

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20164

浙江南部海域蓝圆鲹生长异质性及死亡特征

崔明远¹, 陈伟峰², 戴黎斌¹, 麻秋云^{1, 3, 4, 5}

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江 温州 325005;
3. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 上海海洋大学大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
5. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306

摘要: 蓝圆鲹(*Decapterus maruadsi*)属暖水性中上层鱼类, 是中国近海重要的渔业资源。本文根据 2015—2018 年浙江南部海域(120.5°E~123.5°E, 27°N~29°N)底拖网季度调查数据, 运用线性混合效应模型等方法, 研究了蓝圆鲹的叉长-体重关系和生长异质性, 并估算其自然死亡系数。结果显示, 蓝圆鲹样本叉长(L)范围为 45.0~247.0 mm, 平均叉长为 126.1 mm; 体重(W)范围为 0.7~206.6 g, 平均体重为 29.1 g; 叉长-体重关系式为: $W=5.01\times 10^{-6}L^{3.17}$ 。线性混合效应模型结果显示, 同时考虑季节、性别和年份差异的模型对蓝圆鲹叉长-体重关系的拟合效果最佳。在相同叉长条件下, 体重在秋季最大, 其次是春季, 而夏季最小; 从不同年份来看, 体重在 2018 年最大, 其次是 2016 年, 在 2017 年最小; 从不同性别来看, 雄性和雌性的差异不明显。这说明时间因素对于浙江南部海域蓝圆鲹的生长特征具有显著影响, 2018 年秋季蓝圆鲹的长势最佳。依据“Pauly”、“Pauly update”、“Jensen”、“Hoenig”和“Lorenzen”等不同的经验方程估算的蓝圆鲹自然死亡系数在 0.36~1.41 之间。本研究通过混合效应模型分析了年份、季节、性别对蓝圆鲹叉长-体重的影响, 这对蓝圆鲹生活史特征及资源评估具有重要的参考意义。

关键词: 蓝圆鲹; 混合效应模型; 叉长-体重关系; 自然死亡系数; 浙江南部海域

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)12-1427-11

蓝圆鲹(*Decapterus maruadsi*)在中国东海、黄海和南海均有分布, 有较强的趋光性, 主要捕捞方式为灯光围网和拖网。2017 年全国捕捞量已经达到 5.36×10^5 t, 是中国近海重要的渔业资源^[1-2], 其生活史特征也因此颇受关注^[3]。自然死亡系数(natural mortality)作为渔业资源评估模型中的重要参数, 是衡量绝大多数渔业资源数量变动的关键因素^[4]。叉长与体重关系是鱼类种群的基本生长特征, 能够反映鱼类个体生理状态和种群结构的变化^[5], 也是鱼类适应环境变化的重要生活史特征^[6]。这些重要鱼类生长和死亡参数的特征可以反映鱼类资源的动态变化。Hewitt 等^[7]认为通

过直接方法获取自然死亡系数较为困难, 较多自然死亡系数都通过间接方法估算得出, 间接方法^[8]采用生活史特征参数估算自然死亡系数, 例如渐进体长(L_{∞})、体重(W_{wet})、最大观测年龄(A_{max})等。生长与自然死亡作为渔业资源物种群体变动规律的关键因素^[4]密切相关。目前国内蓝圆鲹研究多以体长体重、年龄鉴定、摄食为主, 少有关于体长体重关系时空差异的研究, 自然死亡系数的估算也多采用“Pauly”经验公式^[9-10], 缺少不同估算方法的比较。混合效应模型在许多科学研究领域已经得到广泛应用^[11-12], 但基于此模型的蓝圆鲹异质性研究并不多见。本文在浙江南部海域蓝圆

收稿日期: 2020-06-01; 修订日期: 2020-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41906074, 31902372); 浙江省渔业资源专项调查项目(158053).

作者简介: 崔明远(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源评估. E-mail: 470235020@qq.com

通信作者: 麻秋云, 博士, 从事渔业资源评估研究. E-mail: qyma@shou.edu.cn

鲈的生物学信息的基础上分析其生长特性及其时间、性别差异,同时分析不同估算方法求解的自然死亡系数,为浙江南部近海蓝圆鲈渔业资源评估提供可靠的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

蓝圆鲈样品取样来自 2015 年 11 月—2018 年 11 月在浙江南部海域(120.5°E~123.5°E, 27°N~29°N)的底拖网调查(图 1), 每年 3 月初(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)进行采样, 共采样 13 个航次。调查船为近海大型单船网板底拖网作业船, 网板类型属飞碟型铸铁。该船网具全长约为 95 m, 作业时网口的平均扩张高度和宽度分别为 7.5 m 和 40 m, 平均船速为 3.18 kt, 平均拖时为 0.89 h。本研究依据《海洋调查规范》^[13-14]对各站位拖网渔获物中的蓝圆鲈进行随机取样, 取 30 尾, 经冰鲜冷冻后运至实验室内按照海洋调查规范进行生物学测定, 记录叉长(mm)、全长(mm)、体重(g)、纯重(g)、性别等生物学信息。其中, 长度和重量分别精确到 1.0 mm 和 0.1 g。本研究取样蓝圆鲈 1134 尾, 其中春季 210 尾, 夏季 748 尾, 秋季 176 尾, 冬季没有捕捞到蓝圆鲈样本(表 1), 雄性 103 尾, 雌性 275 尾, 其余的 756 尾雌雄不分。

本研究每个调查站位使用 CTD 温盐深仪测

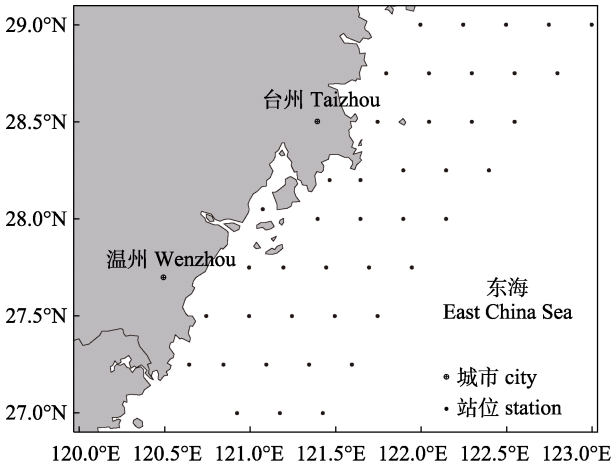


图 1 浙江南部海域渔业资源调查站点
Fig. 1 Trawl stations of fisheries resources survey in the inshore waters of southern Zhejiang

表 1 浙江南部海域蓝圆鲈不同年份
不同季节的样本数量

Tab. 1 Sample size of *Decapterus maruadsi* in different years and seasons in the inshore waters of southern Zhejiang

年份 year	冬 winter	春 spring	夏 summer	秋 autumn
2015	—	—	—	44
2016	0	64	116	32
2017	0	107	504	33
2018	0	39	128	67

定环境数据, 本文采用的环境数据为温度(表 2)。根据浙江南部海域调查中记录的取样比例估算全网渔获量并以 3 nmile/h 为基准, 标准化了全网渔获量(g/h), 获得各个航次的蓝圆鲈资源密度数据(表 3)。

表 2 浙江南部海域蓝圆鲈不同季节的
平均环境数据(温度)

Tab. 2 Average environmental data (temperature) of *Decapterus maruadsi* in different seasons in the inshore waters of southern Zhejiang

季节 season	平均水温 average temperature	最小值 minimum	最大值 maximum	标准差 standard deviation
春 spring	21.24	11.40	25.20	3.74
夏 summer	28.79	23.10	33.60	1.53
秋 autumn	21.31	18.60	23.60	1.31

表 3 浙江南部海域蓝圆鲈不同年份
不同季节的资源密度

Tab. 3 Abundance index of *Decapterus maruadsi* in different years and seasons in the inshore waters of southern Zhejiang

年份 year	春 spring	夏 summer	秋 autumn
2015			8833
2016	1952	8448	2725
2017	13553	33584	3588
2018	5850	9559	7526

1.2 生长特征及其异质性研究

蓝圆鲈的叉长-体重关系用幂函数关系式来表示^[15]: $W=aL^b$ 。式中 L 是个体的叉长, W 是相对应的体重。参数 a 为生长因子, 与环境条件有关。参数 b 是幂指数系数, 当 $b=3$ 时, 表示该鱼类为等速生长的鱼类, 其体形随个体生长按比例放大,

其 3 个线度(长、宽、高)方向生长的速度相等^[16]; 当 $b < 3$ 时, 为负异速增长, 叉长的增长快于体重的增加; 当 $b > 3$ 时, 为正异速增长, 体重的增加快于叉长的增长^[17]。

线性混合效应模型(linear mixed-effects model, LMEM)是一般线性模型的扩展, 指在模型中固定和随机效应与因变量呈线性关系, 其表达式为:

$$Y = \beta X + Z\delta + \varepsilon \quad (1)$$

式中, Y 是响应向量, X 是已知的协变量矩阵, β 是未知的全局参数向量(固定效应), Z 是随机效应的设计矩阵, ε 为误差向量^[18]。

本文使用线性混合效应模型来描述蓝圆鲈的叉长-体重关系和时间性别差异, 将性别、季节和年份的影响作为参数 a 的随机效应, 7 个 LMEM 模型涵盖了性别、季节和年份不同组合(单因子、双因子和三个因子)的随机效应。根据环境因素、资源密度等数据, 简要比较分析其与生长差异的关系。通过 R 软件的“lme4”、“Matrix”、“nlme”程序包构建模型进行分析^[19-21]。

模型拟合效果一般使用赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)、均方根误差(root mean square error, RMSE)等指标来衡量^[22]。AIC 常用来判断模型拟合的效果, AIC 的值越小, 则模型的拟合效果越好, 其公式为:

$$AIC = (2k - 2M) / n \quad (2)$$

式中, n 为样本量, k 为拟合模型中参数的数量, M 为对数似然值^[22]。RMSE 常用作拟合模型的评价指标。RMSE 对离散程度比较敏感, 可以衡量观测值与真实值之间的偏差, RMSE 越小, 模型的拟合效果越好。

1.3 自然死亡特征

自然死亡系数 M 是鱼类最重要的生活史参数之一, 直接关系到种群的动态变化, 是渔业资源评估中不可或缺的重要参数。国际上计算自然死亡系数的方法多为经验公式法, 本文运用“Pauly”^[23]、“Pauly update”^[24]、“Jensen”^[25]、“Hoenig”^[26]和“Lorenzen”^[27]方法对蓝圆鲈的自然死亡系数进行了简单的分析。大部分方法都需要基于现有的生长参数, 如最大年龄($A_{\max}$)、渐进体长(L_{∞})和生长系数(K)等(表 4)。因此本文查找了相关文献中关

于蓝圆鲈各项生长参数的研究结果(表 4), 并依据不同的经验公式求解了蓝圆鲈的自然死亡系数。

表 4 不同海域蓝圆鲈种群参数

Tab. 4 Population parameters of *Decapterus maruads* in different waters

区域 area	K	L_{∞}	$A_{\max}$	T	文献来源 reference
南海 South China Sea	0.360	33.1	5	25.3	[9]
东海 East China Sea	0.264	35.2	5	—	[28]
东海 East China Sea	0.240	34.0	—	—	[29]
东海 East China Sea	0.276	36.1	—	—	[30]
南海 South China Sea	0.500	23.9	—	26.2	[3]

注: L_{∞} : 渐进体长(cm); K : von Bertalanffy 方程中的生长系数; T : 指环境温度($^{\circ}\text{C}$); $A_{\max}$: 最大年龄(寿命)。

Note: L_{∞} : asymptotic length (cm); K : body growth rate parameter of von Bertalanffy growth curve; T : mean environmental temperature ($^{\circ}\text{C}$); $A_{\max}$: maximum observed age (longevity).

“Pauly”经验公式应用广泛, 在数据精确的情况下能够很好反映自然死亡系数^[24], 但不能用来估算甲壳类、头足类等非鱼类生物的自然死亡系数^[31]。2015 年经过更新和整改, 大量数据表明温度并不是估算自然死亡系数的有效变量, 从而推出了“Pauly update”经验公式^[24]。Jensen^[25]测定了 Beverton-Holt 生活史恒等式中的常数值, 提出可利用 von Bertalanffy 生长系数 K 值来估算自然死亡系数。“Hoenig”经验公式在假定捕捞死亡系数为 0 的情况下经过多种数据的整合得出的^[26]。而 Lorenzen (1996)方法^[27]则基于鱼体平均重量 $W_{\text{wet}}(\text{g})$ 计算自然死亡系数, 其公式为:

$$M = 3 \times W_{\text{wet}}^{-0.288} \quad (3)$$

式中, W_{wet} 为平均叉长对应的体重(g), 由叉长-体重关系求得。本文根据不同年份、不同季节和不同性别的个体重量, 求解了自然死亡系数的异质性。

2 结果与分析

在采集的 1134 尾蓝圆鲈中, 实测叉长范围为 45.0~247.0 mm, 优势叉长组为 124.0~128.1 mm, 占总数的 8.73% (表 5)。秋季采集的蓝圆鲈个体叉长最大, 其次是夏季, 春季调查到的蓝圆鲈叉长最小。从不同年份来看, 2018 年采集的蓝圆鲈叉长最大, 其次是 2016 年, 2017 年调查到的蓝圆鲈个体叉长最小(图 2、图 3)。

表 5 浙江南部海域蓝圆鲈叉长分布
Tab. 5 Fork length distribution of *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

变量 variable	最小值 minimum	最大值 maximum	平均值 mean
总体 total	45.0	247.0	126.1
雄性 male	82.0	220.0	148.4
雌性 female	76.0	247.0	149.2

实测的体重范围为 0.7~206.6 g, 优势体重为 27.4~30.7 g, 占总数的 7.76% (表 6)。秋季采集的蓝圆鲈个体体重最大, 其次是夏季, 春季调查到的蓝圆鲈体重最小。从不同年份来看, 2018 年采集的蓝圆鲈体重最大, 其次是 2016 年, 2017 年的蓝圆鲈个体体重最小(图 4、图 5)。

用 GLM 对浙江南部海域蓝圆鲈的叉长-体重关系进行分析, 得出参数 b 的值为 3.17, 表明浙

江南部海域蓝圆鲈为正异速生长, 蓝圆鲈叉长的增长快于体重的增加。由此得出叉长与体重的关系式为:

$$W = 5.01 \times 10^{-6} L^{3.17}$$

利用赤池信息准则比较 8 个模型的拟合程度, LMEM (G.Y.S.)模型拟合效果最好(表 7), 即同时具有季节、性别和年份随机效应的线性混合效应模型对蓝圆鲈叉长-体重关系的拟合效果最好。在 LMEM (G.Y.S.)模型中, 从不同季节来看, a 值在秋季最大, 其次是春季, 而夏季最小。从不同年份来看, a 值在 2018 年最大, 其次是 2015 年和 2016 年, 而 2017 年最小。从不同性别来看, 雄性和雌性的差异不明显。 a 值的年份、季节和性别差异范围分别为 0.27×10^{-6} 、 0.32×10^{-6} 和 0.21×10^{-6} , 说明季节的差异比性别和年份的大(表 8)。

叉长 200 mm 以下的蓝圆鲈中, 其叉长-体重

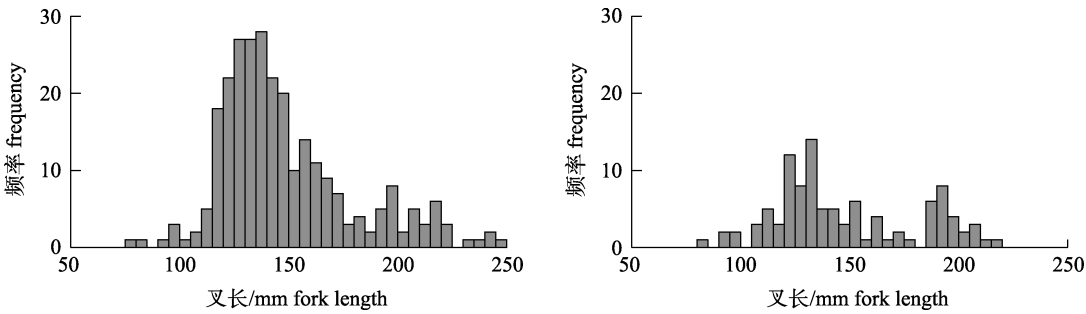


图 2 浙江南部海域蓝圆鲈雌性(左)、雄性(右)叉长频率分布
Fig. 2 Fork length distribution of female (left) and male (right) *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

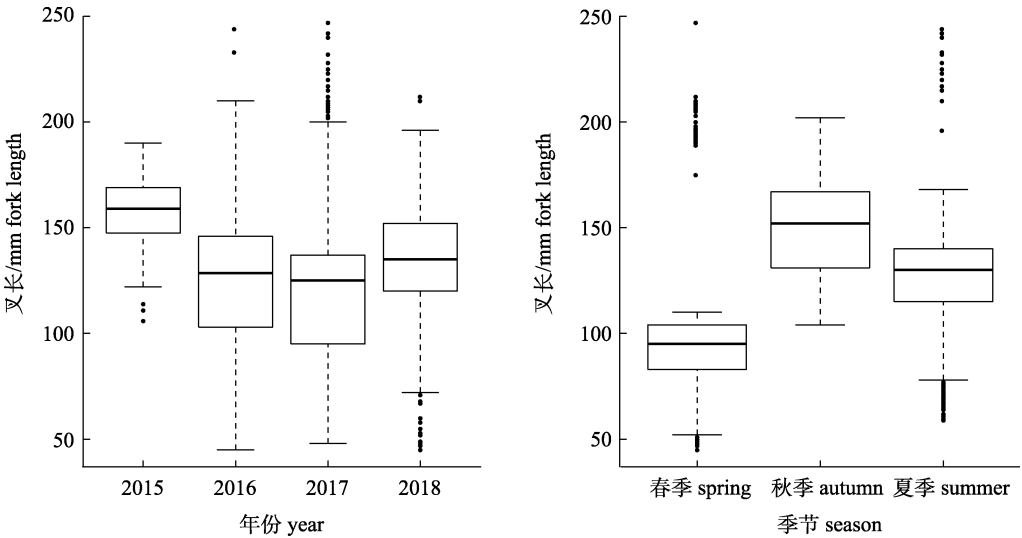


图 3 浙江南部海域不同年份不同季节蓝圆鲈叉长分布
Fig. 3 Variations with years and seasons of fork length of *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

表 6 浙江南部海域蓝圆鲈体重分布
Tab. 6 Body weight distribution of *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

变量 variable	最小值 minimum	最大值 maximum	平均值 mean
总体 total	0.7	206.6	29.1
雄性 male	6.0	139.0	46.0
雌性 female	4.0	206.6	46.1

关系的性别、季节和年份的差异较小; 对于叉长大于 200 mm 的蓝圆鲈, 季节和年份的差异相对较大。蓝圆鲈体重随叉长的增长率在秋季较大, 而在春季和夏季十分相似。在本研究的调查年份里, 蓝圆鲈体重随叉长的增长率都十分相似, 但在 2018 年体重随叉长的增长率最大。雌性和雄性的体重增长率几乎重合, 与雌雄不分的体重增长

率差异相对较大(图 7)。
本文求解了在不同海域和年份使用不同方法计算的蓝圆鲈自然死亡系数(表 10)。运用 Lorenzen 方法求得不同年份的自然死亡系数(表 9)。2015—2018 年自然死亡系数为 1.22。不同经验公式计算自然死亡系数(0.36~1.41)差异较大, 其中 Lorenzen 方法估算自然死亡系数平均值(1.16)、中位数(1.18)差异较小, 标准差为 0.13。自然死亡系数几乎没有性别差异, 年份季节的差异较大(表 9)。

3 讨论

本文运用叉长-体重关系式($W=aL^b$)求得参数 a 为 5.01×10^{-6} , 参数 b 为 3.17。叉长-体重关系中的参数是鱼类生长状况量化分析的结果, 它们在一定程度上反映了鱼类种群的生长状态^[32]。本研究

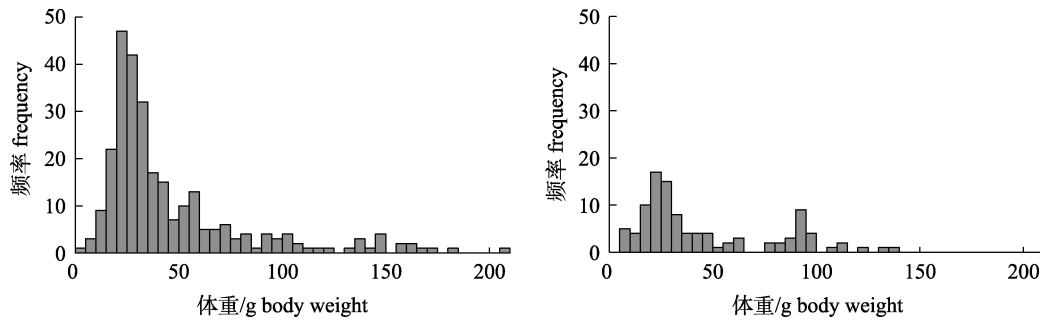


图 4 浙江南部海域蓝圆鲈雌性(左)、雄性(右)体重频率分布
Fig. 4 Weight distribution of female (left) and male (right) *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

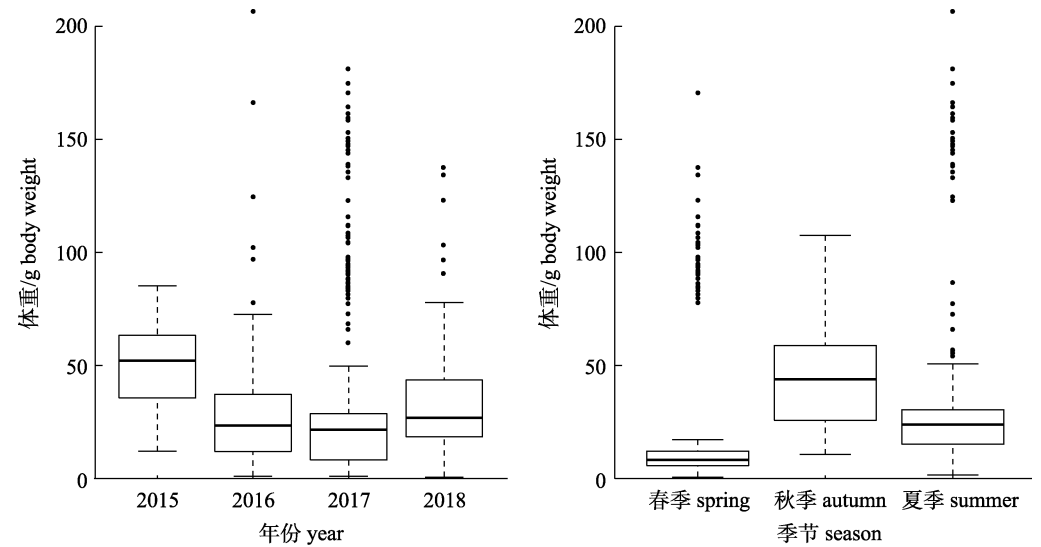


图 5 浙江南部海域蓝圆鲈不同季节和年份的体重分布
Fig. 5 Variations with years and seasons of weight of *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

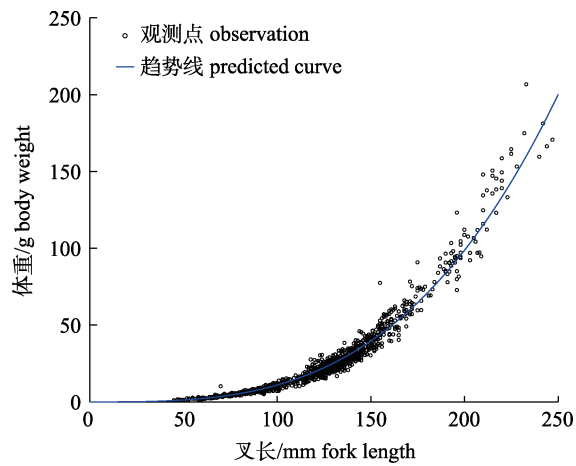


图 6 浙江南部海域蓝圆鲹叉长-体重关系图
Fig. 6 Length-weight relationship of *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

运用混合效应模型研究蓝圆鲹叉长-体重关系的季节、年份和性别差异发现, 季节与年份的异质性较为显著, 性别异质性不显著。在相同叉长情况下, 2018 年秋季体重最大, 2017 年夏季体重最小。

对 1971—1987 年的蓝圆鲹体长-体重关系的参数进行对比发现, 在东海范围内, 参数 a 的变化范围比较大($1.652\times10^{-6}\sim1.062\times10^{-5}$), 而参数 b 的变化比较小, 在 2.947~3.1845 之间, 为异速增长。本文求得的参数 a 为 5.01×10^{-6} , 参数 b 为 3.17, 在文献研究结果的波动范围之内。

表 7 浙江南部海域蓝圆鲹叉长体重关系的拟合模型及其评价指标

Tab. 7 Alternative models and their AIC and root mean squared error (RMSE) for length-weight relationships of *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

模型缩写 model abbreviations	模型 model	AIC	RMSE/ %
GLM	$W=aL^b$	-564.19	18.82
S.	$W=[a\times\exp(\text{ReS})]L^b$	-575.86	18.63
G.	$W=[a\times\exp(\text{ReG})]L^b$	-566.80	18.73
Y.	$W=[a\times\exp(\text{ReY})]L^b$	-574.61	18.64
S.G.	$W=[a\times\exp(\text{ReS.G})]L^b$	-578.15	18.56
S.Y.	$W=[a\times\exp(\text{ReS.Y})]L^b$	-580.32	18.53
G.Y.	$W=[a\times\exp(\text{ReG.Y})]L^b$	-578.44	18.54
G.Y.S.	$W=[a\times\exp(\text{ReG.Y.S})]L^b$	-582.74	18.46

注: S、G、Y 分别为 $\ln a$ 的季节、性别和年份的随机效应。
Note: The first column shows the abbreviations of models detailed in the second and third columns. S., G., Y., S.G., S.Y., G.Y., G.Y.S. indicate random effects on $\ln a$ from seasons, genders, years, seasons and genders, seasons and years, genders and years, and from seasons and years and genders, respectively.

根据线性混合效应模型的结果, 同时具有季节、性别和年份差异的模型拟合效果最好。不同异质性来源求得的 a 值范围为 $6.15\times10^{-6}\sim6.47\times10^{-6}$, 与文献中东海海域蓝圆鲹的研究结果相符 (表 11)。本研究估计的 a 值比较稳定, 变化幅度为 0.32×10^{-6} , 这可能是近几年环境条件没有剧烈

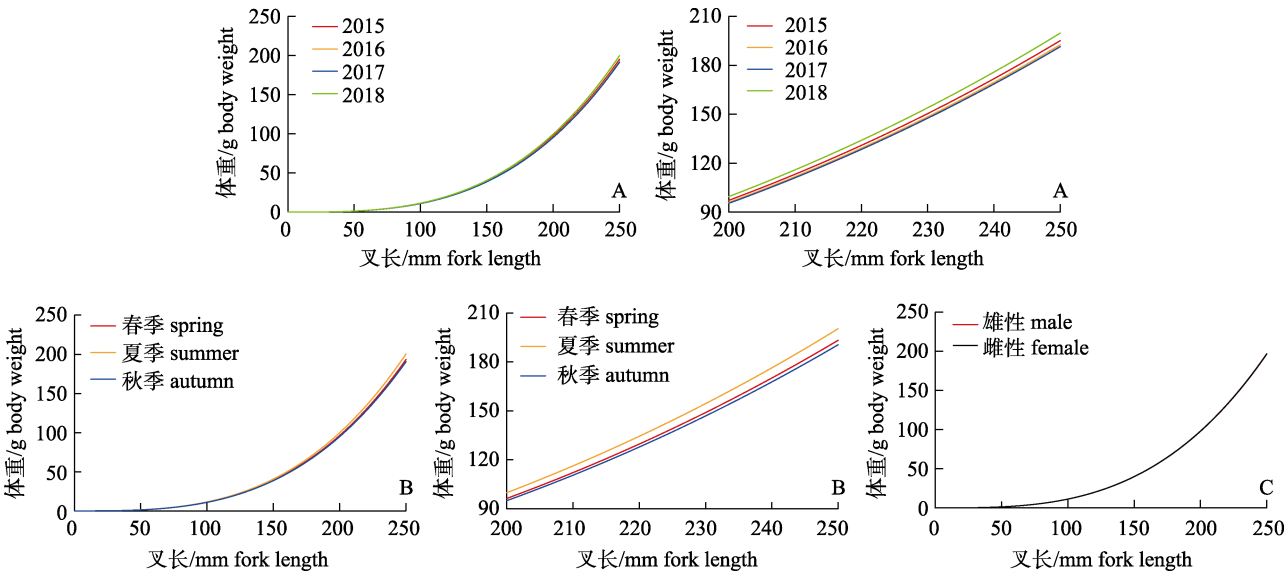


图 7 浙江南部海域蓝圆鲹不同年份(A)、季节(B)和性别(C)的叉长-体重关系差异
Fig. 7 Variations with years (A), seasons (B) and genders (C) of length-weight relationships for *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

表 8 浙江南部海域蓝圆鲈最优线性混合效应模型 (包含年份、季节和性别随机效应) 中参数 a 的估计值
Tab. 8 Estimates of parameter a in the linear mixed effect model (including random effects from year, season and sex) for *Decapterus maruads* in the inshore waters of southern Zhejiang

影响因子 effect		参数 a 的估计值 estimate of parameter a
年份 year	2015	6.30×10^{-6}
	2016	6.22×10^{-6}
	2017	6.18×10^{-6}
	2018	6.45×10^{-6}
季节 year	春季 spring	6.24×10^{-6}
	秋季 autumn	6.47×10^{-6}
	夏季 summer	6.15×10^{-6}
性别 gender	雌雄不分 unidentified	6.15×10^{-6}
	雄性 female	6.36×10^{-6}
	雌性 male	6.35×10^{-6}

表 9 浙江南部海域蓝圆鲈不同年份、季节和性别的平均体重和采用 Lorenzen (1996) 方法估算的自然死亡系数
Tab. 9 Average body weight of *Decapterus maruads* in different years, seasons and genders in the inshore waters of southern Zhejiang and the natural mortality estimated by Lorenzen (1996) method

变量因子 variable		平均叉长/ mm mean fork length	平均体重/g mean body weight	自然死亡 系数 natural mor- tality
年份 year	2015	155.18	44.14	1.01
	2016	126.33	22.99	1.22
	2017	122.10	20.64	1.26
	2018	131.19	25.92	1.18
季节 season	春季 spring	107.35	13.72	1.41
	夏季 summer	125.77	22.67	1.22
	秋季 autumn	149.54	39.25	1.04
性别 gender	雌性 female	149.17	38.94	1.05
	雄性 male	148.42	38.32	1.05

表 10 基于不同公式的不同海域蓝圆鲈自然死亡系数计算结果

Tab. 10 The natural mortality estimates for *Decapterus maruads* using different approaches in different areas

公式名称 formula name	经验公式 empirical formula	东海 East China Sea			南海 South China Sea	
		1982—1983 ^[29]	1984 ^[28]	1980—1983 ^[30]	1997—1999 ^[9]	2011—2012 ^[3]
Pauly ^[23]	$M=0.9849L_{\infty}^{-0.279}K^{0.6543}T^{0.4634}$				0.85	0.62
Pauly update ^[24]	$M=4.118L_{\infty}^{-0.33}K^{0.73}$	0.45	0.48	0.49	0.62	0.87
Jensen ^[25]	$M=1.5K$	0.36	0.40	0.41	0.54	0.75
Hoenig ^[26]	$M=4.3/A_{\max}$		0.86		0.86	

注: L_{∞} : 渐近体长(cm); K : von Bertalanffy 方程中的生长系数; T : 指环境温度(℃); $A_{\max}$: 最大观测年龄(寿命).
Note: L_{∞} : asymptotic length (cm); K : body growth rate parameter of von Bertalanffy growth curve; T : mean environmental temperature (℃); $A_{\max}$: observed maximum age (longevity).

表 11 不同年份、不同海域蓝圆鲈的叉长-体重关系参数 a 与参数 b 的值

Tab. 11 The values of the parameters a and b in length-weight relationships of *Decapterus maruads* in different years and different areas

研究地点 area		采样时间 year	a	b	文献来源 reference
闽南、台湾浅滩 the south-Fujian coast and Taiwan bank		1971—1980	8.695×10^{-6}	3.0837	[10]
闽南、台湾浅滩 the south-Fujian coast and Taiwan bank		1981—1987	5.112×10^{-6}	3.1775	[10]
浙江海域 Zhejiang offshore waters		1980—1983	1.652×10^{-6}	2.9470	[30]
闽南、台湾浅滩 the south-Fujian coast and Taiwan bank		1982—1983	4.447×10^{-6}	3.1845	[29]
闽中、闽东渔场 central Fujian and east-Fujian fishing ground		1984	1.062×10^{-5}	3.0293	[28]

变化的结果。在相同叉长条件下, a 的值越大, 体重越大。2018 年秋季蓝圆鲈的体重最大, 2017 年夏季体重最小, 这在一定程度上反映了 2018 年秋季蓝圆鲈的生长环境要优于 2017 年夏季。浙江南部海域是蓝圆鲈的产卵场, 产卵的最适温度是

15~22 ℃, 以 16~18 ℃最佳^[33]。根据浙江南部海域环境调查数据, 2018 年秋季的平均水温约为 20 ℃, 2017 年夏季平均水温约为 28 ℃, 2018 年秋季的水温更适合蓝圆鲈的产卵, 此时体型较大, 所以参数 a 的值较大。

在混合效应模型中,固定效应能够反映总体特点,随机效应能够反映不同数据来源的影响,能够把季节、性别、年份产生的差异体现出来。同时具有季节、性别、年份差异的模型拟合效果最优,能够分别把季节、性别和年份的差异体现出来。目前,混合效应模型在渔业生物学异质性研究方面的应用广泛,袁思剑等^[34]运用 2016—2017 年山东近海的底拖网调查数据研究了黄鮟鱇的体长体重关系时空异质性;Ma 等^[35]运用 2008 年和 2011—2015 年黄渤海采集的数据对小黄鱼的生长和饱满度等的时空异质性进行了研究;刘尊雷等^[36]运用 2008—2010 年的双拖网数据对小黄鱼体长体重关系空间异质性研究;Braccini 等^[37]运用混合效应模型量化捕捞功率趋势。颜尤明等^[28]提出,生存环境的差异,捕捞压力等可能是造成蓝圆鲈生长差异的原因。众多研究表明,饵料基础与生活环境的差异与生长异质性密切相关^[16,32],资源密度与水温条件是影响生长环境因子(a 值)的重要变量。资源密度与水温条件的变化会造成生长差异。

水温是鱼类生长中重要的环境因子,邓吉河^[38]认为水温直接或间接影响鱼类生长,在适宜温度内,水温升高时性腺及胚胎发育速度加快;龙华^[39]认为鱼类的繁殖水温是一定的,在适宜温度内,亲鱼的生长发育速度随温度升高而增加。根据浙江南部海域环境调查数据,2018 年秋季的水温更适合蓝圆鲈繁殖。耿平等^[3]认为经过大强度的捕捞后,蓝圆鲈的体长变化较为明显。浙江南部海域是蓝圆鲈重要的产卵场,春汛以产卵个体为主,夏秋季产卵后在浙江近海索饵;禁渔期为 5—9 月,期间蓝圆鲈资源补充充足,禁渔期结束后,捕捞努力量大大增加,所以夏季资源密度一般高于秋季(表 3)。蓝圆鲈摄食强度秋季和夏季相对较高^[40],2017 年夏季资源密度远大于其他季节,生长差异可能是因为蓝圆鲈资源密度较大,种群内部竞争加剧,饵料食物相对不充分,生长环境相对较差造成的。

本研究中蓝圆鲈自然死亡系数的范围为 0.36~1.41,差异较大。耿平等^[3]采用“Pauly”经验公式以 2011—2012 年底拖网数据估算北部湾蓝圆鲈群体

自然死亡系数为 0.62,相比徐旭才等^[10]采用“Pauly”经验公式以 1971—1987 年闽南-台湾浅滩叉长数据估算结果(0.63、0.49)差异不大;相比陈国宝等^[9]采用“Pauly”经验公式以 1997—1999 年南海北部陆架底拖网数据估算蓝圆鲈自然死亡系数(0.85)差异不显著。

生长参数的数量与准确程度直接影响死亡系数估算结果的准确性和偏差^[8]。本文通过 Lorenzen 方法粗略估算自然死亡系数,计算结果明显偏大,不确定性较高。可能由于过度捕捞,样品中幼鱼比重较大,平均体重偏小,自然死亡系数计算结果偏大。分布在沿海海域的蓝圆鲈幼鱼一般多于外海,平均体重较小,这可能也是造成自然死亡系数结果偏大的原因。2015 年仅秋季样本,平均体重最大,自然死亡系数最低。影响自然死亡系数的估算的因素较多。用“Hoenig”方法求得的自然死亡系数是较高的,这个可能是蓝圆鲈最大观测年龄数据的不确定性造成的。“Pauly”和“Pauly update”经验公式估算需要生活史参数较多,其中 K 值越精确,自然死亡系数估计值更加合理^[41],同时温度对“Pauly”经验公式的影响较大,温度越高,自然死亡系数较大^[8]。另外,个体小、寿命短的热带亚热带鱼类采用“Pauly”经验公式较合适^[42]。“Jensen”方法仅需要一个生活史参数 K ,对 von Bertalanffy 中 K 值的准确性要求更高。“Hoenig”方法更加适合具有较大样本的情形^[41]。耿平等^[3]、陈国宝等^[9]、徐旭才等^[10]的研究采用“Pauly”经验公式估算蓝圆鲈自然死亡系数;徐海龙等^[43]运用“Pauly update”方法对中国明对虾的自然死亡率进行过估算;Al-Beak 等^[44]运用“Jensen”方法对沙重牙鲷(*Diplodus sargus*)计算自然死亡率;冯波等^[42]运用“Hoenig”方法估算了二长棘鲷(*Parargyrops edita*)的自然死亡率。虽然以上求解自然死亡的经验公式应用比较广泛,但缺少针对性,且对各参数的准确性要求较高,将来的研究中会实地测量浙江南部近海蓝圆鲈的各项生长参数,提高其自然死亡系数求解的准确性。

本文的研究更全面地分析蓝圆鲈的生长特征异质性和自然死亡特征,有助于准确理解其生活史特征,进而为该重要鱼类——蓝圆鲈的种群特

征分析、资源评估和渔业管理提供参考资料和科学依据。同时, 本研究还存在许多不足之处, 仅仅考虑季节、年份和性别这三个要素对叉长-体重关系的影响, 并没有考虑不同站位或者海域等空间要素、环境要素的影响; 样本量不足对研究结果也产生一定影响。

致谢: 感谢渔业资源和生态系统量化评估与管理研究室、浙江省海洋水产养殖研究所的老师和同学在样品采集和生物学分析中的工作和帮助, 感谢韩东燕老师、戴黎斌师兄、林琴琴师姐对论文修改提出的宝贵建议。

参考文献:

- [1] Dai J G, Chen Z Z, Huang Z R, et al. Otolith morphology of *Decapterus maruadsi* in the continental shelf of northern South China Sea[J]. Journal of Applied Oceanography, 2017, 36(3): 417-426. [戴嘉格, 陈作志, 黄梓荣, 等. 南海北部陆架区蓝圆鲈矢耳石形态特征分析[J]. 应用海洋学学报, 2017, 36(3): 417-426.]
- [2] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China Fishery Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 39. [中华人民共和国农业部. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 39]
- [3] Geng P, Zhang K, Chen Z Z, et al. Interannual change in biological traits and exploitation rate of *Decapterus maruadsi* in Beibu Gulf[J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(6): 1-9. [耿平, 张魁, 陈作志, 等. 北部湾蓝圆鲈生物学特征及开发状态的年际变化[J]. 南方水产科学, 2018, 14(6): 1-9.]
- [4] Xu H L, Han Y, Gu D X, et al. Methods of estimated natural mortality in fishery resources assessment[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2019, 46(3): 160-164, 171. [徐海龙, 韩颖, 谷德贤, 等. 渔业资源自然死亡估算方法研究进展[J]. 水产科技情报, 2019, 46(3): 160-164, 171.]
- [5] Anderson K H, Jacobsen N S, Farnsworth K D. The theoretical foundations for size spectrum models of fish community[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2015, 73(4): 575-588.
- [6] Wootton R J. The evolution of life histories: Theory and analysis[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 1993, 3(4): 384-385.
- [7] Hewitt D A, Hoenig J M. Comparison of two approaches for estimating natural mortality based on longe[J]. Fishery Bulletin, 2005, 103(2): 433-437
- [8] Geng P, Zhang K, Xu S N, et al. Assessment of natural mortality coefficients in fish stocks: a review[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(3): 694-704. [耿平, 张魁, 徐姗姗, 等. 鱼类自然死亡系数评估研究进展[J]. 中国水产科学, 2018, 25(3): 694-704.]
- [9] Chen G B, Qiu Y S. Study on growth, mortality and reasonable utilization of *Decapterus maruadsi* in northern continental shelf waters of South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22(4): 457-464. [陈国宝, 邱永松. 南海北部陆架区蓝圆鲈的生长、死亡及合理利用研究[J]. 台湾海峡, 2003, 22(4): 457-464.]
- [10] Xu X C, Qiu S Y, Lu Z B, et al. Stock assessment of *Decapterus maruadsi* along the south-Fujian coast and Taiwan bank using length cohort analysis[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(5): 511-516. [徐旭才, 丘书院, 卢振彬, 等. 闽南-台湾浅滩渔场蓝圆鲈资源的评估[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(5): 511-516.]
- [11] Sun C, Wang W, Liu F T, et al. Spatial-temporal simulation of PM2.5 concentration in Hebei Province based on linear mixed effects Model[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(9): 1500-1509. [孙成, 王卫, 刘方田, 等. 基于线性混合效应模型的河北省 PM(2.5)浓度时空变化模型研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9): 1500-1509.]
- [12] Liu X, Zeng S Q, He D B, et al. Growth and yield model of oak forest based on mixed effect[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(5): 475-482. [刘洵, 曾思齐, 贺东北, 等. 基于混合效应的湖南省栎林生长收获模型[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(5): 475-482.]
- [13] Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. GB/T 12763.6-2007 Specifications for oceanographic survey-Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2007. [国家海洋局第三海洋研究所. 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.]
- [14] The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB17378.3-1998 The specification for marine monitoring-Part 3: Sample collection, storage and transportation[S]. Beijing: China Standards Press, 1998. [国家质量技术监督局. GB 17378.3-1998 海洋监测规范第 3 部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.]
- [15] Gao C X, Ma Q Y, Tian S Q, et al. Growth, mortality and yield per recruitment of small yellow croaker in offshore waters of southern Zhejiang[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(5): 925-937. [高春霞, 麻秋云, 田思泉, 等. 浙江南部近海小黄鱼生长、死亡和单位补充量渔获量[J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 925-937.]
- [16] 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.]

- [17] Li Z L. Interannual changes in biological characteristics of small yellow croaker *Larimichthys polyactis*, Pacific cod *Gadus macrocephalus* and anglerfish *Lophius litulon* in the Bohai Sea and Yellow Sea[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011: 1. [李忠炉. 黄渤海小黄鱼、大头鳕和黄鲛种群生物学特征的年际变化[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011: 1.]
- [18] Sun H M. Mixed effect prediction of linear and generalized linear mixed model and their applications[D]. Jinan: Shandong University, 2018: 3. [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: 3]
- [19] Bates D M, Mächler M, Bolker B, et al. Fitting linear mixed-effects models using lme4[J]. Journal of Statistical Software, 2015, 67(1): 1-48.
- [20] Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, et al. Linear and Nonlinear Mixed Effects Models [EB]. R package version 3.1-140. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- [21] Bates D, Maechler, M. Matrix: Sparse and Dense Matrix Classes and Methods [EB]. R package version 1.2-17. <https://CRAN.R-project.org/package=Matrix>.
- [22] Zhang Y. Research and application of model selection method based on information criterions[D]. Jinan: Shandong University of Technology, 2017: 3. [张艳. 基于信息准则的模型选择方法的研究及应用[D]. 济南: 山东理工大学, 2017: 3.]
- [23] 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.
- [24] Then A Y, Hoenig J M, Hall N G, et al. Evaluating the predictive performance of empirical estimators of natural mortality rate using information on over 200 fish species[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(1): 82-92.
- [25] Jensen A L. Beverton and Holt life history invariants result from optimal trade-off of reproduction and survival[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1996, 53(4): 820-822.
- [26] Hoenig J M. Empirical use of longevity data to estimate mortality rates[J]. Fishery Bulletin, 1983, 82(4): 898-903.
- [27] Lorenzen K. The relationship between body weight and natural mortality in juvenile and adult fish: a comparison of natural ecosystems and aquaculture[J]. Journal of Fish Biology, 1996, 49(4): 627-642.
- [28] Yan Y M, Lu Z B, Dai Q S. Growth pattern of round scad, *Decapterus maruadsi* in the south and middle of Fujian [J]. Chinese Journal of Zoology, 1987, 22(5): 6-11. [颜尤明, 卢振彬, 戴泉水. 闽中、闽东渔场蓝圆鲹生长特性的研究[J]. 动物学杂志, 1987, 22(5): 6-11.]
- [29] Zhang J, Zhang Q Y. The population age structure and its growth pattern of round scad, *Decapterus maruadsi* in the south Fujian and Taiwan bank fishing ground[J]. Journal of Oceanography In Taiwan Strait, 1985, 4(2): 209-218. [张杰, 张其永. 闽南-台湾浅滩渔场蓝圆鲹种群的年龄结构和生长特性[J]. 台湾海峡, 1985, 4(2): 209-218.]
- [30] Zhu D L, Bo Z L, Zhou W X. The age and growth of round scad of Zhejiang offshore waters [J]. Journal of Fisheries of China, 1987, 11(3): 215-223. [朱德林, 薄治礼, 周婉霞. 浙江海域蓝圆鲹年龄和生长的研究[J]. 水产学报, 1987, 11(3): 215-223.]
- [31] Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 111. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 111.]
- [32] Guo J H. Research on growth characteristic and resource dynamic of four dominant fishes in the Min River Estuary, East China Sea[D]. Jimei: Jimei University, 2019: 2. [郭峻宏. 闽江口四种优势鱼类的生长特性及资源动态研究[D]. 集美: 集美大学, 2019: 2]
- [33] Huang K Q. *Decapterus maruadsi*[J]. Marine Fisheries, 1984, 6(3): 108. [黄克勤. 蓝圆鲹[J]. 海洋渔业, 1984, 6(3): 108.]
- [34] Zhong S J, Ma Q Y, Ren Y P, et al. Linear mixed-effects models for estimating spatiotemporal variations of length-weight relationships for *Lophius litulon*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 25(6): 1299-1307. [衷思剑, 麻秋云, 任一平, 等. 基于线性混合效应模型的黄鲛体长体重关系的时空差异[J]. 中国水产科学, 2018, 25(6): 1299-1307.]
- [35] Ma Q Y, Yan J, 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, 2(2): e0171811.
- [36] Liu Z L, Yuan X W, Yan L P, et al. Spatial heterogeneity in body condition of small yellow croaker in Yellow Sea and East China Sea based on mixed-effects model and quantile regression analysis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2631-2642. [刘尊雷, 袁兴伟, 严利平, 等. 应用混合模型和分位数回归分析东黄海小黄鱼肥满度空间异质性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2631-2642.]
- [37] Braccini J M, O'Neill M F, Campbell A B, et al. Fishing power and standardized catch rates: Implications of missing vessel-characteristic data from the Australian eastern king prawn (*Melicertus plebejus*) fishery[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2012, 69(5): 797-809.
- [38] Deng J H. On the relationship between water temperature and fish[J]. Fisheries of Heilongjiang, 2019, 29(1): 25-27. [邓吉河. 浅谈水温与鱼类的关系[J]. 黑龙江水产, 2019, 29(1): 25-27.]
- [39] Long H. The effect of temperature on fish survival[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005, 51(S1): 254-257. [龙华. 温度对鱼类生存的影响[J]. 中山

- 大学学报: 自然科学版, 2005, 51(S1): 254-257].
- [40] Jiang R J, Xu H X, Jin H W, et al. Feeding habits of blue mackerel scad *Decapterus maruadsi* Temminck et Schlegel in the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(2): 216-227. [蒋日进, 徐汉祥, 金海卫, 等. 东海蓝圆鲈的摄食习性[J]. 水产学报, 2012, 36(2): 216-227.]
- [41] Kenchington T J, Natural mortality estimators for information-limited fisheries[J]. Fish and Fisheries, 2014, 15(4): 533-562.
- [42] Feng B, Hou G, Lu H S, et al. Management Recommendation for *Paragyrops edita* in Beibu Gulf based on Per-recruitment Analysis[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture. 2009, 25(1): 114-119. [冯波, 侯刚, 卢伙胜, 等. 北部湾二长棘鲷资源开发保护策略研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(1): 114-119.]
- [43] Xu H L, Chen Y, Chen X J, et al. Comparison of two empirical estimates of natural mortality for Chinese shrimp[J]. Journal of Fisheries of China. 2016, 40(1): 45-54. [徐海龙, 陈勇, 陈新军, 等. 两种经验方法估算中国明对虾自然死亡的比较[J]. 水产学报, 2016, 40(1): 45-54.]
- [44] Al-Bealk A M, Ghoneim S I, Eldakar A Y, et al. Population dynamic and stock assessment of white seabream *Diplodus sargus* (Linnaeus, 1758) in the Coast of North Siani[J]. Fisheries and Aquaculture Journal, 2015, 6(4): 152.

Growth heterogeneity and natural mortality of Japanese scad in offshore waters of southern Zhejiang

CUI Mingyuan¹, CHEN Weifeng², DAI Libin¹, MA Qiuyun^{1, 3, 4, 5}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China;
3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: Japanese scad (*Decapterus maruadsi*), a warm water pelagic fish, is an important economic species in China. Based on a quarterly bottom trawl survey in offshore waters of southern Zhejiang from 2015 to 2018, this study explored the length-weight relationships, growth heterogeneity, and natural mortality of Japanese scad. A total of 1,134 individuals were measured, with fork length (L) ranging from 45.0 to 247.0 mm and body weight (W) ranging from 0.7 to 206.6 g. The length-weight relationship was revealed to be $W=5.01 \times 10^{-6} L^{3.17}$ for Japanese scad in the inshore waters of southern Zhejiang. A linear mixed effect model considering the random effects from season, gender, and year performed the best, with the lowest AIC and RMSE values. Results from the best model indicated that 1) individuals collected in the autumn tended to gain more weight than those collected in spring and summer at the same length; 2) individuals collected in 2018 grew with better condition, whereas those in 2017 and 2018 gained less weight at the same length; 3) there was no substantial differences between female and male Japanese scad. Therefore, year and season significantly influenced Japanese scad growth in the inshore waters of southern Zhejiang with the best growth condition in autumn 2018. Based on several empirical equations including Pauly, Pauly update, Jensen, Hoenig and Lorenzen methods, this study estimated the natural mortality for Japanese scad, which ranged from 0.36 to 1.41. This study exhibited that season and year significantly influenced the length-weight relationships of Japanese scad and the results could provide important information and knowledge for further study and fishery management for this important species in the coast waters of China.

Key words: *Decapterus maruadsi*; mixed effects model; length-weight relationship; natural mortality; offshore waters of southern Zhejiang

Corresponding author: MA Qiuyun. E-mail: qyma@shou.edu.cn