

DOI: 10.12264/JFSC2022-0239

山东近岸 3 处人工鱼礁区许氏平鲈生长异质性及资源评价

陈淑悦¹, 董秀强², 于梦杰¹, 刘淑德², 赵伟¹, 盛化香¹, 唐衍力¹

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 山东省渔业发展与资源养护总站, 山东 烟台 264003

摘要: 为探究人工鱼礁区许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)生长异质性及资源开发状况, 本研究基于 2017–2021 年山东近海 3 处典型鱼礁区(长岛鱼礁区、西霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区)的海洋环境和许氏平鲈资源调查数据, 利用 Bootstrap 的 ELEFAN 方法探究了许氏平鲈的生长特征、基于变换体长渔获曲线法探究了许氏平鲈死亡特性, 运用线性混合效应模型研究了许氏平鲈体长–体重关系时空异质性, 基于 Beverton-Holt 模型和开发率探究了许氏平鲈资源利用状况。结果显示, 前三岛鱼礁区许氏平鲈条件因子(a)明显高于西霞口鱼礁区和长岛鱼礁区; 前三岛鱼礁区许氏平鲈渐进体长和渐进体重最大, 西霞口鱼礁区次之, 长岛鱼礁区最小; 长岛鱼礁区总死亡系数和自然死亡系数分别为 0.87 和 0.44, 均高于西霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区; 线性混合效应模型得到参数 a 、 b 范围分别是 $1.48 \times 10^{-5} \sim 5.92 \times 10^{-5}$ 、 $2.85 \sim 3.13$, 相同体长条件下, 2020 年春秋两季前三岛鱼礁区许氏平鲈个体重最高, 2021 年、2018 年和 2017 年冬季西霞口鱼礁区个体重次之, 2019 年夏季长岛鱼礁区个体重最小; 3 处鱼礁区开发率均符合 Gulland 理论轻度开发指标且 Beverton-Holt 模型显示 3 处鱼礁区的渔业现行点 P 均位于最适产量区内, 但邻近最适产量区边缘, 应控制捕捞强度。

关键词: 人工鱼礁区; 许氏平鲈; 资源评价; 生长异质性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2023)01–0115–12

近年来, 海洋环境污染、过度捕捞和生态系统失衡等严重影响了我国海洋生物资源的有效利用和可持续发展^[1]。为保护近海渔业资源和修复生态环境, 人工鱼礁与海洋牧场建设在全国沿海各地区迅速发展^[2]。截至 2021 年底, 山东省共获批国家级海洋牧场示范区 59 个, 占全国 38.6%。全省已累计投放大约 1800 万空方人工鱼礁^[2], 渔业资源量和生物量明显增加。

许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)隶属于鲈形目(Scorpaeniformes), 鲈科(Scorpaenidae), 平鲈属, 俗称黑鲷, 属冷温性近海底层鱼类, 广泛分布于黄渤海和东海海域, 是我国北方人工鱼礁区主要经济鱼类^[3–4]。目前国内学者对其研究集中于生物学特征方面, 包括许氏平鲈生长特性^[5–6]、年龄特

征^[7]、种群结构特征^[8–9]、摄食^[10–11]和性腺发育^[12]等, 而关于鱼礁区许氏平鲈的资源状况报道较少。张萌萌等^[13]利用 Beverton-Holt 模型和生物学参考点等方法, 表明西霞口礁区许氏平鲈资源处于轻度开发状态; 薛进国等^[14]采用基于体长的贝叶斯评估方法对大长山鱼礁区许氏平鲈资源进行评价, 多指标结果均显示大长山鱼礁区许氏平鲈资源处于过度捕捞状态, 而关于山东近海鱼礁区许氏平鲈渔业资源的系统评价未见报道。

鱼类体长–体重关系是鱼类资源评价的基础内容, 受到地理位置、季节和年份等因素的影响, 使体长–体重关系式中的参数值存在异质性^[15]。线性混合效应模型在鱼类体长–体重关系异质性研究方面较为成熟^[16], 已应用于小黄鱼(*Larimi-*

收稿日期: 2022-06-29; 修订日期: 2022-08-16.

基金项目: 山东近海渔业资源调查与监测专项(37000022P11000111802T).

作者简介: 陈淑悦(1996–), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋牧场. E-mail: 1095846969@qq.com

通信作者: 唐衍力, 教授, 主要从事人工鱼礁与海洋牧场方面研究. E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn

chthys polyactis)^[17]、蓝圆鲂(*Decapterus maruadsi*)^[18]、印度洋大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)^[19]、黄鲛鲷(*Lophius litulon*)^[15]等多种经济鱼类的生长特性异质性研究。本研究利用线性混合效应模型研究山东近海 3 处典型鱼礁区许氏平鲈的体长-体重关系时空异质性,探究其生长特征在不同年份、季度和海域之间的差异,并基于开发率和 Beverton-Holt 模型研究资源利用状况,以期为鱼礁区渔业资源的合理开发利用提供指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究以长岛鱼礁区、西霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区为研究海域(图 1),于 2017—2021 年进行了季度调查。样品采集与分析按照《海洋调查规范(GB12763-2007)》进行^[20]。用 YSI 测定水质参

数,采集的水样带回实验室测定营养盐、叶绿素和 COD 等。使用地笼网进行渔业资源调查,地笼网网目大小为 2 cm,矩形尺寸为 37 cm×22 cm,每只地笼网包含 25 节,1 组由 3 只构成,地笼网每次放置时间为 48 h。将捕获的许氏平鲈带回实验室测定其生物学参数。

1.2 数据分析

1.2.1 体长-体重关系 许氏平鲈体长-体重关系一般用幂指数函数^[21]描述:

$$W = aL^b \quad (1)$$

对数化后为:

$$\lg W = \lg a + b \lg L \quad (2)$$

式中, W 为体重(g); L 为体长(mm); a 为条件因子,与饵料基础、栖息水文环境等因素呈正相关^[22]; b 为异速生长因子,用来判断鱼类是否等速生长。

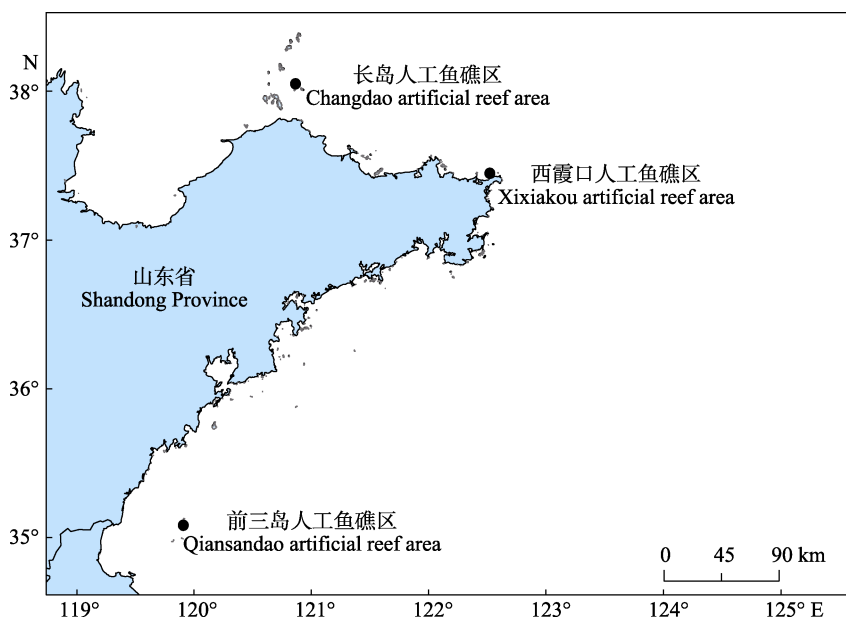


图 1 3 处人工鱼礁区位置示意图
Fig. 1 Map of three artificial reef areas

为探究体长-体重关系在不同年份、季节和海域的差异,本研究使用线性混合效应模型探究许氏平鲈体长-体重关系异质性。线性混合效应模型不仅包括简单线性模型的固定效应,还考虑由不确定因素引起的随机效应^[23],其表达式为:

$$Y = \beta X + Z\delta + \epsilon \quad (3)$$

式中, Y 是响应向量, β 为固定效应, X 是已知的协

变量矩阵, Z 是随机效应的设计矩阵, ϵ 为误差向量^[24],该模型涵盖了季节、年份和海域的不同组合对截距 $\lg a$ 、斜率 b 的随机效应。通过计算赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)值和均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)值比较不同模型拟合效果,两者值越小,则表明模型的拟合效果越好^[25-26]。

模型构建利用 R 软件(R3.5.1 版本)中的 lme4^[27]软件包完成。

1.2.2 鱼类生长死亡参数估算

(1)生长参数估算

鱼类的生长一般用 von Bertalanffy 生长方程^[23]表示:

$$L_t = L_{\infty}[1 - e^{-k(t-t_0)}]$$
 (4)

$$W_t = W_{\infty}[1 - e^{-k(t-t_0)}]$$
 (5)

式中, L_t 、 W_t 分别为 t 龄时的体长(mm)和体重(g); L_{∞} 、 W_{∞} 为渐近体长(mm)和渐进体重(g); K 为相对生长速率; 理论初始年龄(t_0)表示鱼类理论体长等于零时所对应的年龄, 通常为负值^[28], 通过 Pauly 经验公式获得:

$$\lg(-t_0) = -0.3922 - 0.2752 \times \lg L_{\infty} - 1.038 \lg K$$
 (6)

本研究基于 Bootstrap 的电子体长频率分析(Electronic Length Frequency Analysis, ELEFAN)法以提高结果的稳健性^[29], 选用模拟退火的方式进行优化求得 L_{∞} 和 K ^[30]。

(2)死亡参数及开发率

鱼类的总死亡系数(Z)用变换体长渔获曲线法获得^[31], 鱼类的自然死亡系数(M)用 Pauly 经验公式获得^[32]:

$$\ln M = -0.0066 - 0.2790 \ln L_{\infty} + 0.6543 \ln K + 0.4634 \ln T$$
 (7)

式中, L_{∞} 表示鱼类的渐近体长(mm); K 表示鱼类

的相对生长速率; T 为当前海域年平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

捕捞死亡系数(F)和开发率(E)通过公式(8)和(9)获得:

$$Z = M + F$$
 (8)

$$E = \frac{F}{Z}$$
 (9)

1.2.3 资源评价 采用 Beverton-Holt 单位补充量渔获量模型^[22,33](又称为 YPR 模型)进行资源评价:

$$\text{YPR} = F W_{\infty} e^{-M(t_c - t_r)} \sum_{n=0}^3 \frac{Q_n e^{-nk(t_c - t_0)}}{F + M + nK} [1 - e^{-(M+F+nK)(t_r - t_c)}]$$

$$(n = 0, 1, 2, 3; Q_n = 1, -3, 3, -1)$$
 (10)

式中, YPR 为单位补充量渔获量(g); F 为捕捞死亡系数; W_{∞} 为渐进体重; M 为自然死亡系数; t_c 为开捕年龄; t_0 为理论初始年龄; t_r 为补充年龄; t_r 为渐近年龄。

生长方程的拟合和渔获曲线的构建利用 TropFishR^[34]软件包完成。

2 结果与分析

2.1 环境质量

长岛鱼礁区、西霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区海水的溶解氧均大于 6 mg/L、化学需氧量均小于 2 mg/L、无机氮含量均小于 0.2 mg/L, 符合第一类海水水质标准(表 1)。

表 1 3 处鱼礁区环境调查数据
Tab. 1 Environmental survey data of three reef areas

海域 region	季节 season	环境参数 environmental parameters					
		水温/ $^{\circ}\text{C}$ water temperature	DO/(mg/L)	盐度 salinity	COD/(mg/L)	无机氮/(mg/L) inorganic nitrogen	硅酸盐/(mg/L) silicate
长岛鱼礁区 Changdao reef area	春 spring	10.83±3.24	10.21±0.87	32.13±0.75	0.78±0.29	0.12±0.06	0.03±0.01
	夏 summer	20.25±3.71	7.89±1.42	31.80±0.72	1.38±0.61	0.12±0.04	0.08±0.05
	秋 autumn	18.81±4.06	8.18±1.79	31.82±0.98	1.36±0.29	0.08±0.08	0.13±0.06
	冬 winter	8.62±4.17	9.24±1.57	31.48±0.99	0.55±0.48	0.16±0.03	0.16±0.03
西霞口鱼礁区 Xixiakou reef area	春 spring	12.23±3.69	9.90±0.58	32.10±0.94	0.93±0.41	0.05±0.02	0.04±0.02
	夏 summer	21.04±2.52	7.93±1.32	31.83±0.45	0.86±0.21	0.11±0.01	0.07±0.02
	秋 autumn	19.31±1.83	7.38±0.20	32.02±0.56	1.03±0.19	0.05±0.02	0.15±0.02
	冬 winter	7.25±3.31	9.77±0.74	32.27±0.23	0.84±0.63	0.11±0.03	0.18±0.01
前三岛鱼礁区 Qiansandao reef area	春 spring	14.00±1.00	8.47±0.25	30.36±0.18	0.81±0.59	0.10±0.07	0.08±0.05
	夏 summer	25.33±1.61	8.08±2.38	30.79±1.56	1.68±0.31	0.10±0.08	0.09±0.04
	秋 autumn	20.93±3.03	7.99±1.22	29.11±0.12	1.42±0.29	0.12±0.07	0.20±0.00
	冬 winter	6.80±3.36	9.97±1.66	29.80±0.65	1.13±0.82	0.10±0.03	0.15±0.01

2.2 许氏平鲈体长、体重分布情况

共采集 1642 尾许氏平鲈, 体长范围为 32~311 mm, 平均体长为 134.06 mm, 优势体长组为 100~150 mm, 占比 35.26%; 体重范围 1.02~887.69 g, 平均体重 100.49 g, 优势体重组 0~50 g, 占比 44.03% (图 2)。

许氏平鲈在不同年份、季节和海域的体长、

体重分布均有一定的差异(图 3)。从不同年份来看, 2017 年和 2020 年个体体长、体重最高, 2019 年个体体长、体重最小; 从不同季节来看, 春秋两季的个体体长、体重最大, 夏冬季个体体长、体重最小; 从不同海域来看, 前三岛鱼礁区的个体体长、体重最大, 长岛鱼礁区的个体体长、体重最小 (图 3)。

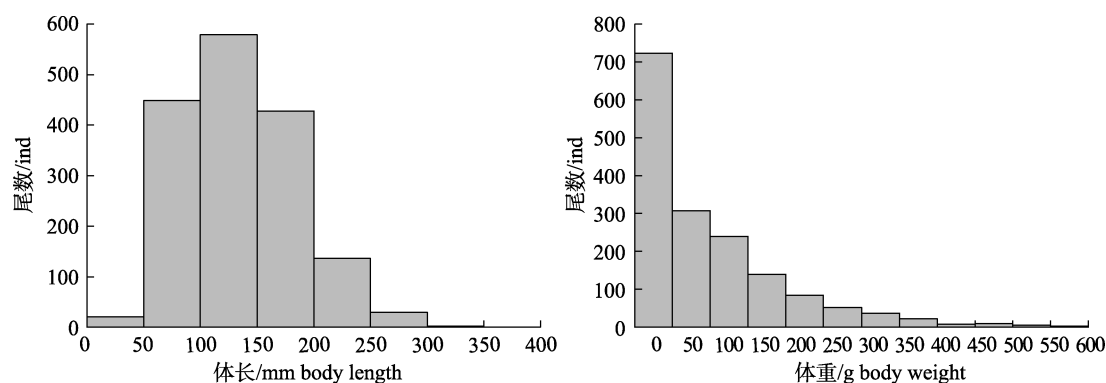


图 2 许氏平鲈体长、体重频率分布图

Fig. 2 Frequency distributions of body length and body weight of *Sebastes schlegelii*

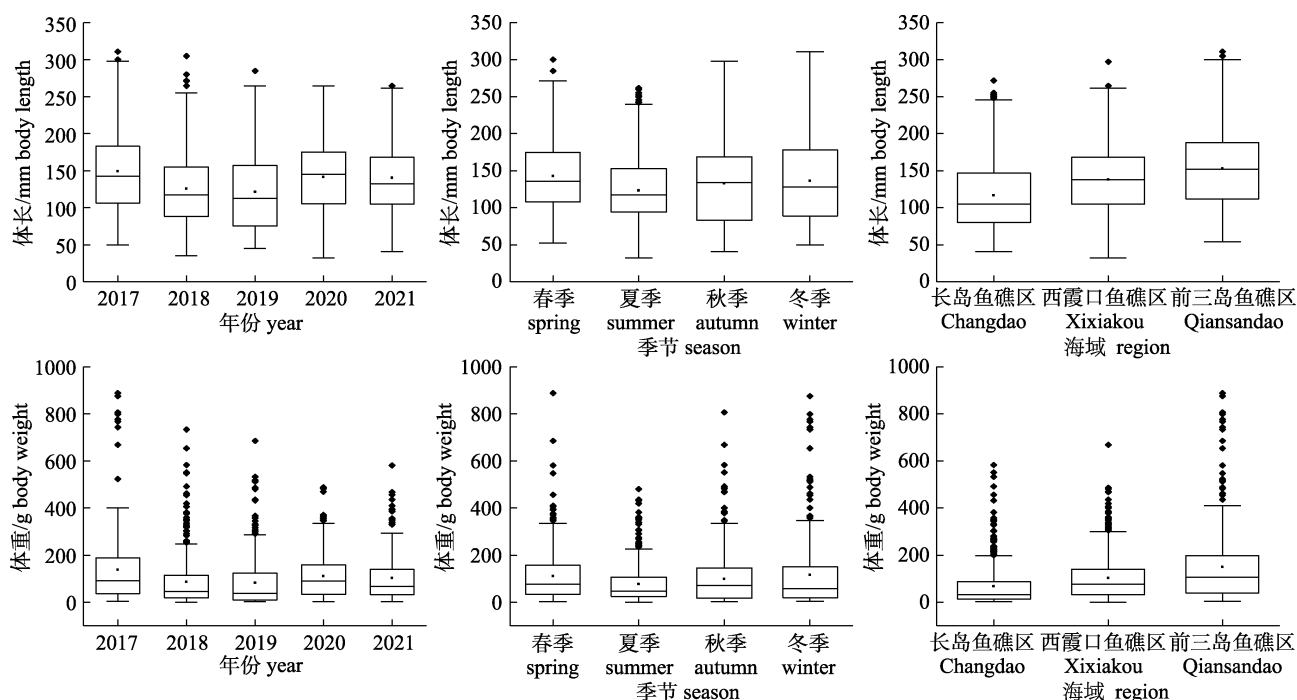


图 3 许氏平鲈不同年份、季节和海域的体长体重分布

Fig. 3 Distributions of body length and body weight of *Sebastes schlegelii* in different years, seasons and regions

2.3 许氏平鲈的体长-体重关系及其异质性

根据公式(1)分别对 3 处人工鱼礁区许氏平鲈体长、体重数据拟合(图 4), 得到长岛鱼礁区、西

霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区体长-体重关系式分别为 $W=(2.24 \times 10^{-5}) \times L^{3.04}$ ($R^2=0.9685$)、 $W=(2.93 \times 10^{-5}) \times L^{2.99}$ ($R^2=0.9654$)、 $W=(3.32 \times 10^{-5}) \times$

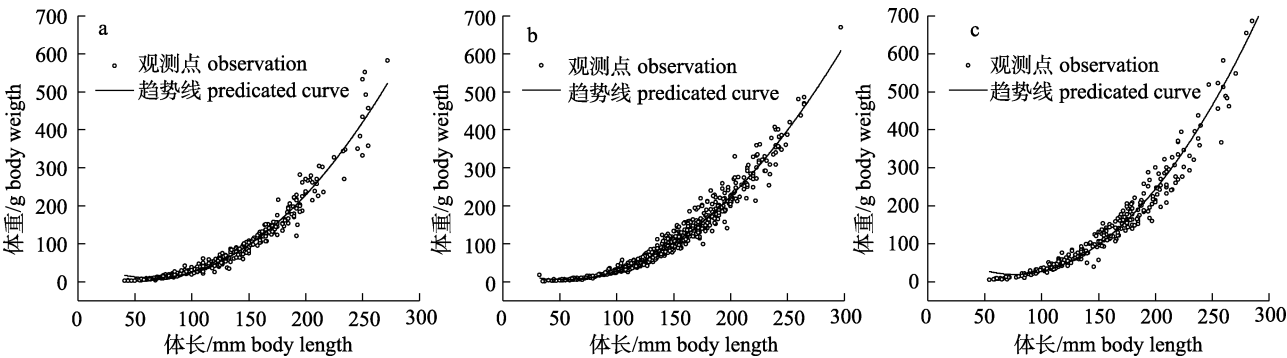


图 4 长岛(a)、西霞口(b)、前三岛(c)鱼礁区许氏平鲈体长-体重关系
Fig. 4 Length-weight relationship of *Sebastes schlegelii* in Changdao (a), Xixiakou (b), and Qiansandao (c) reef areas

$L^{2.98}$ ($R^2=0.9744$)。前三岛鱼礁区的 a 值最大, 长岛鱼礁区的 a 值最小。长岛鱼礁区的 $b>3$, 呈正异速生长; 西霞口和前三岛鱼礁区的 $b<3$, 呈负异速生长。

使用线性混合效应模型描述许氏平鲈的体长-体重关系的时空异质性, 通过比较模型的 AIC 和 RMSE 值, 同时加入年份、季节和海域对截距 $\lg a$ 和斜率 b 产生随机效应的 M22 拟合效果最佳(表 2)。最佳模型拟合结果如图 5 所示, 从不同年份来看, a 值在 2020 年最大, 2019 年最小; 从不同季节来看, a 值在春秋两季最大, 夏季最小; 从不同海域来看, a 值在前三岛鱼礁区最大, 长岛鱼礁区最小。 a 值的年份、季节和海域差异范围分别为 2.44×10^{-5} 、 0.43×10^{-5} 和 0.59×10^{-5} , b 值的年份、季节和海域差异范围分别为 0.28、0.03 和 0.02, 表明相对于季节和海域而言, 年份差异对鱼类体长-体重关系中参数 a 、 b 的影响更大, 对许氏平鲈生长异质性产生的作用更明显。(图 5)。

对于体长小于 200 mm 的许氏平鲈, 其体长-体重关系在不同季节和海域间的差异较小; 对于体长大于 200 mm 的许氏平鲈, 不同年份、季节和海域间的差异相对较大, 其中年份差异最大。从年份来看, 2020 年许氏平鲈体重随体长的增长率最大, 2019 年最小; 从季节来看, 春季和秋季许氏平鲈体重随体长的增长率相似, 夏季和冬季相似, 但春秋两季增长率高于夏冬两季; 从海域来看, 前三岛鱼礁区许氏平鲈体重随体长的增长率最高, 其次是西霞口鱼礁区, 长岛鱼礁区最小(图 5)。

表 2 许氏平鲈体长-体重关系模型构建及其拟合结果
Tab. 2 The model constructions for body length-weight relationship of *Sebastes schlegelii* and fit statistics

模型 model	随机效应 random effect	AIC	RMSE	R^2
M1	无	-997.091	0.176	0.9791
M2	年份-截距	-999.915	0.175	0.9794
M3	年份-斜率	-997.864	0.175	0.9793
M4	年份-截距和斜率	-1070.700	0.172	0.9801
M5	季节-截距	-1012.810	0.174	0.9796
M6	季节-斜率	-1010.400	0.174	0.9796
M7	季节-截距和斜率	-1012.960	0.174	0.9796
M8	海域-截距	-998.898	0.176	0.9791
M9	海域-斜率	-998.898	0.176	0.9791
M10	海域-截距和斜率	-999.199	0.175	0.9792
M11	年份和季节-截距	-1026.700	0.173	0.9798
M12	年份和季节-斜率	-1018.910	0.173	0.9797
M13	年份和季节-截距和斜率	-1099.120	0.170	0.9806
M14	年份和海域-截距	-997.915	0.175	0.9794
M15	年份和海域-斜率	-1018.910	0.173	0.9797
M16	年份和海域-截距和斜率	-1067.620	0.172	0.9801
M17	季节和海域-截距	-1010.810	0.174	0.9796
M18	季节和海域-斜率	-1018.910	0.173	0.9797
M19	季节和海域-截距和斜率	-1010.880	0.174	0.9796
M20	年份、季节和海域-截距	-1026.700	0.173	0.9798
M21	年份、季节和海域-斜率	-1018.910	0.173	0.9797
M22	年份、季节和海域-截距和斜率	-1099.870	0.170	0.9806

注: M1 为广义线性模型, M2-M22 为线性混合效应模型。AIC 为赤池信息准则, RMSE 为均方根误差, AIC 和 RMSE 值越小, 代表模型拟合程度越好。
Note: M1 is the generalized linear model, and M2-M22 are the linear mixed-effects models. AIC is the Akaike Information Criterion, and RMSE is the Root Mean Squared Error. The smaller values of AIC and RMSE indicate the better fit of the model.

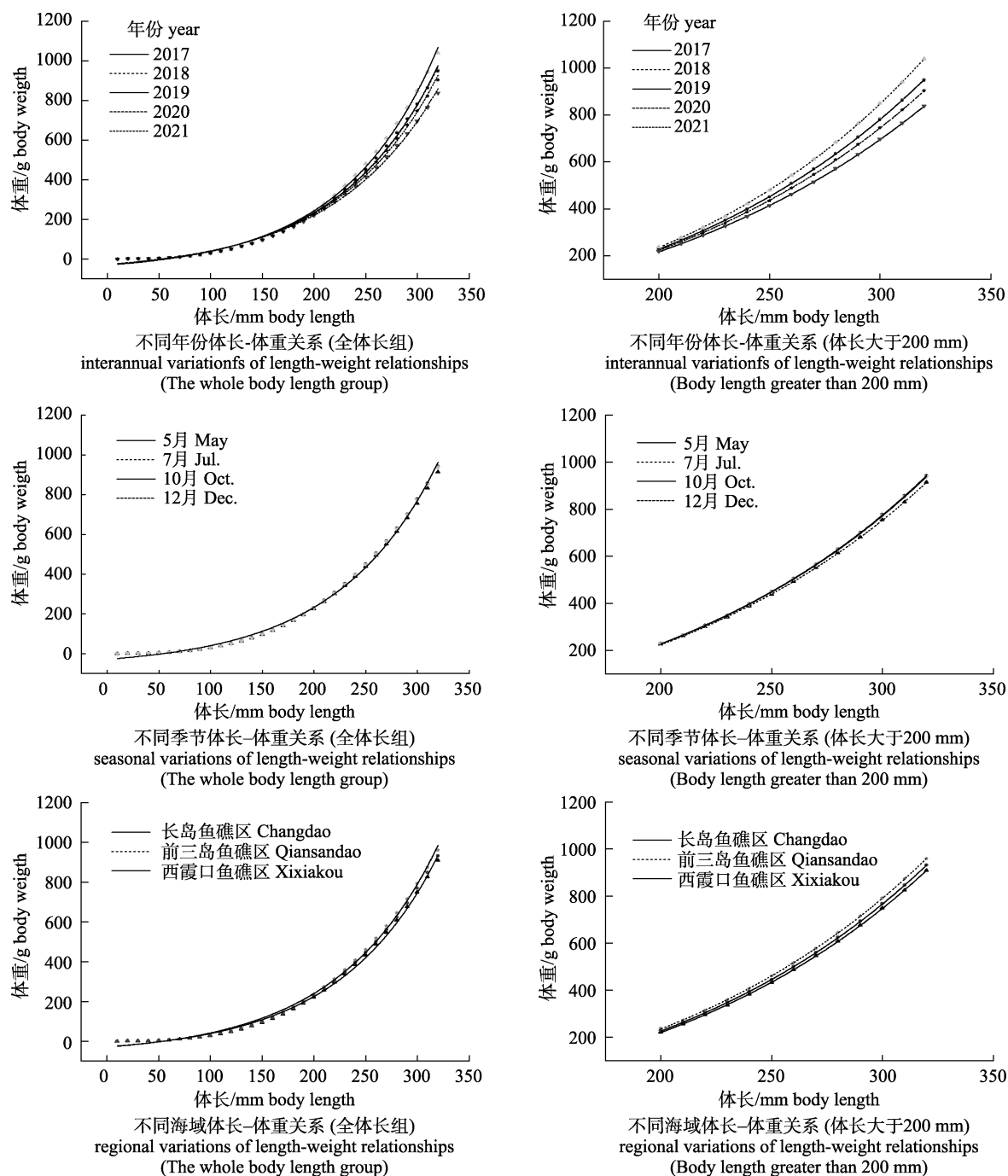


图 5 许氏平鲈不同年份、季节和海域的体长-体重关系

Fig. 5 The body length-weight relationships of *Sebastes schlegelii* in different years, seasons and regions

2.4 许氏平鲈生长参数和死亡参数估算

基于许氏平鲈体长频率数据, 运用 ELEFAN 方法得到长岛鱼礁区、西霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区的许氏平鲈 Von Bertalanffy 生长方程分别为 $L_t = 264.12[1 - e^{-0.5(t+0.18)}]$ 、 $W_t = 522.98[1 - e^{-0.5(t+0.18)}]$; $L_t = 278.23[1 - e^{-0.3(t+0.30)}]$ 、 $W_t = 610.11[1 - e^{-0.3(t+0.30)}]$;

$L_t = 280.34[1 - e^{-0.38(t+0.24)}]$ 、 $W_t = 643.89[1 - e^{-0.38(t+0.24)}]$, 表明前三岛鱼礁区的渐近体长和渐近体重均大于长岛鱼礁区和西霞口鱼礁区(表 3); 利用变换体长渔获曲线获得长岛鱼礁区、西霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区的许氏平鲈总死亡系数(Z)及 50%选择体长(L_{50}), 开发率(E)如表 4 所示。

表 3 通过模拟退火优化方式获得的
von Bertalanffy 生长参数

海域 region	渐近体长/mm asymptotic length	渐近体重/g asymptotic body weight	相对生长速率 relative growth rate
长岛鱼礁区 Changdao reef area	264.12	522.98	0.50
西霞口鱼礁区 Xixiakou reef area	278.23	610.11	0.30
前三岛鱼礁区 Qiansandao reef area	280.34	643.89	0.38

2.5 3 处鱼礁区许氏平鲈资源评价

Beverton-Holt 模型绘制的各鱼礁区等渔获量曲线如图 6 所示。保持捕捞死亡系数(F)不变, 改变开捕年龄(t_c)的最大产量点连成的线为 AA' ; 保持开捕年龄(t_c)不变, 改变开捕年龄(F)的最大产量点连成的线为 BB' , 两者之间的区域为最适产量区^[35]。长岛鱼礁区、西霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区渔业现行点 P 点分别为(0.43, 0.51)、(0.29, 1.41)和(0.34, 1.06), 对应的单位补充量渔获量分别为 132.20 g、160.31 g 和 160.93 g。

表 4 3 处鱼礁区许氏平鲈生长死亡参数和开发率

参数 parameter	长岛鱼礁区 Changdao reef area	西霞口鱼礁区 Xixiakou reef area	前三岛鱼礁区 Qiansandao reef area
理论初始年龄(t_0) theoretical initial age	-0.18	-0.30	-0.24
总死亡系数(Z) total mortality coefficient	0.87	0.62	0.74
自然死亡系数(M) natural mortality coefficient	0.44	0.33	0.40
捕捞死亡系数(F) fishing mortality coefficient	0.43	0.29	0.34
开发率(E) exploitation rate	0.49	0.47	0.46
开发状态 status of development	合理开发	合理开发	合理开发
50%选择体长(mm) 50% selected body length	63.60	95.50	93.03
首次捕捞年龄(t_c) age of first fishing	0.51	1.41	1.06

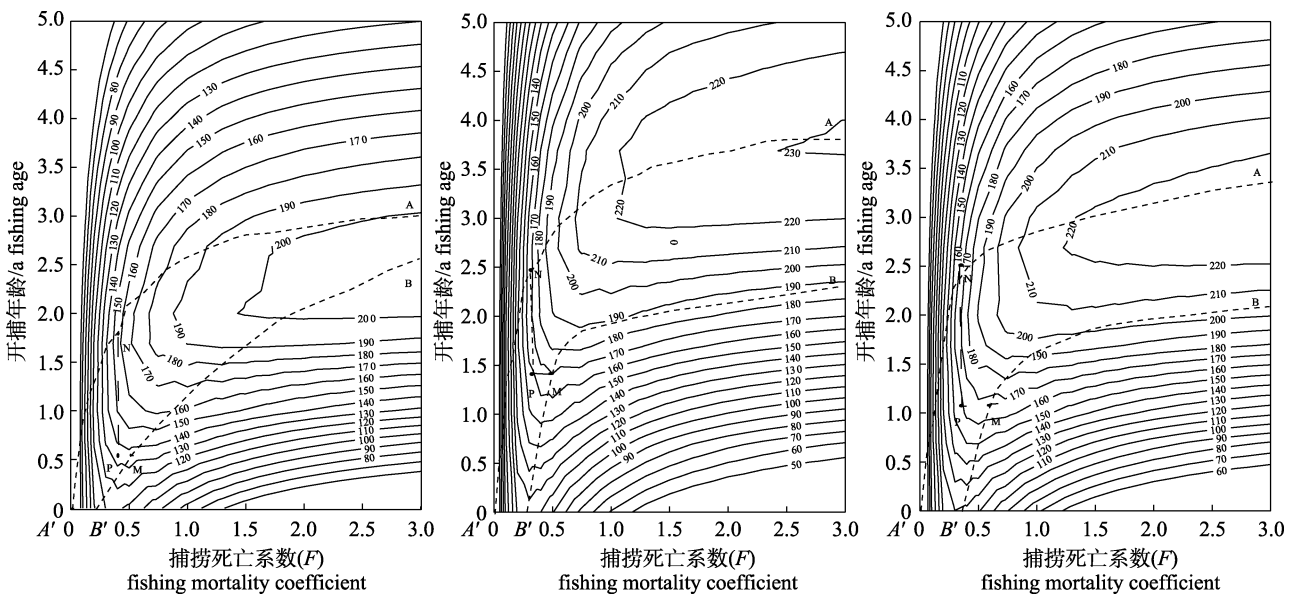


图 6 长岛、西霞口、前三岛鱼礁区单位补充量等渔获量曲线

Fig. 6 The yield per recruitment curve of *Sebastes schlegelii* in Changdao, Xixiakou, and Qiansandao reef areas

3 讨论

3.1 体长-体重关系

许氏平鲈的首次性成熟体长约为 193 mm^[36],

本研究所采集许氏平鲈优势体长组为 100~150 mm (图 2), 远小于首次性成熟体长, 表明人工鱼礁区虽然对许氏平鲈生物资源量的增加有促进作用^[9], 但存在个体小型化和低龄化现象。该现

象一定程度上反映了人工鱼礁区渔业资源开发率较高以及渔具选择性较差^[37-39], 导致幼体和成体的留存率均较高, 不利于渔业资源的可持续发展。因此, 应开发生态友好型渔具渔法, 并降低捕捞强度, 合理开发利用渔业资源。

体长-体重关系中, 参数 a 可以反映鱼类的生存环境条件, 与鱼类饵料基础、栖息地水文条件等环境因素呈正相关^[22]。西霞口和前三岛鱼礁区的 a 值远大于长岛鱼礁区, 表明西霞口和前三岛鱼礁区营养更丰富、生存条件更优越, 更利于许氏平鲈生长。参数 b 可以用于判断鱼类是否处于等速生长^[22]。3 处鱼礁区的 b 值均接近于 3, 表明许氏平鲈的生长均趋向于等速生长, 鱼礁区能够满足许氏平鲈生长的基本物质营养条件, 符合 von Bertalanffy 生长方程的假设条件。

3.2 体长-体重时空异质性分析

运用线性混合效应模型研究许氏平鲈体长-体重关系时空异质性发现年份的异质性最为明显, 其次是海域和季节(图 5), 说明鱼礁区渔业资源养护效果与投放时间密切相关, 与张镇研究结果一致^[40]。本文通过不同异质性来源获得条件因子 a 值范围 $1.48 \times 10^{-5} \sim 3.92 \times 10^{-5}$ 和异速生长因子 b 值范围 $2.85 \sim 3.13$, 与前人研究范围 ($1.09 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$ 、 $2.92 \sim 3.12$)^[6, 8, 13, 41-42] 较为吻合。唐衍力等^[37]通过许氏平鲈室内水槽实验获取的 a 、 b 参数值比天然海域要大, 可能是因为室内实验许氏平鲈种群密度适宜, 饵料丰富, 更适合许氏平鲈生长。

水文环境和饵料丰度是影响鱼类生长异质性的主要原因^[43], 尤其是温度、盐度和深度等环境因子与鱼类生长特征密切相关^[44-45]。通过比较模型的 AIC 值和 RMSE, 同时加入年份、季节和海域对截距 $\lg a$ 和斜率 b 产生随机效应的 M22 拟合效果最佳(表 2), 在最佳模型中, 2020 年春秋季节前三岛鱼礁区的条件因子 a 值更大, 许氏平鲈个体质量更高, 2021 年、2018 年和 2017 年冬季西霞口鱼礁区个体质量次之, 2019 年夏季长岛鱼礁区个体质量最小。原因可能如下: 1) 温度是影响鱼类生长、卵巢发育和排卵的重要生态因子之一^[46],

适温范围内, 鱼类生长发育速度随温度的升高而增加。相对于长岛鱼礁区和西霞口鱼礁区, 前三岛鱼礁区纬度较低, 温度较高且在许氏平鲈生长发育适温范围($8 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $14 \sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[47]内(表 1), 更适合许氏平鲈生长繁殖。夏季温度过高, 超出许氏平鲈生长发育适温范围, 同时夏季(7 月)处于禁渔期(5—9 月)内, 期间, 许氏平鲈种群密度增大, 种内竞争激烈, 使得饵料相对不充分, 生长受到影响。2) 前三岛鱼礁区环境条件比其他两处鱼礁区更优越, 各项环境指标(溶解氧、氨氮、硅酸盐)均较高(表 1), 聚集了大量浮游动植物和虾蟹等饵料生物, 可为许氏平鲈提供丰富的食物来源^[9]。同时, 前三岛鱼礁区较其他两处而言, 水深较深, 大个体许氏平鲈数量相对较多。3) 西霞口鱼礁区和长岛鱼礁区位于渤海湾, 属于半封闭系统, 水体交换能力差, 环境承载力薄弱, 人为干扰较多, 生态环境压力大, 不利于许氏平鲈生长。而前三岛鱼礁区距离陆地较远, 人为干扰和捕捞压力较小, 环境承载力强, 更利于许氏平鲈生长。

3.3 鱼礁区资源利用状况

Gulland^[48]认为, 开发率(E)低于 50%为轻度捕捞, 高于 50%为过度捕捞。本研究结果显示长岛、西霞口和前三岛鱼礁区开发率(E)分别为 0.49、0.47、0.46, 表明 3 处鱼礁区均处于轻度开发状态, 但长岛鱼礁区开发率接近 50%, 应控制捕捞强度。

单位补充量渔获量分析结果显示(图 6), 长岛鱼礁区、西霞口鱼礁区和前三岛鱼礁区现行点 P 均位于最适产量区内, 表明 3 处鱼礁区开发程度均较为合理。一个渔业资源群体所提供的渔获量取决于补充量水平、自然死亡率(M)、鱼类的个体生长、首次捕捞年龄(t_c)和捕捞死亡率(F)等因素, 其中最后两个因素能够人为控制^[22]。因此, 本研究通过调整这两个变量的变动, 使得获取最大渔获量同时, 也能合理有效地利用渔业资源。图 6 表明应维持目前捕捞强度, 若捕捞死亡系数增大, 现行点 P 将不在最适产量区内; 所以通过调整开捕年龄(t_c)可以显著提高单位补充量渔获量, 3 处鱼礁区可达到的最大单位补充量渔获量分别为

159.8 g、170.6 g 和 170.8 g。

综上所述, 3 处典型人工鱼礁区许氏平鲈资源均处于合理开发状态。为提高单位补充量渔获量, 应控制捕捞强度, 减少捕捞死亡系数, 并通过改变渔具渔法提高开捕年龄(t_c), 例如通过放大网目尺寸等技术措施提高网具的尺寸和年龄选择性^[49]。

参考文献:

- [1] Fu X M. Studies on protective exploitation and sustainable development of Chinese offshore bioresources[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. [傅秀梅. 中国近海生物资源保护性开发与可持续利用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.]
- [2] Chen X, Feng Q Y, Deng Z R. A study on present situation of man-made reef constructions and its development countermeasures[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2006, 24(1): 83-89. [陈心, 冯全英, 邓中日. 人工鱼礁建设现状及发展对策研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2006, 24(1): 83-89.]
- [3] Chen Y, Liu X D, Wu X Y, et al. Distribution of schlegel's rockfish (*Sebastes schlegeli* Hilgendorf) in different artificial reef models[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2006, 21(2): 153-157. [陈勇, 刘晓丹, 吴晓郁, 等. 不同结构模型礁对许氏平鲈幼鱼的诱集效果[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(2): 153-157.]
- [4] Tong Y H, Guo X W. Feeding competition between two rockfish *Sebastes schlegeli* and *Hexagrammos otakii*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(4): 541-549. [童玉和, 郭学武. 两种岩礁鱼类的食物竞争实验[J]. 中国水产科学, 2009, 16(4): 541-549.]
- [5] Yu F, Lu B, Gao H, et al. A preliminary study on the growth characteristics of juvenile Xu's flat fish[J]. Journal of Aquaculture, 2016, 37(12): 7-9. [于飞, 陆波, 高焕, 等. 许氏平鲈幼鱼生长特性初步研究[J]. 水产养殖, 2016, 37(12): 7-9.]
- [6] Zhuang L C, Ye Z J, Li J. Age and growth studies of *Sebastes schlegelii* in Qingdao coastal waters[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(8): 32-37. [庄龙传, 叶振江, 李军. 青岛近海许氏平鲈年龄与生长特性的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(8): 32-37.]
- [7] Xu S Y, Zhang H, Pan X Z, et al. Morphological comparison of the otolith of *Sebastes schlegelii* populations[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(11): 54-61. [徐胜勇, 张辉, 潘晓哲, 等. 许氏平鲈群体耳石形态学比较[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(11): 54-61.]
- [8] Chen D G, Ye Z J, Duan Y, et al. A preliminary study on the biology and seedling breeding of the breeding population of *Sebastes schlegelii*[J]. Haiyang Xuebao, 1994, 16(3): 94-101. [陈大刚, 叶振江, 段钰, 等. 许氏平鲈繁殖群体的生物学及其苗种培育的初步研究[J]. 海洋学报, 1994, 16(3): 94-101.]
- [9] Tang Y L, Xie T, Yu H L, et al. Effects of environment and feeding factors on the distribution of different body lengths of *Sebastes schlegelii* in the reef areas of Shandong Province[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(6): 924-935. [唐衍力, 解涛, 于浩林, 等. 环境与摄食对山东省近海鱼礁区不同体长许氏平鲈分布的影响[J]. 水产学报, 2020, 44(6): 924-935.]
- [10] Zhang B, Li Z Y, Jin X S. Food composition and prey selectivity of *Sebastes schlegelii*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(1): 134-141. [张波, 李忠义, 金显仕. 许氏平鲈的食物组成及其食物选择性[J]. 中国水产科学, 2014, 21(1): 134-141.]
- [11] Gao B, Wang D B, Zheng L H, et al. Effects of water temperature change on feeding and growth of *Sebastes schlegelii* in offshore cage culture[J]. Journal of Aquaculture, 2021, 42(5): 20-23. [高滨, 王得宾, 郑龙华, 等. 水温变化对近海网箱养殖中许氏平鲈摄食及生长的影响[J]. 水产养殖, 2021, 42(5): 20-23.]
- [12] Zhang S M, Wang X J, Li J F, et al. Effects of temperature on gonadal differentiation of black rockfish (*Sebastes schlegelii*) and its mechanism[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(7): 1569-1580. [张思敏, 王孝杰, 李吉方, 等. 温度对许氏平鲈性腺分化的影响及其机制[J]. 水产学报, 2019, 43(7): 1569-1580.]
- [13] Zhang M M, Liu Y, Xie T, et al. Growth, mortality and reasonable utilization of *Sebastes schlegelii* in the artificial reef area of Weihai, Shandong Province[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1925-1936. [张萌萌, 刘岳, 解涛, 等. 威海西霞口海洋牧场鱼礁区中许氏平鲈的生长、死亡及合理利用[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1925-1936.]
- [14] Xue G J, Yin Z Q, Cheng Q, et al. Evaluation of *Sebastes schlegelii* resources in Dachangshan artificial reef area based on body length standard[J]. Hebei Fisheries, 2020(1): 24-28. [薛国进, 尹增强, 程前, 等. 基于体长标准的大长山人工鱼礁区许氏平鲈资源评估[J]. 河北渔业, 2020(1): 24-28.]
- [15] Zhong S J, Ma Q Y, Liu S D, et al. Linear mixed-effects models for estimating spatiotemporal variations of length-weight relationships for *Lophius litulon*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(6): 1299-1307. [衷思剑, 麻秋云, 刘淑德, 等. 基于线性混合效应模型的黄鮟鱇体

- 长体重关系的时空差异[J]. 中国水产科学, 2018, 25(6): 1299-1307.]
- [16] Lai H L, Helser T. Linear mixed-effects models for weight-length relationships[J]. Fisheries Research, 2004, 70(2-3): 377-387.
- [17] Ma Q Y, Jiao Y, Ren Y P. Linear mixed-effects models to describe length-weight relationships for yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) along the north coast of China[J]. PLoS One, 2017, 12(2): e0171811.
- [18] Cui M Y, Chen W F, Dai L B, et al. Growth heterogeneity and natural mortality of Japanese scad in offshore waters of southern Zhejiang[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1427-1437. [崔明远, 陈伟峰, 戴黎斌, 等. 浙江南部海域蓝圆鲹生长异质性及死亡特征[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1427-1437.]
- [19] Chen J H, Wang X F, Tian S Q, et al. Growth heterogeneity of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean explored by the mixed effects model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(5): 570-578. [陈锦辉, 王学昉, 田思泉, 等. 基于混合效应模型的印度洋大眼金枪鱼生长特征异质性分析[J]. 中国水产科学, 2020, 27(5): 570-578.]
- [20] Standardization Administration. GB/T 12763.6-2007 specifications for oceanographic survey-part 6: survey of marine species[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [21] Ricker W E. Linear regressions in fishery research[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 2011, 30(3): 409-434.
- [22] Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.]
- [23] Luke S G. Evaluating significance in linear mixed-effects models in R[J]. Behavior Research Methods, 2017, 49(4): 1494-1502.
- [24] Sun H M. Mixed effect prediction of linear and generalized linear mixed model and their applications[D]. Jinan: Shandong University, 2018. [孙晗梅. 线性和广义线性混合模型的混合效应预测与应用[D]. 济南: 山东大学, 2018.]
- [25] Guthery F S, Burnham K P, Anderson D R. Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach[J]. The Journal of Wildlife Management, 2003, 67(3): 655.
- [26] Akaike H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [27] Bates D, M, Bolker B M, et al. Fitting linear mixed-effects models using lme4[J]. Journal of Statistical Software, 2015, 67(1): 1-48.
- [28] von Bertalanffy L. A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws. ii)[J]. Human Biology, 1938, 10(2): 181-213.
- [29] Mildenerberger T K, Taylor M H, Wolff M. TropFishR: An R package for fisheries analysis with length-frequency data[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2017, 8(11): 1520-1527.
- [30] Wang K, Zhang C L, Chen N, et al. Evaluating the growth parameters of *Pholis fangi* based on the bootstrap-ELEFAN method[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(3): 512-521. [王琨, 张崇良, 陈宁, 等. 基于 Bootstrap 的 ELEFAN 方法在评估方氏云鲷群体生长参数中的应用[J]. 中国水产科学, 2019, 26(3): 512-521.]
- [31] Pauly D. Length-converted catch curves: a powerful tool for fisheries research in the tropics[J]. Fishbyte, 1983, 1(2): 9-13.
- [32] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks[J]. ICES Journal of Marine Science, 1980, 39(2): 175-192.
- [33] Liu Q, Xu B D, Ye Z J, et al. Growth and mortality of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) inhabiting Haizhou Bay of China[J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(4): 557-561.
- [34] Pauly D, David N. ELEFAN I, a basic program for the objective extraction of growth parameters from length-frequency data[J]. Meeresforschung, 1981, 28(4): 205-211.
- [35] 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. [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.]
- [36] Chen D G. Fishery Ecology in Bohai Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1991. [陈大刚. 黄渤海渔业生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.]
- [37] Tang Y L, Zhang W H, Liu Y, et al. Selectivity of fish traps with different size mesh and hanging ratio for *Sebastes schlegelii*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(3): 586-591. [唐衍力, 张武浩, 刘岳, 等. 不同尺寸网目与缩结系数对许氏平鲈的选择性[J]. 中国水产科学, 2019, 26(3): 586-591.]
- [38] Yu M J, Zhang L Y, Liu C D, et al. Improving size selectivity of round pot for *Charybdis japonica* by configuring escape vents in the Yellow Sea, China[J]. PeerJ, 2021, 9:

- e12282.
- [39] Yu M J, Liu C D, Tang Y L, et al. Effects of escape vents on the size selection of whelk (*Rapana venosa*) and Asian paddle crab (*Charybdis japonica*) in the small-scale pot fishery of the Yellow Sea, China[J]. *Hydrobiologia*, 2022, 849(14): 3101-3115.
- [40] Zhang Z, Dong J Y, Sun X, et al. Trophic structure of macrobenthos in artificial reef area of Furong Island, Laizhou Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022: 1-15. [张镇, 董建宇, 孙昕, 等. 莱州芙蓉岛人工鱼礁区大型底栖动物营养结构特征研究[J]. *水产学报*, 2022: 1-15.]
- [41] Tang Y L, Bai H Y, Sheng H X, et al. Relationships between distribution of *Sebastes schlegelii*, 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. [唐衍力, 白怀宇, 盛化香, 等. 海州湾前三岛鱼礁区许氏平鲈的分布及 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.]
- [42] Yin Z Q, Xu C C, Chen Y, et al. Growth characteristics and resource evaluation of *Paramys schrenckii* in the reef area of Zhangzidao[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2015, 26(10): 71-72, 56. [尹增强, 许传才, 陈勇, 等. 獐子岛鱼礁海域许氏平鲈生长特征与资源评估[J]. *农村经济与科技*, 2015, 26(10): 71-72, 56.]
- [43] Dong J, Wang C, Tang M Z, et al. Relationship between Body Length and Body Weight of Pacific sand lance in the Yellow Sea[J]. *Fisheries Science*, 2004, 23(10): 9-11. [董婧, 王冲, 唐明芝, 等. 黄海区玉筋鱼体长和体重的关系[J]. *水产科学*, 2004, 23(10): 9-11.]
- [44] Liu Y, Li S F, Chen X G, et al. The structure and diversity of demersal fish communities in winter 2000 in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(10): 19-24. [刘勇, 李圣法, 陈学刚, 等. 东、黄海 2000 年冬季底层鱼类群落结构及其多样性[J]. *海洋科学*, 2007, 31(10): 19-24.]
- [45] Fei H N, He B Q, Chen G M. The regional and seasonal variations of diversity and dominant species of demersal fish communities in continental shelf of northern Nanhai[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1981, 5(1):1-20. [费鸿年, 何宝全, 陈国铭. 南海北部大陆架底栖鱼群聚的多样性以及优势种区域和季节变化[J]. *水产学报*, 1981, 5(1): 1-20.]
- [46] Wen H S, Lin H R. Effect of environmental factors on gonadal maturation as well as its ovulation and spawning in teleosts[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 151-155. [温海深, 林浩然. 环境因子对硬骨鱼类性腺发育成熟及其排卵和产卵的调控[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 151-155.]
- [47] Zhang D S. Experiment on transportation of *Silurus xupingensis* fingerlings[J]. *China Fisheries*, 2012(2): 73-75. [张德胜. 许氏平鲈鱼种运输试验[J]. *中国水产*, 2012(2): 73-75.]
- [48] Gulland J A. Fish stock assessment: a manual of basic methods[M]. Chichester: Wiley, 1983.
- [49] Zhang J, Jiang R, Wang Z Q. Age selectivity of offshore stow nets for hairfin anchovy *Setipinna taty* and little yellow croaker *Larimichthys polyactis*[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(5): 525-532. [张健, 蒋瑞, 王忠秋. 近海张网对黄鲫和小黄鱼的年龄选择性研究[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(5): 525-532.]

Growth heterogeneity and resource assessment of *Sebastes schlegelii* in three artificial reef areas of coastal Shandong

CHEN Shuyue¹, DONG Xiuqiang², YU Mengjie¹, LIU Shude², ZHAO Wei¹, SHENG Huaxiang¹, TANG Yanli¹

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

2. Shandong Fisheries Development and Resources Conservation Center, Yantai 264003, China

Abstract: This study aimed to explore the growth heterogeneity and evaluate resource development status of *Sebastes schlegelii* in three artificial reef areas (Changdao reef area, Xixiakou reef area, and Qiansandao reef area) in coastal Shandong from 2017 to 2021 based on ocean environment and resource survey data. The ELEFAN method of Bootstrap was used to explore the growth characteristics of *S. schlegelii*, the Length-Converted Catch Curve was used to explore the death characteristics of *S. schlegelii*, the linear mixed-effects model was used to study the spatial and temporal heterogeneity of body length-weight relationship of *S. schlegelii*, and the Beverton–Holt model and exploitation rate were used to explore the resource utilization of *S. schlegelii*. The results showed that the growth condition factor (a) of *S. schlegelii* in the Qiansandao reef area was significantly higher than that in the Xixiakou and Changdao reef areas. The asymptotic body length and asymptotic body weight of *S. schlegelii* in the Qiansandao reef area were the largest, followed by those of the Xixiakou and Changdao reef area. The total death coefficient and natural death coefficient of the Changdao reef area were 0.87 and 0.44, respectively, which were higher than those of the Xixiakou and Qiansandao reef area; the parameters a and b obtained using the linear mixed-effect model ranged from 1.48×10^{-5} to 5.92×10^{-5} and 2.85 to 3.13, respectively. With the same body length conditions, the individual quality of *S. schlegelii* in the spring and autumn of 2020 was the highest in the Qiansandao reef area, followed by the winter of 2021, 2018, and 2017 in the Xixiakou reef area; the summer of 2019 in the Changdao reef area was the lowest. The exploitation rate conformed to the mild development indicators of the Gulland theory, and the Beverton–Holt model showed that the fishing current points of the three reef areas were all located in the optimum yield area, but close to the edge of the optimum yield area; thus, the fishing intensity should be controlled.

Key words: artificial reef areas; *Sebastes schlegelii*; resource assessment; growth heterogeneity

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