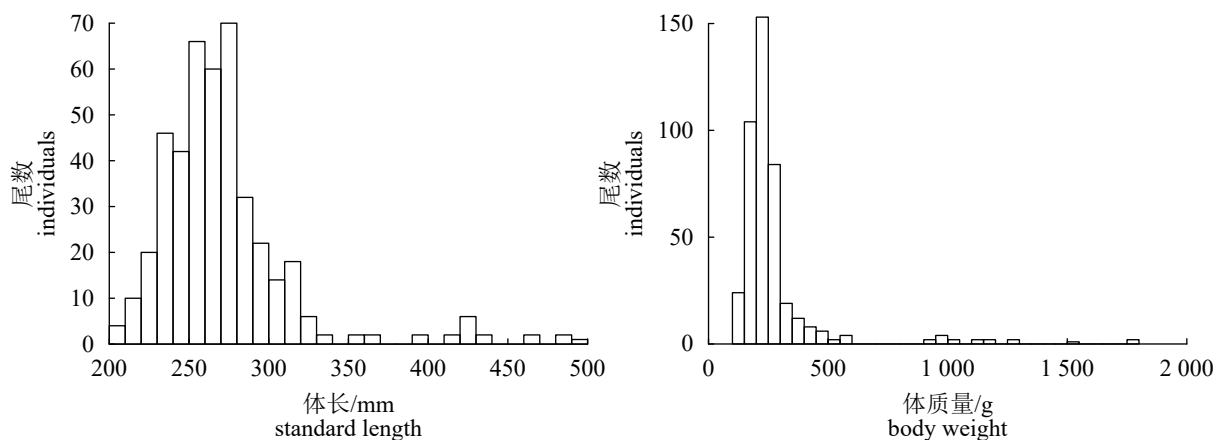


图3 芙蓉岛人工鱼礁区鲈体长、体重频率分布

Fig. 3 Standard length and body weight frequency distribution of *L. haematocheila* in Furongdao artificial reef area

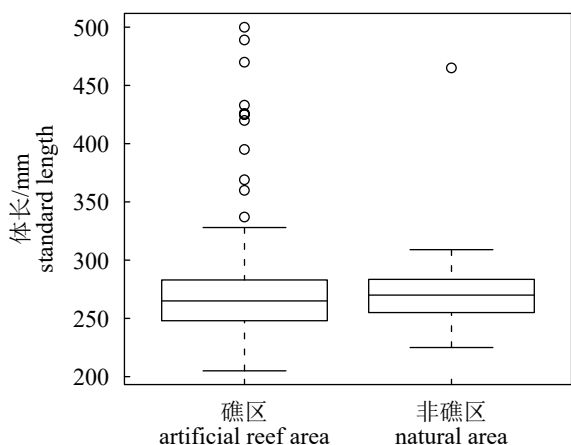


图4 芙蓉岛人工鱼礁区及非礁区体长分布箱线图

Fig. 4 Boxplot of standard length of *L. haematocheila* in Furongdao artificial reef area and the natural area

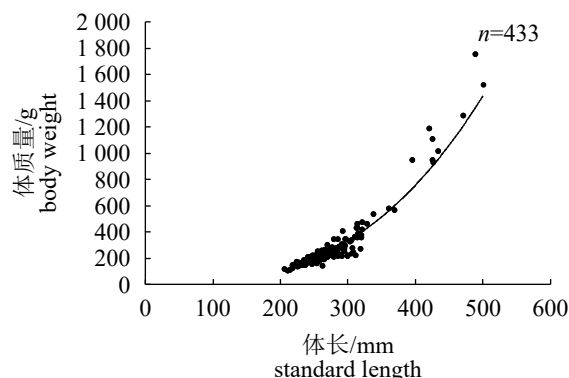


图5 芙蓉岛人工鱼礁区鲈体长-体质量关系曲线

Fig. 5 Relationship between standard length and body weight of *L. haematocheila* in Furongdao artificial reef area

表1 三因素方差分析

Tab. 1 Results of three-way ANOVA

响应变量 response variable	自变量 independent variables	自由度 degree of freedom	均方 mean Sq.	F value	P value
CPUE	年份 year	3	12 289 017	6.819	<0.001***
	月份 month	1	91 230 128	50.622	<0.001***
	人工鱼礁 artificial reefs	1	26 409 143	14.654	<0.001***
	年份×月份 year×month	3	9 768 734	5.420	0.002**
	年份×月份 year×month	3	9 768 734	5.420	0.002**
平均体长 mean standard length	年份 year	3	23 432	14.124	<0.001***
	月份 month	1	5 084	3.064	0.094
	人工鱼礁 artificial reefs	1	1 337	0.806	0.349
	年份×月份 year×month	2	4 877	2.940	0.074

注: ***为 $P < 0.001$, **为 $0.001 < P < 0.01$

Notes: *** represents $P < 0.001$; ** represents $0.001 < P < 0.01$.

的概率主要受水温与人工鱼礁的影响(表3, 图6), 鲈出现的概率随水温升高而下降, 且在礁区出现

的概率高于非礁区(图5)。

Gaussian GAM 模型的自变量为水温和盐度

表 2 Pearson相关性分析

Tab. 2 Results of Pearson correlation test

响应变量 response variable	环境因子 environmental factors							
	水温 temperature	盐度 Salinity	溶解氧 DO	pH	硅藻丰度 Bacillariophyta	浮游植物丰度 Phytoplankton	浮游动物丰度 Zooplankton	浮游动物生物量 Zooplankton
CPUE	-0.552***	0.029	0.313*	-0.116	0.670***	0.669***	-0.249	0.519***
平均体长 mean standard length	0.211	0.210	-0.401*	-0.001	-0.452*	-0.454*	-0.124	-0.197

注: 数值代表Pearson相关系数; *为 $0.01 < P < 0.05$, ***为 $P < 0.001$

Notes: Figures represent Pearson correlation coefficients. * represents $0.01 < P < 0.05$; *** represents $P < 0.001$

表 3 CPUE的Delta GAM最优模型

Tab. 3 Optimal Delta GAM for CPUE

	样本量 number of samples	残差解释量/% deviance explained	校正决定系数 R-sq. (adjusted)	AICc	驱动因子 driving factors	P value
Binomial GAM	56	58.50	0.621	43.235	水温 s(temperature)	0.017*
					人工鱼礁 artificial reef	0.008**
					截距项 intercept	0.263
Gaussian GAM	29	63.90	0.550	519.707	水温 s(temperature)	<0.001***
					截距项 intercept	<0.001***

注: s为立方样条平滑函数, *为 $0.01 < P < 0.05$, **为 $0.001 < P < 0.01$, ***为 $P < 0.001$ 。

Notes: s represents cubic regression spline, * represents $0.01 < P < 0.05$; ** represents $0.001 < P < 0.01$; *** represents $P < 0.001$.

时, AICc值最低, 但校正决定系数为0.419, 残差解释量为51.0%, 低于自变量仅包含水温的模型(表3), 因此选择自变量仅包含水温的模型作为Gaussian GAM最优模型。Gaussian GAM最优模型表明, CPUE受水温影响显著($P < 0.01$, 表3), 当水温低于 8°C 时, CPUE随水温的升高而增加, 当水温大于 8°C 时, CPUE随水温的升高而降低(图6)。

应用正态Q-Q图和Shapiro-Wilk检验验证模型残差的正态性, 诊断GAM模型。正态Q-Q图表明Binomial GAM模型和Gaussian GAM模型残差基本符合正态分布(图7, 图8)。Shapiro-Wilk检验表明, 模型残差符合正态分布(Binomial GAM, $w = 0.970$, $P = 0.177 > 0.05$; Gaussian GAM, $w = 0.982$, $P = 0.901 > 0.05$)。

2.3 各因子对鲛平均体长的影响

应用Gaussian GAM模型分析平均体长与各因子的响应关系, 最优模型结果显示鲛平均体长受到硅藻丰度和浮游动物丰度的影响(表4, 图9)。当硅藻丰度小于 3×10^5 个/ m^3 时, 鲛平均体长随硅藻丰度上升而下降, 随后趋于稳定; 鲛平均体长随浮游动物丰度增加而呈现降低趋势(图9), 这与鲛的摄食强度以及食性偏好有关。Q-Q图表明

模型残差基本符合正态分布(图10), Shapiro-Wilk检验表明残差符合正态分布($w = 0.963$, $P = 0.552$)。

3 讨论

水温是影响鱼类分布的重要环境要素, 刘长东等^[29]应用GAM模型分析海州湾小黄鱼分布特征发现, 月份、位置、水温对小黄鱼CPUE影响显著。邢磊等^[30]应用GAM模型分析海州湾大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)的分布特征, 证明月份、水温和位置是影响其分布的主要环境因子, 盐度并非是对其产生影响的关键因子。人工鱼礁区渔业资源研究表明, 礁区的渔获物组成结构受到水温、盐度、pH、DO的影响^[31-33]。鲛属于近海广盐性鱼类^[1, 4], 栖息于近岸水域或河口咸淡水交界处, 对盐度适应范围广, 因此, 盐度变化对鲛丰度影响并不显著。

李凡等^[34]于2010—2011年对莱州湾游泳动物群落的季节调查发现, 鲛仅为2010年冬季拖网渔获物的优势种, 在春季和秋季的调查中并非优势种。王娇等^[35]对黄河口及临近水域渔业资源调查表明, 鲛冬季丰度最高, 春季最低。芙蓉岛人工鱼礁区鲛CPUE表现出秋季高于春季的特征, 且GAM模型结果表明随着水温的升高, 鲛

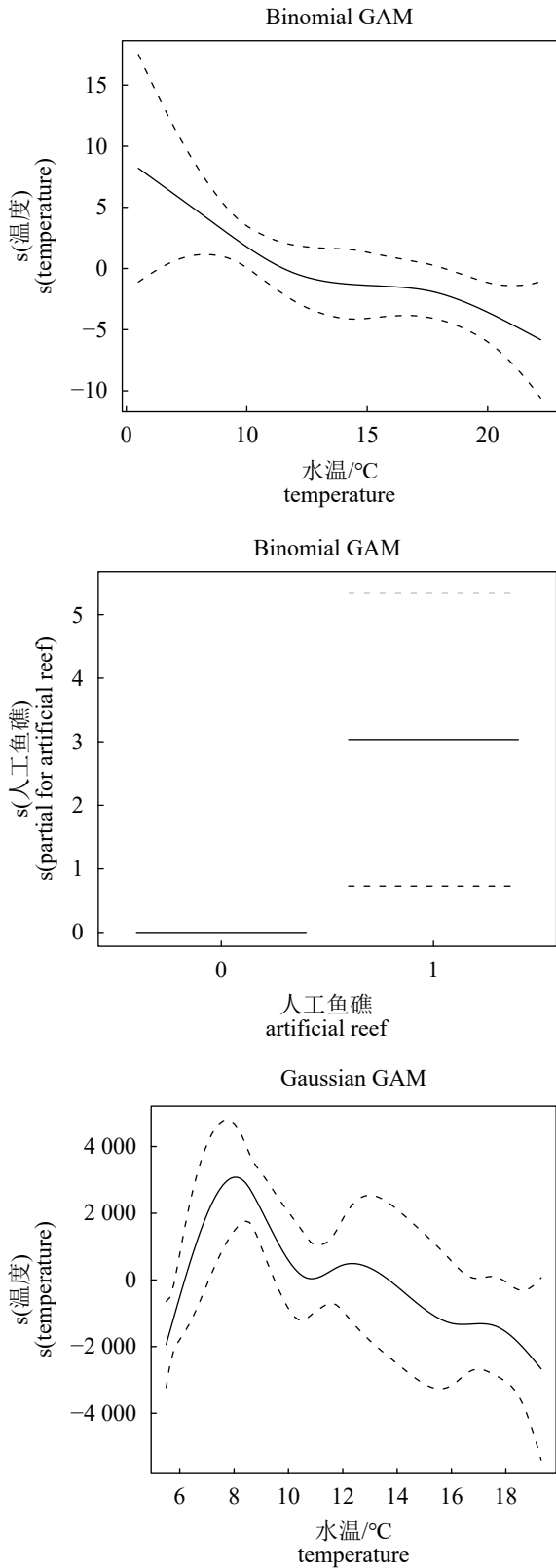


图6 各因子对鲈CPUE的影响

Fig. 6 Influence of predictor factors on CPUE

出现的概率降低, CPUE呈现先升高后降低的趋势, 这可能与鲈的生活习性相关。

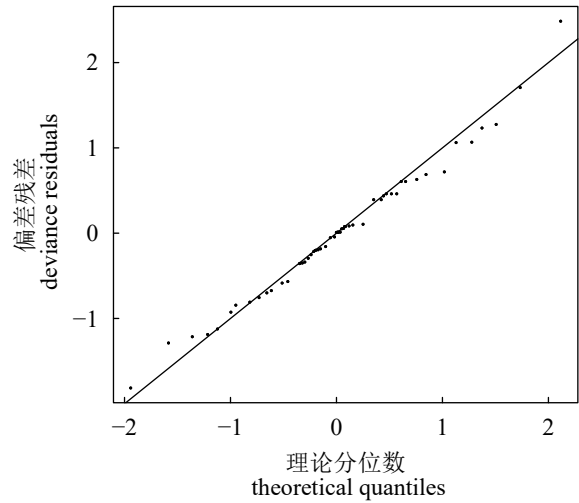


图7 鲈CPUE的Binomial GAM模型Q-Q图

Fig. 7 Normal Q-Q plot of Binomial GAM for CPUE

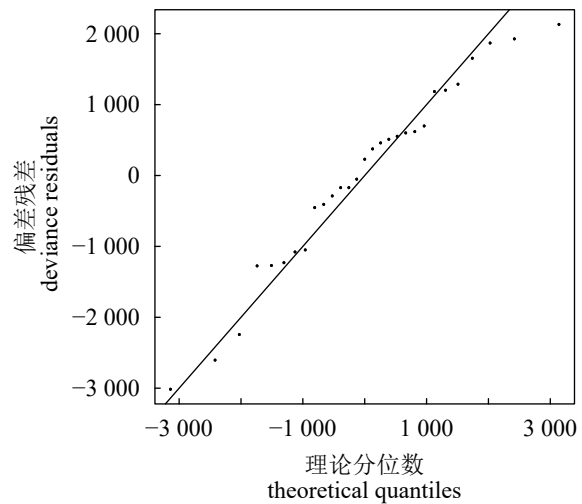


图8 鲈CPUE的Gaussian GAM模型Q-Q图

Fig. 8 Normal Q-Q plot of Gaussian GAM for CPUE

鲈达到成熟年龄后一年一次产卵, 渤海区鲈繁殖期通常为4月底至6月下旬, 产卵盛期为5月初至5月中旬, 不同年份存在变动^[36-37]。王爱勇^[38]于2008年5月和6月采用大型浮游生物拖网对莱州湾春季鱼卵、仔稚鱼进行调查, 发现鲈鱼卵主要出现在5月份, 密集分布在小清河口附近和莱州湾东北部长岛附近海域, 6月没有鱼卵出现; 仔稚鱼主要出现在5月, 6月数量较少, 分布在内湾河口区域。芙蓉岛人工鱼礁区离鲈产卵区域较远, 因此春季水温较高时鲈出现概率较小, 且CPUE较低。李明德等^[39]发现鲈产卵后分散在沿岸及海湾索饵, 于10月至翌年3月游向渤海较深海区12~16 m水深处越冬。

表 4 平均体长的GAM最优模型

Tab. 4 Optimal GAM for mean standard length

样本量 number of samples	残差解释量/% deviance explained	校正决定系数 R-sq. (adjusted)	AICc	驱动因子 driving factors	P value
29	86.20	0.793	306.088	硅藻丰度 s(Bacillariophyta)	<0.001***
				浮游动物丰度 s(Zooplankton)	<0.001***
				截距项 intercept	<0.001***

注: s为立方样条平滑函数, ***为P<0.001。

Note: s represents cubic regression spline; *** represents P<0.001.

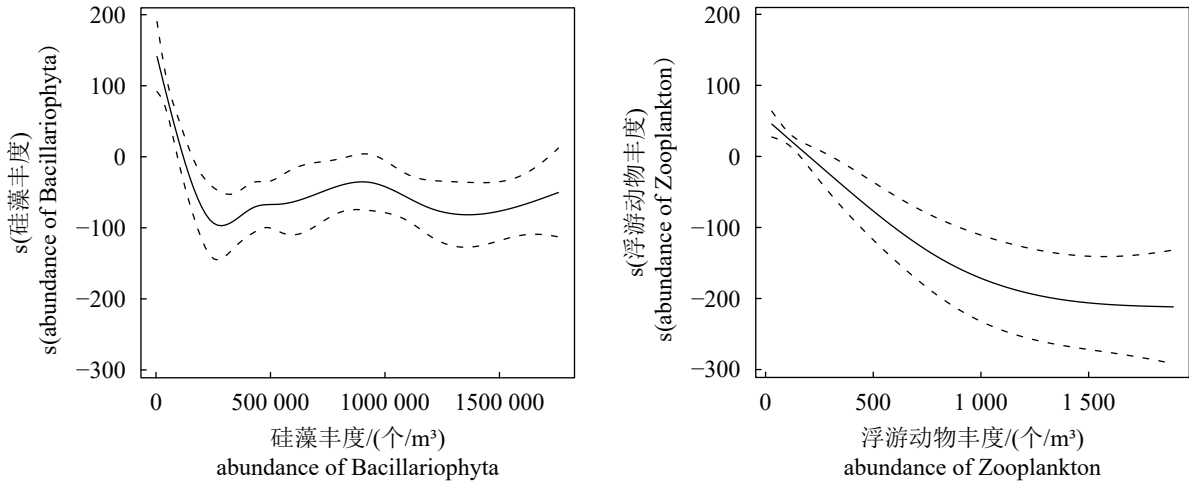


图 9 各因子对鲷平均体长的影响

Fig. 9 Influence of predictor factors on mean standard length

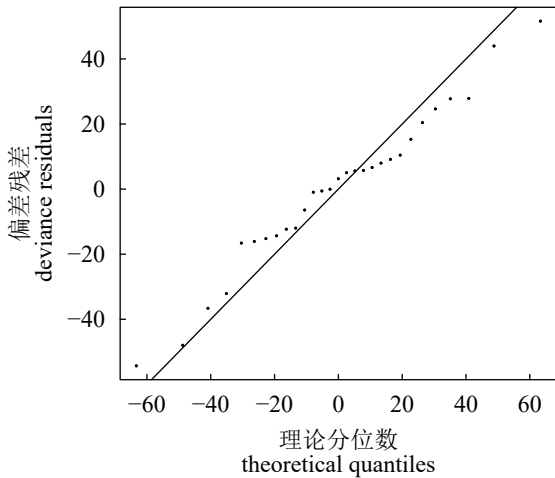


图 10 平均体长的GAM模型Q-Q图

Fig. 10 Normal Q-Q plot of GAM for mean standard length

人工鱼礁对鲷出现的概率影响显著。人工鱼礁投放后会对渔获物群落结构和主要鱼类的分布产生影响^[13, 31-33]。唐衍力等^[13]研究发现近礁距离对人工鱼礁区许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)的

丰度、体长影响显著, 许氏平鲷CPUE与近礁距离呈负相关, 全长与近礁距离呈负相关。Dos Santos等^[17]对巴西东南海岸人工鱼礁区鱼类与近礁距离关系研究证明, 鱼类在礁区数量远高于距离礁区50 m处。Topping等^[20]对红笛鲷(*Lutjanus campechanus*)在人工鱼礁区活动范围和运动特征研究表明, 30%的鱼类主要分布在距离礁区30 m范围内, 并且全长与近礁距离呈正相关。鲷集中分布在礁区范围内, 礁区的CPUE远高于非礁区, 且2015年秋季、2016年秋季非礁区均未捕获到鲷。虽然礁区与非礁区平均体长差异不显著, 但体长超过350 mm的鲷主要出现在礁区。

硅藻丰度是影响鲷平均体长的关键因子, 这可能是由鲷的摄食强度和食性引起的^[4, 37, 39-40]。张立言等^[23]、李明德等^[24]对鲷食性研究发现, 鲷成鱼主要摄食硅藻, 对硅藻无摄食选择性。芙蓉岛人工鱼礁区和非礁区调查共发现浮游植物72种, 其中硅藻门63种, 因此本实验将硅藻作为鲷的主要饵料进行分析。李明德等^[24]对不同体长组鲷的食物数量和胃盲囊饱满度研究发现, 同一

时期同一地点的鲈,不同体长组间食性差异虽小,但摄食强度存在差异,体长为200~249 mm的鲈摄食强度最大,体长250~399 mm的鲈摄食强度较200~249 mm略低,体长大于400 mm的鲈摄食强度明显降低,与鲈生长速度相对应。鲈丰满度和附脂系数在II龄达到最高值,此后随年龄增长而降低^[24]。II龄鲈平均体长为210 mm,摄食强度最旺盛,胃盲囊饱满度最高,脂肪累积较多,丰满度最高^[24]。礁区和非礁区捕获的鲈体长变化范围为205~500 mm,这可能是造成鲈平均体长随硅藻丰度升高而降低的原因。

鲈体长的GAM模型结果表明,浮游动物丰度是影响体长的关键因子,浮游动物生物量虽然与CPUE具有一定相关性,但并非影响体长的关键因子。随着体长的增加,鲈的主要饵料生物由浮游动物转变为浮游植物,体长低于15 mm的鲈饵料生物以浮游动物为主,体长15~45 mm的鲈则以浮游动物和浮游植物为主,体长大于200 mm的鲈饵料生物主要以浮游植物为主,浮游动物出现的频率和数量均低于幼鱼^[4,40]。鲈生长过程中食性的转变可能导致体长较大的成鱼倾向分布于浮游动物丰度较低的水域中。本研究发现,平均体长大于400 mm的站位,浮游动物丰度均小于260个/m³,而浮游动物丰度高于800个/m³的站位,鲈平均体长均低于270 mm。

4 结语

本研究分析了莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区鲈CPUE及平均体长随环境要素的变化,人工鱼礁的建设对鲈资源具有一定影响。2014—2017年春季和秋季,鲈在礁区的分布主要受到人工鱼礁、水温、浮游动物、浮游植物的影响,盐度、溶解氧、pH并非影响鲈分布的关键因素。鲈在人工鱼礁区出现的概率大于非礁区,随着水温的升高,鲈出现的概率降低;CPUE随水温的升高呈现先升高后降低的趋势,并在8℃达到最高值;硅藻丰度小于3×10⁵个/m³时,鲈平均体长随硅藻丰度上升而下降,随后趋于稳定;鲈平均体长随浮游动物丰度增加而呈现降低趋势。

参考文献:

- [1] 陈大刚,张美昭.中国海洋鱼类[M].青岛:中国海洋大学出版社,2015.
Chen D G, Zhang M Z. Marine Fishes of China[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2015 (in Chinese).
- [2] Luzhnyak V A. New data on specific features of the ecology of reproduction of haarder *Liza haematocheilus* (Mugilidae) in the Azov-Black Sea basin[J]. *Journal of Ichthyology*, 2007, 47(8): 676-679.
- [3] 陈澄璟,阎斌伦,高天翔.中国沿海梭鱼群体的形态学比较研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(7-8): 90-97.
Chen C J, Yan B L, Gao T X. Morphological variation of redlip mullet (*Liza haematocheilus*) in different geographical populations along China coast[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(7-8): 90-97(in Chinese).
- [4] 李明德,王秀玲,吕宪禹,等.梭鱼[M].北京:海洋出版社,1997.
Li M D, Wang X L, Lv X Y, et al. Mullet[M]. Beijing: Ocean Press, 1997 (in Chinese).
- [5] 邓景耀,金显仕.渤海越冬场渔业生物资源量和群落结构的动态特征[J].*自然资源学报*,2001,16(1): 42-46.
Deng J Y, Jin X S. Dynamic characteristics of abundance and community structure of fishery species in the overwintering ground of the Bohai Sea[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 42-46(in Chinese).
- [6] 金显仕.渤海主要渔业生物资源变动的研究[J].*中国水产科学*,2000,7(4): 22-26.
Jin X S. The dynamics of major fishery resources in the Bohai Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2000, 7(4): 22-26(in Chinese).
- [7] 李忠义,吴强,单秀娟,等.渤海鱼类群落结构的年际变化[J].*中国水产科学*,2017,24(2): 403-413.
Li Z Y, Wu Q, Shan X J, et al. Interannual variations in fish community structure in the Bohai Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(2): 403-413(in Chinese).
- [8] 李凡,吕振波,魏振华,等.2010年莱州湾底层渔业生物群落结构及季节变化[J].*中国水产科学*,2013,20(1): 137-147.
Li F, Lv Z B, Wei Z H, et al. Seasonal changes in the community structure of the demersal fishery in Laizhou Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1): 137-147(in Chinese).
- [9] 杨艳艳,高彦洁,汪健平,等.莱州湾春、夏季鱼卵、仔稚鱼群落结构及环境因子相关性[J].*生态学杂志*,

- 2018, 37(10): 2976-2984.
- Yang Y Y, Gao Y J, Wang J P, *et al.* Community structure of ichthyoplankton and its relationship with environmental factors in Laizhou Bay[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(10): 2976-2984(in Chinese).
- [10] 王佳琦, 刘淑德, 唐衍力, 等. 山东俚岛人工鱼礁区大泷六线鱼生长、死亡及资源评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(11): 51-59.
- Wang J Q, Liu S D, Tang Y L, *et al.* Growth, mortality and resource evaluation of *Hexagrammos otakii* inhabiting the artificial reef area of Lidao, Shandong Province[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(11): 51-59(in Chinese).
- [11] 张迎秋. 前三岛海域底层鱼类群落结构、摄食生态和运动行为特征[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
- Zhang Y Q. Community structure, feeding ecology and movement behaviors of demersal fish around Qiansan Islets[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences, 2015 (in Chinese).
- [12] 纪东平, 卞晓东, 宋娜, 等. 荣成俚岛斑头鱼摄食生态研究[J]. 中国水产科学, 2015, 22(1): 88-98.
- Ji D P, Bian X D, Song N, *et al.* Feeding ecology of *Hexagrammos agrammus* in Lidao Rongcheng, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(1): 88-98(in Chinese).
- [13] 唐衍力, 白怀宇, 盛化香, 等. 海州湾前三岛鱼礁区许氏平鲉的分布及YPUE与近礁距离的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(11): 151-157.
- Tang Y L, Bai H Y, Sheng H X, *et al.* Relationships between distribution of *Sebastes schlegeli*, its YPUE and distance off artificial reef around Qiansan Island of Haizhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(11): 151-157(in Chinese).
- [14] Herbig J L, Szedlmayer S T. Movement patterns of gray triggerfish, *Balistes capriscus*, around artificial reefs in the northern Gulf of Mexico[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2016, 23(5): 418-427.
- [15] Lowry M, Becker A, Folpp H, *et al.* Residency and movement patterns of yellowfin bream (*Acanthopagrus australis*) released at natural and artificial reef sites[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2017, 68(8): 1479-1488.
- [16] Froehlich C Y M, Garcia A, Kline R J. Daily movement patterns of red snapper (*Lutjanus campechanus*) on a large artificial reef[J]. *Fisheries Research*, 2019, 209: 49-57.
- [17] Dos Santos L N, Brotto D S, Zalmon I R. Fish responses to increasing distance from artificial reefs on the Southeastern Brazilian Coast[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, 386(1-2): 54-60.
- [18] 刘进贤, 高天翔, 吴世芳, 等. 梭鱼的分子系统地理学研究——晚更新世西北太平洋边缘海隔离分化及其有限的扩散能力[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(6): 931-938.
- Liu J X, Gao T X, Wu S F, *et al.* Pleistocene isolation in the Northwestern Pacific marginal seas and limited dispersal in a marine fish, *Chelon haematocheilus* (Temminck & Schlegel, 1845)[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(6): 931-938(in Chinese).
- [19] 权洁霞, 戴继勋, 沈颂东, 等. 梭鱼人工养殖群体与自然群体的随机扩增多态DNA(RAPD)分析[J]. *海洋学报*, 2000, 22(5): 82-87.
- Quan J X, Dai J X, Shen S D, *et al.* Genetic variation analysis of two mullet populations through randomly amplified polymorphic DNA(RAPD) method[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(5): 82-87(in Chinese).
- [20] Topping D T, Szedlmayer S T. Home range and movement patterns of red snapper (*Lutjanus campechanus*) on artificial reefs[J]. *Fisheries Research*, 2011, 112(1-2): 77-84.
- [21] D'Anna G, Giacalone V M, Pipitone C, *et al.* Movement pattern of white seabream, *Diplodus sargus* (L., 1758) (Osteichthyes, Sparidae) acoustically tracked in an artificial reef area[J]. *Italian Journal of Zoology*, 2011, 78(2): 255-263.
- [22] 束蕴芳, 韩茂森. 中国海洋浮游生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- Shu Y F, Han M S. Atlas of Marine Plankton in China[M]. Beijing: Ocean Press, 1993 (in Chinese).
- [23] 张立言, 樊宁臣, 黄鸣夏. 梭鱼摄食习性的探讨[C]//梭鱼研究文集. 北京: 农业出版社, 1982: 31-53.
- Zhang L Y, Fan N C, Huang M X. Feeding habits of mullet[C]//Proceedings of Mullet. Beijing: Agricultural Press, 1982: 31-53 (in Chinese).
- [24] 李明德, 戴展志, 陈云英, 等. 梭鱼的食性与生长[C]//梭鱼研究文集. 北京: 中国农业出版社, 1982: 54-70.

- Li M D, Dai Z Z, Chen Y Y, *et al.* Food composition and growth of mullet[C]//Proceedings of Mullet. Beijing: China Agriculture Press, 1982: 54-70 (in Chinese).
- [25] Rubec P J, Kiltie R, Leone E, *et al.* Using delta-generalized additive models to predict spatial distributions and population abundance of juvenile pink shrimp in Tampa Bay, Florida[J]. *Marine and Coastal Fisheries*, 2016, 8(1): 232-243.
- [26] Burnham K P, Anderson D R. Model Selection and Multimodel Inference: a practical information-theoretic approach[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [27] Li Z G, Ye Z J, Wan R, *et al.* Model selection between traditional and popular methods for standardizing catch rates of target species: a case study of Japanese Spanish mackerel in the gillnet fishery[J]. *Fisheries Research*, 2015, 161: 312-319.
- [28] 李增光, 叶振江, 张弛, 等. 环境因子对黄海南部春季帆张网小黄鱼和黄鲈渔获分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2887-2892.
- Li Z G, Ye Z J, Zhang C, *et al.* Effects of environmental factors on catch distribution of stow net *Pseudosciaena polyactis* and *Lophius litulon* in southern Yellow Sea in spring[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2887-2892(in Chinese).
- [29] 刘长东, 易坚, 唐衍力, 等. 海州湾中时空和环境因子对桩张网捕捞小黄鱼的影响[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(9): 36-41.
- Liu C D, Yi J, Tang Y L, *et al.* Effects of stow net to the catch rates *Pseudosciaena polyactis* between temporal-spatial and environmental factors in the Haizhou Bay[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(9): 36-41(in Chinese).
- [30] 邢磊, 徐宾铎, 张崇良, 等. 环境因子对海州湾及邻近海域大泷六线鱼分布影响的分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(6): 45-50.
- Xing L, Xu B D, Zhang C L, *et al.* Environmental influence on the distribution of *Hexagrammos otakii* inhabiting Haizhou Bay and its adjacent waters[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(6): 45-50(in Chinese).
- [31] 董天威, 黄六一, 唐衍力, 等. 日照前三岛人工鱼礁对渔业资源影响的初步评价[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(8): 38-45.
- Dong T W, Huang L Y, Tang Y L, *et al.* Preliminary evaluation of artificial reef around Rizhao Qiansan Island on the enhancement of fishery resources[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(8): 38-45(in Chinese).
- [32] 唐衍力, 程文志, 孙鹏, 等. 山东近岸3处人工鱼礁区VPUE的分析研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(3): 43-50.
- Tang Y L, Cheng W Z, Sun P, *et al.* Analysis of value per unit effort of three artificial reefs of Shandong Coast[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(3): 43-50(in Chinese).
- [33] 唐衍力, 孙晓梅, 盛化香, 等. 威海小石岛人工鱼礁区渔获物组成特征及与环境因子的关系[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(5): 22-31.
- Tang Y L, Sun X M, Sheng H X, *et al.* Community structure of catch and its relationship with environmental factors in Xiaoshidao artificial reef zones of Weihai City[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(5): 22-31(in Chinese).
- [34] 李凡, 张焕君, 吕振波, 等. 莱州湾游泳动物群落种类组成及多样性[J]. *生物多样性*, 2013, 21(5): 537-546.
- Li F, Zhang H J, Lv Z B, *et al.* Species composition and community diversity of nekton in Laizhou Bay, China[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(5): 537-546(in Chinese).
- [35] 王娇, 张崇良, 薛莹, 等. 黄河口及其邻近水域鱼类生态类群组成及其季节变化[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 41-51.
- Wang J, Zhang C L, Xue Y, *et al.* Composition of ecological groups and their seasonal changes of fish in Yellow River Estuary and its adjacent waters[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(4): 41-51(in Chinese).
- [36] 李明德, 周爱莲, 潘永浩. 梭鱼性腺发育的组织学特征及其分期[J]. *海洋学报*, 1982, 4(5): 627-631.
- Li M D, Zhou A L, Pan Y H. Histological characteristics and staging of gonad development in mullet[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1982, 4(5): 627-631(in Chinese).
- [37] 李明德, 张洪杰. 渤海鱼类生物学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991.
- Li M D, Zhang H J. Fish Biology in Bohai[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991 (in Chinese).
- [38] 王爱勇. 渤海莱州湾春季鱼卵、仔稚鱼群落结构及环境因子相关性的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.

- Wang A Y. Preliminary study of the ichthyoplankton assemblage structure in Laizhou Bay in Spring and it's correlation with environmental factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009 (in Chinese).
- [39] 李明德, 王祖望. 渤海梭鱼的年龄与生长[J]. 海洋学报, 1982, 4(4): 508-515.
- Li M D, Wang Z W. The age and growth of mullet in Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4(4): 508-515(in Chinese).
- [40] 李明德. 中国梭鱼42年来的研究概况[J]. 海洋通报, 1993, 12(6): 81-86.
- Li M D. Researches on Chinese mullet *Liza haematocheila* during past forty-two years[J]. Marine Science Bulletin, 1993, 12(6): 81-86(in Chinese).

Distribution characteristics of *Liza haematocheila* and its relationship with environmental factors in Furongdao artificial reef zones, Laizhou Bay, China

WANG Xinmeng¹, SHENG Huaxiang¹, LIU Shude², FANG Guangjie¹,
YU Haolin¹, TANG Yanli^{1*}, LIANG Zhenlin³

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

2. Shandong Hydrobios Resources Conservation and Management Center, Yantai 264003, China;

3. Marine College, Shandong University, Weihai 264209, China)

Abstract: Abundance of *Liza haematocheila* has declined rapidly since the 1980 s in Bohai Sea, due to the increasing fishing pressure caused by the change of fishery methods. Furongdao artificial reefs (ARs), located in Laizhou Bay, has provided a good habitat for *L. haematocheila*, making it one of the major fish resources in the AR area. In order to explore the response of *L. haematocheila* to environmental factors, the effect of environmental factors, artificial reefs, food abundance on CPUE and mean standard length of *L. haematocheila* were analyzed using GAM model. *L. haematocheila* were collected by trammels survey of Furongdao ARs during 2014-2017. The results showed that there was no significant difference between average CPUE values of artificial reef area and natural area in spring ($P = 0.362$), however, the CPUE in AR area is 3.53 times CPUE in the control area in the autumn. Three-way ANOVA showed that CPUE is significantly affected by year, month, artificial reefs and interaction effect of year and month ($P < 0.01$). Average length was affected by year ($P < 0.01$). Results of Delta GAM showed that the probability that *L. haematocheila* occurs was significantly influenced by temperature and whether the site is in the AR area. The probability of presence is higher in AR area than in the natural area. As temperature increases, probability of presence decreases. CPUE increases when temperature is below 8 °C and then decreases. Mean standard length of *L. haematocheila* is influenced by abundance of Bacillariophyta and zooplankton. When abundance of Bacillariophyta is smaller than 3×10^5 cells/m³, mean standard length decreases with the increase of the abundance of Bacillariophyta, and then tends to stabilize change. Mean standard length decreases with abundance of zooplankton rises. In conclusion, *L. haematocheila* is mainly distributed in the AR area at low temperature, and large fish is mainly distributed in the area with low abundance of Bacillariophyta and zooplankton.

Key words: artificial reefs; *Liza haematocheila*; CPUE; mean standard length; environmental factors; Laizhou Bay

Corresponding author: TANG Yanli. E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn

Funding projects: Project of Scientific and Technological Innovation of Marine and Fisheries in Shandong (2017HYCX007)