

DOI: 10.12264/JFSC2021-0364

东海中部日本鲭繁殖群体年龄与生长特征

周翰林^{1,2}, 严利平¹, 张辉¹, 李建生¹

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306

摘要: 根据 2021 年 3–4 月在东海中部采集的日本鲭(*Scomber japonicus*)繁殖群体样本, 通过耳石轮纹判读、生长逆算和生长方程拟合分析了其群体结构与生长特征。结果表明: 日本鲭繁殖群体中雌雄个体之间的叉长和体重关系不存在显著性差异($F=0.376$, $P=0.54>0.05$); 雌雄合计的年龄结构为 1~7 龄, 优势年龄组为 1~2 龄, 占比 73.63%; 3 龄及 3 龄以下, 雌性数量多于雄性; 3 龄以上, 雌雄数量基本相当, 但雌性缺少高龄个体。叉长与体重关系式为: $W=0.8837\times 10^{-6}FL^{3.47}$ 。线性函数关系是叉长和耳石半径关系的最优解, 其关系式为 $FL=184.09R-112.73$ 。利用 4 种模型逆算出的叉长和年龄数据来拟合 von Bertalanffy、Gompertz 和 Logistic 等 3 种生长方程并进行比较, 其中用 Dahl-Lea 模型逆算的 von Bertalanffy 方程的 AIC 值和 BIC 值均最小, 因此选择其作为最佳生长方程, 得到的 von Bertalanffy 叉长生长方程为 $FL_t=427.18[1-e^{-0.23(t+2.5)}]$; 体重生长方程为 $W_t=1187.20[1-e^{-(0.23(t+2.5))}]^{3.47}$ 。经过二阶求导, 得到拐点年龄为 2.91 龄, 对应的拐点体重和叉长分别为 365.03 g, 304.09 mm, 可以作为今后制定日本鲭开捕规格的重要参考依据。

关键词: 日本鲭; 繁殖群体; 耳石; 逆算模型; 生长方程

中图分类号: S941

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2022)04–0608–10

日本鲭(*Scomber japonicus*)广泛分布于大西洋、印度洋和太平洋亚热带、温带大陆架海域^[1], 属近海中上层洄游性鱼类。东、黄海是日本鲭的重要洄游分布区^[2], 资源蕴藏量丰富, 经济价值较高, 是中国(包括台湾省)、日本、韩国和朝鲜的共同捕捞对象。自 20 世纪 80 年代以来, 中国围网(包括灯光敷网)和中上层拖网渔业不断发展, 近海底层渔业资源持续衰退, 捕捞努力量持续增长, 东海、黄海日本鲭资源被充分开发, 渔获组成趋于小型化和低龄化, 资源呈现过度捕捞迹象^[3–4]。

东海日本鲭存在 2 个群系, 分别是东海群系和闽南—粤东地方群系, 其中以东海群系资源数量较大, 每年在生殖和越冬季节进行远距离洄游^[5]。东海中部海域是东海群系日本鲭重要的越冬场、产卵场和索饵场^[5], 是我国日本鲭捕捞产量

的主要来源地^[6]。鉴于日本鲭较高的生态功能和经济价值, 国内学者对其形态、繁殖生物学、栖息分布特征及资源评估等方面进行了较为深入的研究^[3,7–10], 但其繁殖群体的基础生物学特征, 尤其是年龄和生长特征的研究仍有待深入分析。鱼类年龄和生长的精准估计是掌握鱼类种群动态和群体结构的关键内容, 也是种群资源评估极为重要的参数。国内外学者对不同海域日本鲭的年龄生长特征做过大量研究^[11–14]。刘勇等^[11]通过耳石年轮分析了东海北部和黄海南部日本鲭的年龄和生长, 通过线性回归和非线性方法逆算日本鲭叉长, 但未充分考虑不同逆算模型的匹配度; 李纲等^[12]依据东、黄海日本鲭耳石及其出生日期判断年龄拟合生长方程, 根据出生日期校正年龄只能宏观判断日本鲭群体的产卵日期, 但易将同一年

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2021-09-10。

基金项目: 国家重点研发计划专项(2020YFD0900800); 农财专项-东海近海渔业资源调查(2021)。

作者简介: 周翰林(1994–), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业发展。E-mail: 772033211@qq.com

通信作者: 李建生, 副研究员, 研究方向为渔业资源评估与管理。E-mail: jianshengli@sina.com

出生的鱼划分到不同年龄组。本研究利用二甲苯浸泡耳石方法对日本鲭进行了年龄鉴定, 通过逆算模型进行年龄-叉长校正, 从而应用多模型推断方法准确识别日本鲭生长模式, 以期渔业资源评估和管理提供参考依据。

1 材料方法

1.1 样品来源与测定

日本鲭样品的采样时间为2021年3-4月, 采样地点分别为沙外渔场、鱼山渔场、温台渔场和温外渔场。样品采自围网及拖网船捕捞的渔获物, 采样方法为随机取样, 海上取样冷冻保存后, 在实验室进行各项生物学指标的测定。测定项目主要包括叉长(精确到1 mm)、体重(精确到0.01 g)、纯体重、性别、性腺成熟度、性腺质量、雌鱼怀卵量。根据《海洋调查规范》^[15]的标准进行性腺成熟度发育期鉴定, 以性腺发育成熟度达到Ⅲ期及以上作为日本鲭性成熟的标志。统一选择左矢耳石来鉴别年龄, 共对311尾性腺Ⅲ期及以上的日本鲭进行了年龄鉴定, 其中雌性185尾, 雄性126尾。年龄鉴定以后对61尾样品测量其轮径及耳石半径。

1.2 耳石处理与年轮判别

耳石处理的实验步骤如下: 1) 首先将取出的矢耳石用毛刷将其表面的残留物擦除干净; 2) 使用流水冲洗后干燥密封保存; 3) 读取耳石年轮数据前, 依据耳石体积的大小将干燥无异物的矢耳石放置于二甲苯溶液中浸泡10 s~1 h, 体积大的耳石浸泡时间久, 体积小的浸泡时间短; 4) 将矢耳石放在滴加甘油溶液的载玻片上, 利用OlympusSZ11显微镜的4倍目镜观察年轮。

年轮判别的关键是耳石核心的确定。主要方法是通过耳石最长轴与最短轴的交点来定位耳石核心(图1), 耳石半径是从核心点O到耳石后区边缘的长度, 即图1中R, 年轮径长度的测量也是以最长轴与各年轮的交点为准, 即图1中的 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 。每一个耳石均由2人独立判读并计数, 若判读一致则认为年龄判断准确; 若不一致, 则重新判读并讨论结果。

日本鲭的年轮由1条冬轮和1条夏轮组成。

经过二甲苯浸泡后, 因为采用的是反射光源, 因此耳石上的冬轮呈现半透明状, 夏轮依然呈现乳白色, 黑箭头指向冬轮, 白箭头指向夏轮(图2)。

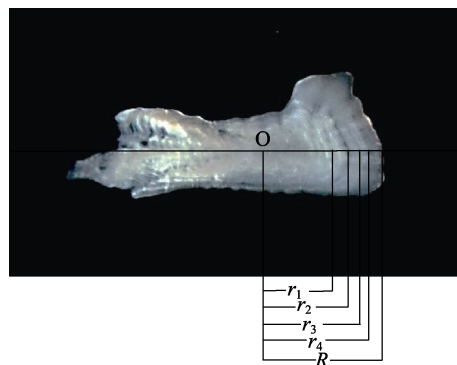


图1 日本鲭耳石测量示意图

Fig. 1 Measure schematic diagram of *Scomber japonicus* otoliths

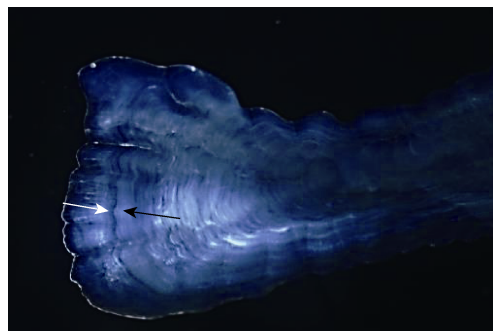


图2 日本鲭耳石年轮判别示意图
箭头示年轮。

Fig. 2 Schematic diagram of annual rings discrimination of *Scomber japonicus* otolith
Arrows mean annual rings.

1.3 数据分析

使用幂函数拟合日本鲭叉长—体重的关系, 关系式如下:

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

式(1)中, W 为体重(g), FL 为实测叉长(mm), a 、 b 为参数。

分别通过线性方程、幂函数方程和指数函数方程拟合叉长与耳石半径的关系式, 其表达式为:

$$\text{线性关系: } FL = a_1 + b_1 \times R \quad (2)$$

$$\text{幂函数关系: } FL = a_2 \times R^{b_2} \quad (3)$$

$$\text{指数函数关系: } FL = a_3 \times e^{b_3 R} \quad (4)$$

式中, R 为耳石半径, 即耳石中心至耳石后区中点的直线距离, 耳石半径和年轮径在同一直线

上测量; a_1 、 a_2 、 b_2 、 a_3 、 b_3 为回归系数; b_1 为方程截距。

选用赤池信息量标准(AIC)对 3 种叉长与耳石半径模型结果进行检验, 以寻求最合适的模型, 可简化表达式为:

$$AIC = n \ln \left(\frac{R_{ss}}{n} \right) + 2k \quad (5)$$

式(5)中: n 为样本数量; R_{ss} 为残差平方和, 即规划求解后的最小值; k 为模型参数个数。

选取 AIC 值最小的关系式进行叉长逆算。如果指数关系最优则可直接通过指数回归关系计算; 如果是线性关系最优则选择 Fraser-Lee's 法、Dahl-Lea 法、SPH 法、BPH 法; 如果是幂函数关系最优则选择 Monastyrsky 法^[16]。

$$\text{Fraser-Lee's: } L_i = \left(\frac{R_i}{R} \right) \times (FL - b_1) + b_1 \quad (6)$$

$$\text{Dahl-Lea: } L_i = \frac{R_i}{R} FL \quad (7)$$

$$\text{SPH: } L_i = \frac{R_i}{R} \left(FL + \frac{a_1}{b_1} \right) - \frac{a_1}{b_1} \quad (8)$$

$$\text{BPH: } L_i = FL \frac{a_1 + R_i}{a_1 + a_1 R} \quad (9)$$

$$\text{Monastyrsky: } L_i = \left(\frac{R_i}{R} \right)^{b_2} - FL \quad (10)$$

式(6)~(10)中: L_i 为第 i 龄的逆算叉长(mm), R_i 第 i 龄的年轮径(mm), a_1 为式(2)中参数, b_1 为耳石半径—叉长线性回归关系式中的截距, b_2 为耳石半径与叉长的幂函数回归系数。

根据逆算后的叉长和年龄, 分别使用 von Bertalanffy 方程、Logistic 方程和 Gompertz 方程拟合生长方程, 依据 AIC 值和贝叶斯信息准则(BIC)值最小的方程作为生长方程最优解。

Von Bertalanffy (VGBF) 生长方程如下:

$$FL_t = L_\infty [1 - e^{-k(t-t_0)}] \quad (11)$$

$$W_t = W_\infty [1 - e^{-k(t-t_0)}]^b \quad (12)$$

Gompertz 方程如下:

$$L_t = L_\infty e^{-e^{-g(t-t_0)}} \quad (13)$$

Logistic 方程如下:

$$L_t = L_\infty [1 + e^{-g(t-t_0)}]^{-1} \quad (14)$$

式(11)~(14)中, FL_t 表示 t 龄时的叉长; L_∞ 表示渐近叉长; k 为生长系数, 表示趋近渐近叉长的相对速度; t_0 表示叉长为零时的理论年龄; g 为常数^[17]; b 为叉长与体重关系式的参数。

使用 AIC 与 BIC 对不同逆算模型拟合的生长方程进行比较选择, AIC 和 BIC 最小的方程作为生长方程最优解。BIC 表达式如下:

$$BIC = n \ln \left(\frac{R_{ss}}{n} \right) + k \ln(n) \quad (15)$$

式(15)中: n 为样本数, R_{ss} 为残差平方和, 即规划求解后的最小值, k 为模型参数个数。

所有图表制作使用 EXCEL2016, T 检验、协方差分析和回归分析使用 SPSS16.0 完成。

2 结果与分析

2.1 叉长与体重关系

协方差分析结果显示雌性和雄性间叉长与体重关系不存在显著性差异($F=0.376$, $P=0.54>0.05$)。因此, 分析叉长和体重的相关关系时, 将 311 尾雌雄样本数据合并分析。经回归分析, 叉长和体重关系符合幂函数关系, 如图 3 所示, 其关系式为: $W=0.8837 \times 10^{-6} FL^{3.47}$, $R^2=0.8578$ 。用 T 检验分析 b 值与 3 之间是否存在显著性差异, 经检验本研究得到的 b 值与 3 之间存在极显著差异($t=103.61$, $P=0.00106<0.01$)。

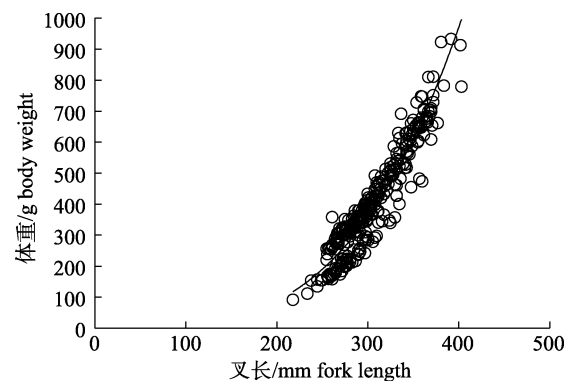


图 3 日本鲭繁殖群体叉长-体重关系

Fig. 3 Fork length-body weight relationship of reproductive stocks of *Scomber japonicus*

2.2 年龄组成

对日本鲭各年龄组不同性别的样本数量和平

均叉长进行统计(表 1), 结果显示: 雌雄合计, 年龄范围 $1^+ \sim 7^+$ 龄, 优势年龄组为 $1^+ \sim 2^+$ 龄, 占总尾数的 73.63%; 雌性日本鲭年龄由 $1^+ \sim 5^+$ 龄组成, 优势年龄组为 $1^+ \sim 2^+$ 龄, 占雌性总尾数的 74.06%; 雄性年龄范围 $1^+ \sim 7^+$ 龄, 优势年龄组为 $1^+ \sim 2^+$ 龄, 占雄性总尾数的 73.01%; 3 龄及 3 龄以下, 雌性数量多于雄性; 3 龄以上, 雌雄数量基本相当, 但雌性缺少高龄个体; 雄性年龄组成范围明显大于雌性。总体而言, 无论雌性还是雄性, 它们的叉长都表现出随着年龄增加而增大的趋势。

表 1 雌雄日本鲭各年龄组样本数和平均叉长
Tab. 1 Average fork length of male and female *Scomber japonicus* in different age groups

年龄 age	雌性样本数 number of female sample	雌性平均叉长/mm average fork length of female	雄性样本数 number of male sample	雄性平均叉长/mm average fork length of male	总体平均叉长/mm overall average fork length
1 ⁺	72	272.40±14.47	50	272.40±10.48	272.61±12.98
2 ⁺	65	306.70±11.19	42	306.80±11.32	306.75±11.24
3 ⁺	27	339.40±5.62	13	342.30±5.89	340.33±5.87
4 ⁺	16	359.80±4.86	16	362.20±5.75	361.00±5.45
5 ⁺	5	375.20±4.87	2	376.50±4.50	375.57±4.81
6 ⁺	—	—	1	392.00	392.00
7 ⁺	—	—	2	402.50±0.50	402.50±0.50

2.3 耳石半径与叉长关系

分别使用幂函数、线性函数和指数函数拟合叉长与耳石半径的关系, 依据 R^2 最大和 AIC 值最小的原则选择最优方程, 拟合结果如表 2 所示。由表 2 可见, 在 3 种关系式中, 线性函数关系是叉长和耳石半径关系的最优解, 其关系式为 $FL=184.09R-112.73$ 。

不同年龄组耳石半径、年轮径、实测叉长和逆算叉长统计结果如表 3 所示。由表 3 可以看出, 日本鲭耳石半径 R 、实测叉长和逆算叉长都随年龄的增加而变大, 但各年龄组的逆算叉长均小于实测叉长; 同一年龄组的 r 值随年轮的增加而变大; 同一年轮不同年龄组之间在 1~3 龄时随年龄组的增加呈现减小的趋势, 但在 4~6 龄时则呈上下波动, 没有持续减小的趋势。

2.4 基于模型拟合生长方程

依据 4 种模型逆算出的叉长和年龄数据拟合生长方程, 由于利用 Dahl-Lea 模型逆算的 Von

Bertalanffy 方程的 AIC 值和 BIC 值均最低(表 4), 因此选择其作为日本鲭繁殖群体的最佳生长方程。经拟合, 方程为: $FL_t=427.18[1-e^{-0.23(t+2.5)}]$; $W_t=1187.20[1-e^{(-0.23(t+2.5))^{3.47}}$ 。

叉长和体重生长曲线只能反映生长过程的总和。为了研究生长随年龄的变化特征, 分别对日本鲭叉长、体重生长方程一阶求导、二阶求导, 得出叉长、体重的生长速度和加速度方程:

叉长生长速度为:
 $dl_t/dt=98.25e^{-0.23(t+2.5)}$;
叉长生长加速度为:
 $d^2l_t/dt^2=-22.60e^{-0.23(t+2.5)}$;
体重生长速度为:
 $dw_t/dt=947.51e^{-0.23(t+2.5)}[1-e^{-0.23(t+2.5)}]^{2.47}$;
体重生长加速度为:
 $d^2w_t/dt^2=217.93e^{-0.23(t+2.5)}[1-e^{-0.23(t+2.5)}]^{1.47} \times [3.47e^{-0.23(t+2.5)}-1]$ 。

利用上述方程分别作叉长与体重的生长速度和加速度曲线如图 4 所示。当体重生长速度的变

表 2 日本鲭繁殖群体耳石半径和叉长关系
Tab. 2 Relationship between fork length and otolith radius of reproductive stocks of *Scomber japonicus*

方程 equation	表达式 expression	残差平方和 R^2	赤池信息量标准 AIC
幂函数 power function	$FL=99.292R^{1.3661}$	0.9701	229.412
线性函数 liner function	$FL=184.09R-112.73$	0.9748	228.587
指数函数 exponential function	$FL=79.997e^{0.586R}$	0.9641	240.836

表 3 日本鲭繁殖群体不同年龄组耳石半径、年轮径、实测叉长和逆算叉长

Tab. 3 Otolith radius and rings size observed and back-calculation of fork length of reproductive stocks of <i>Scomber japonicas</i> mm									
年龄组 age groups	R	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	实测叉长 observed FL 逆算叉长 back- calculation FL
1 ⁺	2.030±0.077	1.850±0.037							264.30±20.47 248.26±8.24
2 ⁺	2.320±0.083	1.830±0.020	2.070±0.027						310.00±12.15 280.94±6.30
3 ⁺	2.460±0.020	1.810±0.020	2.050±0.025	2.230±0.041					341.50±6.50 308.58±7.45
4 ⁺	2.560±0.044	1.800±0.050	2.030±0.051	2.200±0.053	2.320±0.041				358.92±5.31 326.45±6.41
5 ⁺	2.660±0.021	1.750±0.014	1.960±0.021	2.150±0.018	2.300±0.021	2.420±0.031			376.00±4.93 346.62±7.03
6 ⁺	2.760	1.700	1.930	2.150	2.320	2.460	2.520		392.00±0.00 365.67±6.81
7 ⁺	2.830±0.001	1.720±0.009	1.920±0.001	2.110±0.007	2.230±0.008	2.420±0.008	2.530±0.008	2.630±0.002	402.50±0.50 380.00±0.00

表 4 不同逆算模型下日本鲭繁殖群体生长方程对比

Tab. 4 Comparison of growth equations of reproductive stocks of *Scomber japonicus* under different back-calculation models

方程 equation	赤池信息量标准				贝叶斯信息量			
	Dahl-Lea	Fraser-Lee	SPH	BPH	Dahl-Lea	Fraser-Lee	SPH	BPH
von Bertalanffy	1252.92	1320.16	1326.58	1317.58	1265.76	1333.30	1339.42	1330.42
Gompertz	1254.67	1322.39	1328.72	1319.85	1267.51	1335.32	1341.61	1332.69
logistic	1256.87	1325.37	1331.71	1322.87	1269.71	1338.21	1344.54	1335.71

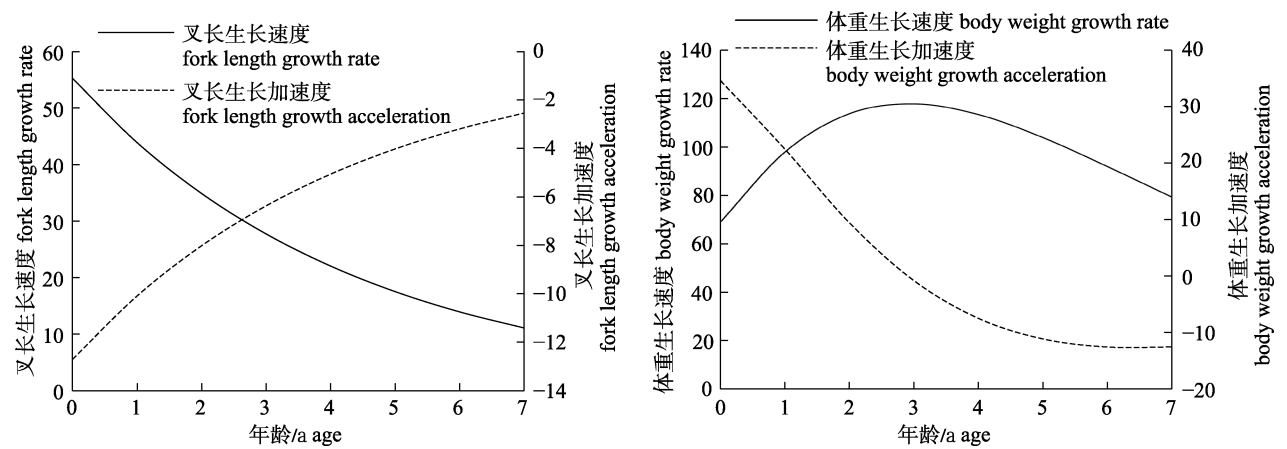


图 4 日本鲭繁殖群体叉长与体重生长速度与加速度曲线

Fig. 4 Growth rate and acceleration of fork length and body weight of reproductive stocks of *Scomber japonicus*

化值为0时的年龄为拐点年龄,变化值为0时的体重为拐点体重,令 $d^2w/dt^2=0$ 时求得 $t_{拐}=2.91$ 龄,与拐点处对应的叉长为304.09 mm,体重为365.03 g。

3 讨论

3.1 日本鲭年龄鉴定材料与方法

鱼类年龄鉴定一般利用鱼体内的硬组织,例如耳石、鳞片、脊椎骨等。最早研究日本鲭年龄

的是1937年相川广秋^[18]依据脊椎骨鉴定;1954年,维京斯基^[19]在研究日本鲭时则采用鳞片作为鉴定年龄的材料。鳞片在早期被认为是日本鲭年龄鉴定可靠的硬组织,但研究人员认为鳞片经常出现假轮标记,且鱼体对鳞片有重吸收现象,鉴定结果会低估高龄鱼类年龄^[20-21]。耳石形成于每年碳酸钙沉积,且耳石增长与生物体内在的生理循环以及外在的环境变化有关,长期研究结果证实,

耳石是硬骨鱼类年龄鉴定和增量分析最稳定的材料。Baird^[22]在1977年验证了耳石会每年形成透明带和不透明带的变化规律。陈卫忠等^[23]1995年通过观察日本鲭幼鱼矢耳石轮纹数,进一步提出了细微年轮环纹鉴定日龄的可行性。此后,耳石被广泛应用于西北太平洋以及我国东黄海日本鲭年龄或日龄鉴定和生长模式判别^[2,6,12-13]。

耳石表面特征可能受到鱼类生理变化影响,例如加速生长、繁殖活动等周期性节律,相应地,生长期和停滞期在耳石上会形成明带和暗带,明带和暗带交替的环带形成年轮。耳石年龄解读的难点是具有模糊半透明特征的假轮,其容易干扰轮纹判读,假轮常见于生长第一年,因此,第一生长轮和假轮可能产生混淆^[24]。本研究通过环状结构是否围绕耳石,并比较高龄鱼类耳石形成期的轮纹清晰度来确定假轮和第一生长轮,提高了年龄判读的准确性。此外,较小叉长个体基本为去年同世代出生个体,若以假轮半径逆算叉长,则明显小于1龄个体,因此本研究采用繁殖群体进行年龄鉴定可以更容易识别假轮的位置。由于本研究不是全年取样,因此无法分析明暗带形成规律。已有研究表明^[6],日本鲭耳石上的透明带的形成一般在繁殖期间,本研究根据3—4月所采集的耳石观察发现,耳石边缘透明带较为明显,符合上述研究结果。

3.2 关于生长方程的选择

东海群系日本鲭繁殖时间一般为每年的3—4月,李纲^[6]根据此特点在拟合日本鲭生长方程前设定日本鲭生日为4月1日,以此进行修正年龄,缩小拟合生长方程时的误差。这种方法虽然有不确定性但是相比不修正年龄的结果有较大优势。本研究根据4种逆算模型对日本鲭叉长进行逆算,然后对拟合的生长方程对比选择以达到对日本鲭年龄与叉长的合理估算。校正年龄和校正叉长都是为了缩小拟合生长方程时所产生的误差,校正年龄需要假定日本鲭的出生日期,根据实测叉长进行逆算则是为了确定日本鲭在不同年龄时的实际叉长,该方法只需要根据耳石半径的长度计算鱼体的叉长。相比之下,根据叉长进行逆算能进一步减少拟合生长方程的不确定因素。根据耳石

日或年生长量进行逆算的前提是要求耳石中增量的沉积速率不变,然而在少数情况下会出现耳石与鱼体生长并不一致的现象,对于该异常情况,需要在拟合耳石半径与叉长关系时避免。本研究显示,除了最外轮轮径会随着年龄的增加而增加,耳石内其他年轮径长度均会随着年龄增加而相对减小,这说明日本鲭耳石年轮是先在耳石边缘形成,逐渐向耳石内部生长。本研究中6龄日本鲭耳石上的第6年轮径平均长度小于7龄日本鲭第6年轮平均长度,可能是由于6龄和7龄日本鲭数量较少,无法形成明显的规律。

生长方程是表达鱼类生长特点的函数关系式,反映的是采样时间段内鱼类生长状况^[25]。鱼类的生长特征有可能随着摄食状况、水温环境等外界因素而改变,不同的生长方程所描述鱼类生长过程的侧重点不同。殷名称^[26]认为,对于匀速生长型鱼类,使用 von Bertalanffy 方程拟合效果最佳; Gompertz 方程适合生命周期短的 r 选择型鱼类^[27], Logistic 方程受到鱼类栖息地的环境容纳量、摄食状态等外界因素影响较大^[25]。由于郑元甲等^[28]认为日本鲭趋向 r 选择型鱼类, r 选择型鱼类生长速度快,生命周期短,且本研究 b 值经 T 检验发现与 3 存在显著差异,因此在对日本鲭进行拟合生长方程前需要考虑方程的比较与选择。

Lorenzo 等^[6]研究表明加那利群岛附近的日本鲭在生长过程中有两个显著生长不连续点,因此根据这两个点将日本鲭生长过程划分成3个阶段分别研究; Angelescu 等^[6]发现日本鲭生长特征在初次性成熟周期前后有明显差异,初次性成熟前的体长生长超过体宽,初次性成熟后体高和体宽的生长超过体长的生长。对于日本鲭生活史中的这2个明显生长特征,笔者认为应以初次性成熟为界限,分别研究其生长特征,才能更准确获取日本鲭生长信息。由于本研究选取日本鲭的样本均已达到性成熟,因此所拟合的 von Bertalanffy 方程仅能描述初次性成熟后的日本鲭生长特征。

本研究依据 Dahl-Lea 模型逆算的叉长与年龄数据来拟合生长方程,经 AIC 和 BIC 值双向对比后发现: von Bertalanffy 方程有3个参数,但是

AIC 和 BIC 值均最低, 拟合效果最好, Gompertz 方程次之, Logistic 方程效果最差。该结果反向证明了日本鲭繁殖群体属于匀速生长型。李宗栋^[29]认为 b 值大于 3 表示鱼类体重生长优于体长生长, 小于 3 表示体长生长优于体重生长。詹秉义^[30]认为鱼类在生长过程中受环境因素影响较大, 因此叉长-体重关系中参数 b 值在 2.5~3.5 之间均属于匀速生长型鱼类。本研究中 b 值为 3.47, 偏高的原因在于本研究样本选取的是繁殖期日本鲭, 其性腺在发育过程中, 性腺质量的增加导致了鱼体体重变大, 因此造成了 b 值的偏大。

3.3 生长参数的比较

本研究使用 von Bertalanffy 生长方程拟合出的东海中部日本鲭繁殖群体的生长参数与其他海域日本鲭均有所差异(表 5)。Von^[31]认为 von Bertalanffy 方程中的渐近叉长 L_{∞} 和生长参数 k 是衡量鱼体生长情况的指标, t_0 代表的是 0 龄时鱼体理论长度, 该数值为接近于 0 的负数, 无实际意义。对比后发现(表 5), 本研究中日本鲭群体的 k 值和 t_0 值均是最低的, L_{∞} 值高于智利、对马海域和黄渤海等采样点的群体而低于东海北部-黄海南部和福建近海等采样点的群体。其原因可能是由于本研究中的日本鲭群体和智利、对马海域和黄渤海等采样点的群体有所差异, 同时与东海北部-

黄海南部和福建近海等采样点的群体比较表明了东海日本鲭群体有个体小型化的现象。此外, 根据本研究结果得出东海中部日本鲭繁殖群体的拐点年龄为 2.91 龄, 拐点体重 365.03 g, 拐点叉长 304.09 mm, 对比东海北部-黄海南部的群体拐点年龄 2.73 龄, 拐点体重 448.60 g, 拐点叉长 323.16 mm^[11]后发现, 东海中部日本鲭拐点年龄大于东海北部-黄海南部日本鲭, 拐点叉长、体重则小于东海北部-黄海南部群体。

费鸿年等^[32]认为, 拟合后的 von Bertalanffy 方程中 k 值满足 e^{-k} 小于 1 则表明该方程拟合的结果有意义, 本研究 k 值符合该理论要求($e^{-0.23}=0.7945<1$)。生长方程中 k 值表示生长曲线接近渐近值的速率^[25], Steven^[33]认为生长参数 k 值在 0.05~0.10 的鱼类为生长缓慢型, 0.10~0.20 为均速生长型, 0.20~0.50 为快速生长型, 因此日本鲭属于快速生长型鱼类($k=0.23>0.20$)。

拐点年龄、叉长和体重 3 个数值代表生长速度由快转慢的一个转折点, 是制定开捕规格的一个重要参考指标。由于本研究仅采集繁殖期间 1 龄及以上的日本鲭样本来拟合生长方程, 因此拐点年龄、体重和叉长等数据仅能代表日本鲭成鱼的生长特征, 可以作为制定日本鲭可捕标准的参考依据。

表 5 不同海域、不同时间的日本鲭生长参数对比
Tab. 5 Comparison of growth parameters of *Scomber japonicus* in different sea areas and different time

采样点 sampling point	采样时间 sampling time	L_{∞}	k	t_0	文献来源 literature resources
东海中部 central East China sea	2021	427.18	0.23	2.50	本研究 this study
智利 Chile	2005-2008	400	0.23	1.34	[1]
对马海域 Tsushima sea area	2000-2001	406	0.37	1.68	[20]
黄渤海 the Yellow Sea and Bohai Sea	1978	425	0.53	0.80	[19]
东海北部—黄海南部 north of the East China Sea and south of the Yellow Sea	2002-2003	451.35	0.32	1.20	[11]
福建近海 coastal waters of Fujian	1983-1984	457	0.302	1.10	[34]

参考文献:

[1] Cerna F, Plaza G. Life history parameters of chub mackerel (*Scomber japonicus*) from two areas off Chile[J]. Bulletin of Marine Science, 2014, 90(3): 833-848.

[2] Fishery Bureau of Ministry of Agriculture, Command Post of East China Sea Fishery of Ministry of Agriculture. Investigation and Area Division of Fisheries Resources in the East China Sea Region[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1987: 392-400. [农牧渔业部水产局, 农牧渔业部东海区渔业指挥部. 东海区渔业资源调查和区划[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1987: 392-400.]

[3] Wu S N, Chen X J. Review on stock assessment and management of chub mackerel (*Scomber japonicus*)[J]. Transac-

- tions of Oceanology and Limnology, 2020(1): 161-168. [武胜男, 陈新军. 日本鲭资源评估与管理研究现状[J]. 海洋湖沼通报, 2020(1): 161-168.]
- [4] Li J S, Yan L P, Hu F. Inter-decadal variation in the reproductive characteristics of chub mackerel *Scomber japonicus* in the northern Yellow Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(3): 567-573. [李建生, 严利平, 胡芬. 黄海北部日本鲭繁殖生物学特征的年代际变化[J]. 中国水产科学, 2014, 21(3): 567-573.]
- [5] Li J S, Yan L P, Hu F. Analysis of *Scomber japonicus* spawning grounds based on fish eggs and larvae data in the Central and Southern East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2020, 42(1): 10-19. [李建生, 严利平, 胡芬. 基于鱼卵仔鱼数据的东海中南部日本鲭产卵场分析[J]. 海洋渔业, 2020, 42(1): 10-19.]
- [6] Li G, Chen X J, Guan W J, et al. Stock Assessment and Management Strategy of *Scomber japonicus*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 15-26. [李纲, 陈新军, 官文江, 等. 东黄海鲈鱼资源评估与管理决策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 15-26.]
- [7] Hiyama Y, Yoda M, Ohshimo S. Stock size fluctuations in chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China Sea and the Japan/East Sea[J]. Fisheries Oceanography, 2002, 11(6): 347-353.
- [8] Cheng J H, Lin L S. Study on the biological characteristics and status of common mackerel (*Scomber japonicus* Houttuyn) fishery in the East China Sea region[J]. Marine Fisheries, 2004, 26(2): 73-78. [程家骅, 林龙山. 东海区鲈鱼生物学特征及其渔业现状的分析研究[J]. 海洋渔业, 2004, 26(2): 73-78.]
- [9] Liu C Z, Yan L P, Li J S, et al. Morphological differences between breeding stocks of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China and Yellow seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(4): 908-917. [刘楚珠, 严利平, 李建生, 等. 基于框架法的东黄海日本鲭产卵群体形态差异分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(4): 908-917.]
- [10] Li J S, Yan L P, Hu F. Inter-decadal changes in biological characteristics of reproductive stocks of chub mackerel, *Scomber japonicus*, in the East China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(6): 1253-1259. [李建生, 严利平, 胡芬. 东海日本鲭繁殖群体生物学特征的年代际变化[J]. 中国水产科学, 2015, 22(6): 1253-1259.]
- [11] Liu Y, Yan L P, Hu F, et al. Age and growth of *Pneumatophorus japonicus* in the north of the East China Sea and the south of the Yellow Sea[J]. Marine Fisheries, 2005, 27(2): 133-138. [刘勇, 严利平, 胡芬, 等. 东海北部和黄海南部鲈鱼年龄和生长的研究[J]. 海洋渔业, 2005, 27(2): 133-138.]
- [12] Li G, Chen X J, Feng B. Age and growth of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China and Yellow Seas using sectioned otolith samples[J]. Journal of Ocean University of China, 2008, 7(4): 439-446.
- [13] Go S, Lee K, Jung S. A temperature-dependent growth equation for larval chub mackerel (*Scomber japonicus*)[J]. Ocean Science Journal, 2020, 55(1): 157-164.
- [14] Takahashi M, Yoneda M, Kitano H, et al. Growth of juvenile chub mackerel *Scomber japonicus* in the western North Pacific Ocean: With application and validation of otolith daily increment formation[J]. Fisheries Science, 2014, 80(2): 293-300.
- [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] Vigliola L, Meekan M G. The back-calculation of fish growth from otoliths[M]//Tropical Fish Otoliths: Information for Assessment, Management and Ecology. Dordrecht: Springer, 2009: 174-211.
- [17] Chen Y, Mello L G S. Growth and maturation of cod (*Gadus morhua*) of different year classes in the Northwest Atlantic, NAFO subdivision 3Ps[J]. Fisheries Research, 1999, 42(1-2): 87-101.
- [18] Deng J Y, Zhao C Y. Marine Fisheries Biology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1991: 413-452. [邓景耀, 赵传纲. 海洋渔业生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 413-452.]
- [19] Seikai National Fisheries Research Institute. Biological and Ecological Characteristics of Valuable Fisheries Resources from the East China Sea and the Yellow Sea—Comparison between the Chinese and Japanese Knowledges[M]. Nagasaki: Nihon Shiko Printing Co. Ltd, 2001: 438-448. [西海区水产研究所. 东海、黄海主要水产资源的生物、生态特性——中日间见解的比较[M]. 长崎: 日本纸业印刷有限公司, 2001: 438-448.]
- [20] Shiraishi T, Okamoto K, Yoneda M, et al. Age validation, growth and annual reproductive cycle of chub mackerel *Scomber japonicus* off the waters of northern Kyushu and in the East China Sea[J]. Fisheries Science, 2008, 74(5): 947-954.
- [21] Zhang X J, Cheng J H. Survey on study of the fish age de-

- termination[J]. Marine Fisheries, 2009, 31(1): 92-99. [张学健, 程家骅. 鱼类年龄鉴定研究概况[J]. 海洋渔业, 2009, 31(1): 92-99.]
- [22] Baird D. Age, growth and aspects of reproduction of the mackerel *Scomber japonicus* in South African waters (Pisces: Scombridae)[J]. Zoologica Africana, 1977, 12(2): 347-362.
- [23] Chen W Z, Li C S. A primary observation and study on the daily increment in otolith for juvenile Japanese mackerel *Pneumatophorus japonicus*[J]. Journal of Fisheries of China, 1996, 20(2): 139-143. [陈卫忠, 李长松. 鲈鱼幼鱼耳石日轮的初步观察与研究[J]. 水产学报, 1996, 20(2): 139-143.]
- [24] Vasconcelos J, Dias M A, Faria G. Age and growth of the Atlantic chub mackerel *Scomber colias* Gmelin, 1789 off Madeira Island[J]. Arquipélago: Life and Marine Sciences, 2011, 28: 57-70.
- [25] Jin H Y. Study on the age, growth, fecundity and feeding habits of *Pseudecheneis sulcatus* in lower reaches of Yarlung Zangbo River[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020. [金洪宇. 雅鲁藏布江下游黄斑褶鲈年龄、生长、繁殖力及食性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.]
- [26] Yin M C. Fish Ecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 16-23. [殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 16-23.]
- [27] Hilborn R, Walters C J. Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty[M]. London: Chapman & Hall, 1992.
- [28] Zheng Y J, Li J S, Zhang Q Y, et al. Research progresses of resource biology of important marine pelagic food fishes in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(1): 149-160. [郑元甲, 李建生, 张其永, 等. 中国重要海洋中上层经济鱼类生物学研究进展[J]. 水产学报, 2014, 38(1): 149-160.]
- [29] Li Z D. Study on age, growth, reproduction and feeding habits of *Cultrichthys erythropterus* in Dianchi Lake[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. [李宗栋. 滇池红鳍原鲌年龄、生长、繁殖及食性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.]
- [30] Zhan B Y. Evaluation of Fishery Resources[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.]
- [31] von Bertalanffy L. A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws)[J]. Human Biology, 1938, 10(2): 181-213.
- [32] Fei H N, Zhang S Q. Aquatic Source Science[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990: 114-285. [费鸿年, 张诗全. 水产资源学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 114-285.]
- [33] Branstetter S. Age and growth estimates for blacktip, *Carcharhinus limbatus*, and spinner, *C. brevipinna*, sharks from the northwestern Gulf of Mexico[J]. Copeia, 1987, 1987(4): 964-974.
- [34] Yan Y M. Study on fish biology of *Pneumatophorus japonicus* in the coastal waters of Fujian[J]. Marine Fisheries, 1997, 19(2): 69-73. [颜尤明. 福建近海鲈鱼的生物学[J]. 海洋渔业, 1997, 19(2): 69-73.]

Age and growth characteristics of chub mackerel (*Scomber japonicus*) reproductive stock in the central East China Sea

ZHOU Hanlin^{1,2}, YAN Liping¹, ZHANG Hui¹, LI Jiansheng¹

1. Key Laboratory of East China Sea Fishery Resources Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: This study analyzed the population structure and growth characteristics of chub mackerel (*Scomber japonicus*) based on its reproductive stocks samples collected in the central East China Sea from March to April in 2021. This analysis was undertaken using otolith interpretation, growth back-calculation, and growth equation fitting. The results showed that there was no significant difference between male and female individuals in the reproductive stock of Japanese mackerel ($F=0.376$, $P=0.54>0.05$). The age structure of male and female was 1–7 years old and the dominant age group was 1–2 years old, accounting for 73.63% of the population. The number of females was more than that of males at three years old and below. For individuals older than three years old, the number of males and females was essentially the same, although the females were lacking in old age individuals. The relationship between fork length and body weight was: $W=0.8837\times 10^{-6}FL^{3.474}$. A linear functional relationship was the optimal solution for the relationship between fork length and otolith radius; this relationship was $FL=184.09R-112.73$. The fork length and age data of four models were used to fit three back-calculation models; von Bertalanffy, Gompertz, and Logistic. Among them, the von Bertalanffy equation of the Dahl-Lea model had the lowest AIC and BIC; as such, this model was selected as the best growth equation. The von Bertalanffy fork length growth equation was $FL_t=427.18 [1-e^{-0.23(t+2.5)}]$, and the body weight growth equation was $W_t=1187.20\times [1-e^{(-0.23(t+2.5))}]^{3.47}$. Following the second derivation test, the age of the inflection point was 2.91 years old, the corresponding inflexion body weight and fork length were 365.03 g and 304.09 mm respectively. These values may be used as an important references for the formulation of *Scomber japonicus* catch specifications in future.

Key words: *Scomber japonicus*; reproductive stock; otolith; back-calculation model; growth equation

Corresponding author: LI Jiansheng. E-mail: jianshengli@sina.com