

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18329

基于 Bootstrap 的 ELEFAN 方法在评估方氏云鳚群体生长参数中的应用

王琨¹, 张崇良¹, 陈宁¹, 任一平^{1,2}

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237

摘要: 渔业数据有限性是小型渔业资源评估所面临的常见问题。电子体长频率分析(electronic length frequency analysis, ELEFAN)常用于年龄数据难以获取或缺失的渔业, 但该方法的可靠性尚待检验。本研究根据 2013—2018 年春、秋季共 11 个航次的海州湾底拖网调查数据, 分别使用传统的 ELEFAN 与结合 Bootstrap 的 ELEFAN 方法, 比较了 2013—2015 年与 2016—2018 年两个时间段内海州湾方氏云鳚(*Pholis fangi*)群体 von-Bertalanffy 生长方程中参数之间的变化。结果显示, 在海州湾海域, 方氏云鳚的生长参数具有显著变化, 2013—2018 年, 群体的极限体长变小, 生长速率加快, 说明海州湾方氏云鳚群体近年来呈现小型化的趋势。相比传统的 ELEFAN 方法, 结合 Bootstrap 的 ELEFAN 方法能够给出较为稳健的参数估计, 受采样随机性的影响较小, 可以较好地应用于数据缺乏的小型渔业中。本研究加深了对方氏云鳚种群动态的认识, 并推动了基于体长频率的生长参数估算方法在数据有限资源评估中的应用。

关键词: 方氏云鳚; von-Bertalanffy 生长参数; ELEFAN; Bootstrap

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)03-0512-10

方氏云鳚(*Pholis fangi*)是一种沿岸型小型底栖鱼类, 主要分布于黄渤海及其近岸水域。近年来, 底拖网调查及相关研究表明, 黄渤海传统渔业资源衰退严重, 方氏云鳚已成为海州湾及其邻近海域的主要优势种^[1-2], 在海州湾的食物网及生态系统也起着越来越重要的作用^[3]。国内学者对其形态、繁殖生物学、摄食生态学、遗传学及栖息分布特征等方面进行了较为深入的研究^[3-8], 但资源评估方面的研究较少。

近年来, 由于受到过度捕捞、环境污染以及全球气候变化等多方面的胁迫, 许多海区的渔业资源都发生了衰退, 呈现种类组成的更替和个体小型化等生物学特征的变化^[9-10]。然而相关研究主要集中于大型、经济性鱼类^[11-13], 对方氏云鳚

等小型鱼类的研究较少, 目前尚无对方氏云鳚生物学特征变化的报道。另一方面, 渔业资源评估需要丰度指数、产量、年龄结构等数据支撑^[14], 由于研究成本和社会关注度的限制, 方氏云鳚等小型渔业往往缺乏相关数据^[15]。相对于这些渔业资源数据, 体长数据更容易获得, 成本也较低。相关研究提出了一系列适用于有限数据的资源评估方法, 如电子体长频率分析(electronic length frequency analysis, ELEFAN)能够基于体长数据进行生长、死亡参数的估算, 一定程度上解决年龄数据难以获取的问题^[15-16]。但该方法由于数学算法所限, 仅能给出最优解而不提供参数值误差的相关信息, 其可靠性尚待检验。

本研究聚焦于方氏云鳚生长参数的年际变化,

收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2018-11-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31802301).

作者简介: 王琨(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事渔业资源评估研究. E-mail: wangkun_ouc@qq.com

通信作者: 张崇良, 副教授. E-mail: Zhangclg@163.com

利用 ELEFAN 估算和比较了 2013—2015 年与 2016—2018 年两个时间段内海州湾方氏云鲷群体生长参数之间的差异。同时,本研究利用 Bootstrap 的方法研究了 ELEFAN 方法估算方氏云鲷生长参数的不确定性。旨在提高方氏云鲷生物学参数估计的准确性,为海州湾渔业生态系统变化的研究提供基础数据。本研究的方法同时可为数据有限的渔业资源评估提供方法参考,促进小型渔业的可持续利用和渔业的科学管理。

1 材料与方法

1.1 数据来源

方氏云鲷样本共 3293 尾,于 2013—2018 年

春(4月、5月)、秋(9月、10月)两个季节采自海州湾及其邻近海域(2018 年仅有春季样本)。调查海域范围为 119°20'E~121°10'E、34°20'N~35°40'N。调查站位设计采用分层随机采样,根据调查区域的海洋、地理及生物学特征将调查海区分为 5 个区域(A~E,图 1)。每个航次共设置 18 个站位,各区域所设置站位数量与其面积成比例,每个航次在各区域中随机选取对应数量的站位^[17]。所用调查船为功率 220 kW 的单拖渔船,拖网速度为 2~3 kn,每站拖网时间为 1 h。调查网具囊网网目为 17 mm,网口扩张高度约为 6 m,网口扩张高度约为 25 m。样品的采集和分析参考《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007)^[18]。

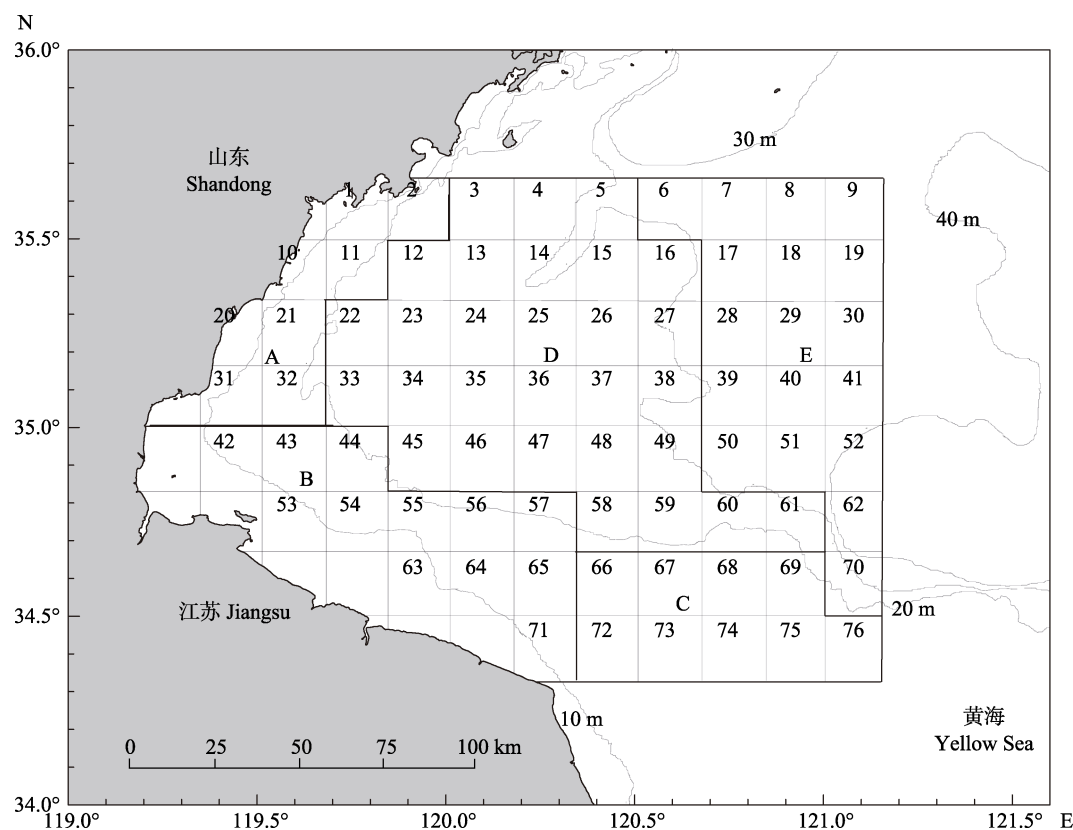


图1 海州湾及邻近海域渔业资源底拖网调查站位

Fig. 1 Sampling stations of bottom trawl survey for fishery resources in Haizhou Bay and adjacent waters

1.2 ELEFAN 方法

本研究假设方氏云鲷的生长符合 von-Bertalanffy 生长方程(von-Bertalanffy growth function, VBGF):

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

其中, L_{∞} (infinite length, L_{inf})表示生物体的极限体长,也称渐近体长或理论最大体长; K 为生长参数,衡量个体体长趋向于其渐近值的相对速率; t_0 表示理论上体长为零时所对应的年龄,通常为负值^[19]。

本研究使用 ELEFAN 估算了 2013—2015 年以及 2016—2018 年两个时间段内海州湾方氏云鳎群体的极限体长 L_{∞} 及生长参数 K 。ELEFAN 方法使用一定时间序列的体长频率数据估算 VBGF 参数^[20], 在国内外均有广泛的应用^[21-24]。本研究中 VBGF 参数估计的主要操作步骤如下:

(1) 将输入的体长频率数据重整为呈时间序列的体长频率数据, 使之成为一系列清晰可辨的峰值, 这些峰值对应着体长概率密度较大的点。

(2) 将数据按一定组距进行分组, 设定移动平均值, 重新调整其体长频数分布图的结构。其中组距以及移动平均值项数需要选择和优化。本研究采用 6 mm 作为分组间隔(见 2.2)和 7 的移动平均值^[25]。

(3) 根据体长组分布的波峰数计算可拟合的波峰数之和(available sum of peaks, ASP)。选择不同的优化方式, 获得一系列渐近体长 L_{∞} 和生长参数 K 以描述生长曲线, 曲线每到达曲线波峰一次加 1, 低于移动平均数一次减 1, 所求的最大值为解释波峰和(explained sum of peaks, ESP)。在优化过程中不断计算参数组合以及对应 ESP/ASP, 根据拟合优度指数 $R_n = 10^{(ESP/ASP)/10}$ ^[26], 选取 R_n 最大的一组($R_{n_{\max}}$)作为最优解, 其对应的极限体长 L_{∞} 、生长参数 K 和 t_{anchor} 即为最优参数。

需要注意的是, ELEFAN 以 t_{anchor} 参数代替 t_0 。 t_{anchor} (单位为年)可以理解为个体开始发育(此时体长为 0)所对应时间点或繁殖盛期, $t_{\text{anchor}}=0$ 对应一年的年初。

1.3 数据处理与分析

本研究首先分析了 2013—2015 年以及 2016—2018 年两个时间段内海州湾方氏云鳎群体的体长组成, 并使用 Kolmogorov-Smirnov 检验比较二者体长分布情况的差异。研究着重从体长组距, 优化求解方法和参数误差 3 个方面, 分析了 ELEFAN 方法的稳健性。

1.3.1 体长组距 在对体长频数分布的数据结构进行调整时, 需要设定长度组的分组间隔以及移动平均值的项数。以两个时间段的海州湾方氏云鳎群体为例, 本研究将长度组的分组间隔设置为 (1~30), 获得不同结构的体长频数分布图, 分别

研究其数据拟合效果。此外, 根据先前对方氏云鳎的相关研究^[27-28]将 L_{∞} 的下限设定为样本中所有个体的体长最大值 $L_{\max}$, 上限为 1.1 倍的 $L_{\max}$, K 的上下限分别为 0.4 和 1.0。计算出不同分组组距对应的 $R_{n_{\max}}$ 和 t_{anchor} , 比较不同的长度组分组间隔对拟合结果的影响。

1.3.2 优化方法 本研究分别使用了模拟退火(simulating annealing, SA)、遗传算法(genetic algorithm, GA)和响应面分析(response surface analysis, RSA) 3 种不同的优化方式进行优化, 以 $R_{n_{\max}}$ 作为拟合结果优劣的衡量指标, 比较不同优化算法的差异。设定优化控制参数时保证运算时间和次数以获得更好的优化结果。

1.3.3 参数分布 ELEFAN 算法对一个对目标函数进行优化, 这种方法在实际分析中可能会得到局部最优解而非全局最优解, 而导致其参数估计结果不具有“鲁棒性”(robustness)^[25, 29]。这一问题可以利用 Bootstrap 方法进行处理。Bootstrap 方法通过再抽样方法, 可以用来估计样本统计量的分布情况^[30], 从而有效地从样本总体中估计所需的未知参数及其置信区间^[31], Bootstrap 的 ELEFAN 方法, 可以更稳健地估算 VBGF 参数, 并给出其置信区间, 使参数估计更具统计学意义。

使用 Bootstrap 方法分别对上述 2013—2015 年的 1716 尾以及 2016—2018 年的 1577 尾方氏云鳎体长数据进行 1000 次有放回的重抽样, 通过 ELEFAN 方法获得每个样本的 L_{∞} 以及 K , 比较两个时间段内生长参数分布情况的差异。优化过程使用遗传算法(GA)完成。

本研究数据分析、图形构建等工作在 R version 3.5.1 环境下使用 TropFishR^[32]等软件包中的函数进行。

2 结果与分析

2.1 体长组成分析

2013—2015 年的海州湾方氏云鳎群体的体长分布范围为 45~179 mm, 优势体长组为 120~130 mm (占总个体数的 24%, 图 2), 体长平均值为 (122.8±17.3) mm; 2016—2018 年的群体体长分布范围为 51~165 mm, 优势体长组为 110~120 mm

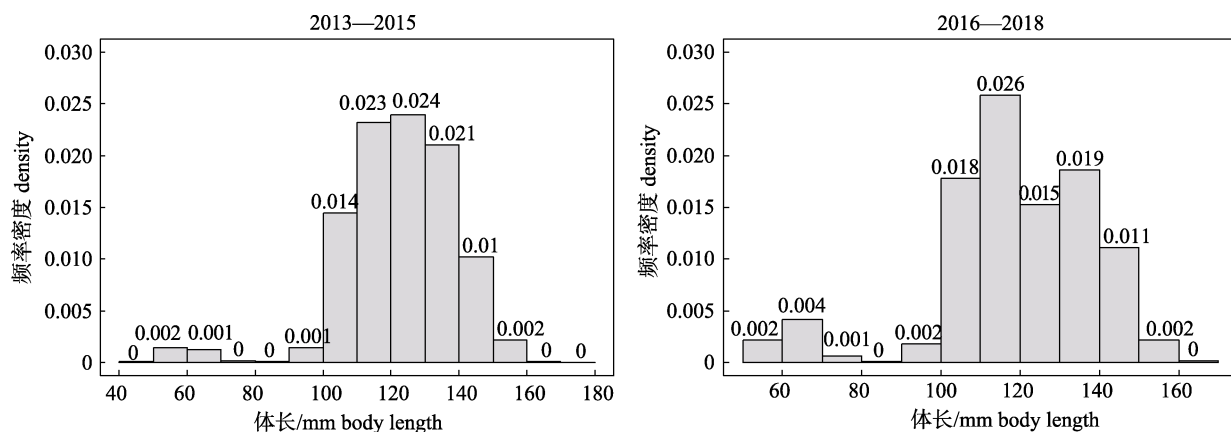


图2 方氏云鲷样本体长分布频率图

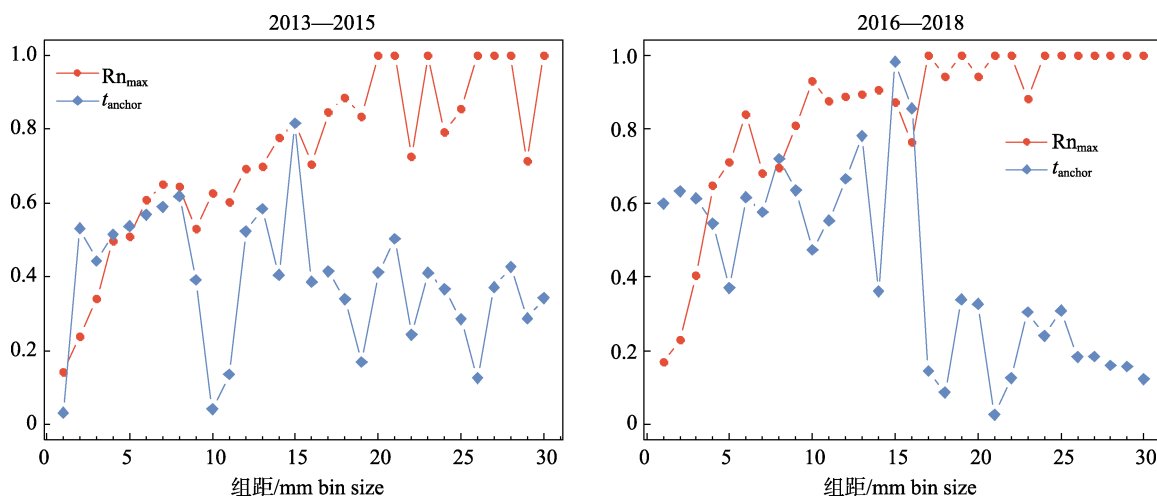
Fig. 2 Body length frequency distribution of *Pholis fangi* in Haizhou Bay

(占总个体数的 26%, 图 2), 体长平均值为 (119.2 ± 20.5) mm。经 Kolmogorov-Smirnov 检验两个群体的体长分布情况存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2 体长组距对拟合结果的影响

随体长组距变大, 拟合优度参数 $Rn_{\max}$ 呈现逐渐增大的趋势, 当组距足够大 (>20 mm) 时, $Rn_{\max}$ 为 1, 伴随较小的波动。 t_{anchor} 在组距小于

16 mm 时变化幅度较大, 当分组组距大于 16 mm 时, t_{anchor} 变化相对较小(图 3)。考虑到方氏云鲷一般在秋季进行繁殖^[5], 因此认为过低的 $t_{\text{anchor}} (< 0.4)$ 是不合理的估计值。当体长分组组距为 6 mm 时, 在 2013—2015 年及 2016—2018 年的两组数据均具有相对较高的 $Rn_{\max}$ 以及较为合理的 t_{anchor} , 因此认为 6 mm 为最佳分组组距。

图3 方氏云鲷不同体长组距下参数 $Rn_{\max}$ 和 t_{anchor} 估计结果Fig. 3 Estimation results of $Rn_{\max}$ and t_{anchor} with different body length bin size of *Pholis fangi*

2.3 优化方法对参数估计的影响

模拟退火算法所得 2013—2015 年群体的 L_{∞} 最大, K 最小, 而遗传算法和响应面分析结果接近, L_{∞} 为 188 mm 左右, K 为 0.53; 遗传算法所得 2016—2018 年群体的 L_{∞} 最大, K 最小, 而模拟退火算法和响应面分析结果接近, L_{∞} 为 176.9 左右, K 为 0.61。其中遗传算法和响应面分析所求 $Rn_{\max}$

在 2016—2018 年的群体中要大于模拟退火算法所求的 $Rn_{\max}$ (表 1)。

同 2013—2015 年的群体 ($L_{\infty} \in [188.0, 192.7]$, $K \in [0.49, 0.53]$) 相比, 2016—2018 年的群体在 3 种算法中都具有较小的 L_{∞} (176.9~177.4) 以及较大的 K (0.59~0.61); t_{anchor} 在两个群体间无明显大小规律。

表 1 3 种优化算法对方氏云鲷两群体的生长参数的估计结果
Tab. 1 Estimation results on growth parameters of two *Pholis fangi* stocks by three optimization algorithms

优化算法 optimization algorithm	年份 year	L_{∞} /mm	K	t_{anchor}	Rn_{max}
模拟退火(SA)	2013—2015	192.7	0.49	0.57	0.607
模拟退火(SA)	2016—2018	176.9	0.61	0.62	0.840
遗传算法(GA)	2013—2015	188.6	0.53	0.64	0.607
遗传算法(GA)	2016—2018	177.4	0.59	0.55	0.860
响应面分析(RSA)	2013—2015	188.0	0.53	0.62	0.607
响应面分析(RSA)	2016—2018	176.9	0.61	0.65	0.860

2.4 生长参数分布情况

利用 Bootstrap 方法在两个群体中各得到了 1000 组生长参数, 去除部分不合理结果($t_{\text{anchor}} < 0.2$), 所得相对生长曲线分布如图 4 所示。2013—2015 年概率密度最大点所对应的极限体长 L_{inf} 为 188.57, K 为 0.53; 2016—2018 年概率密度最大的点所对应极限体长 L_{inf} 为 176.45, K 为 0.61。

2013—2015 年与 2016—2018 年两个样本的极限体长 L_{∞} 和生长参数 K 概率密度分布均呈现出近似正态分布的形态, 两样本的极限体长和生长参数分布的峰值相距较远, 重叠面积小于 0.05, 表明两个时间段内方氏云鲷生物学参数具有显著差异。2016—2018 年的群体具有更小的 L_{∞} 和更大的 K 峰值(图 5)。

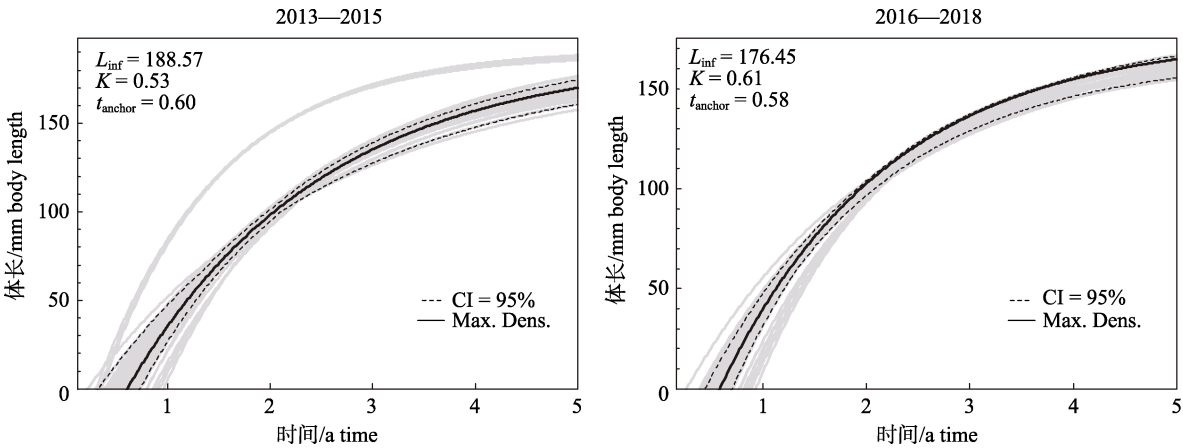


图 4 方氏云鲷相对生长曲线的分布

虚线(CI=95%)表示 95% Bootstrap 置信区间所对应的相对生长曲线, 粗实线(Max.Dens, max density)表示概率密度最大的参数值所对应的相对生长曲线, 对应参数值在坐标系的左上部展示。X 轴所对应的值的含义是时间点, 而并非个体的年龄。

Fig. 4 The distribution of relative growth curves of *Pholis fangi*
The dashed line (CI=95%) represents the relative growth curve corresponding to the 95% Bootstrap confidence interval. The heavy line represents the relative growth curve corresponding to the parameter values with the maximum probability density. Parameter values are showed at the left top of the coordinate system. The values on the X-axis means time, not the age of the individual.

3 讨论

本研究系统评估了 ELEFAN 方法在估算方氏云鲷生长参数中的可靠性, 比较了两个时间段内海州湾方氏云鲷生长参数变化的显著性。研究结果表明, 在海州湾海域, 方氏云鲷的生长参数具有显著变化, 从 2013 到 2018 年, 方氏云鲷群体的渐近体长变小, 生长速率加快。同时, 本研究说明

结合 Bootstrap 的 ELEFAN 方法能够给出较为稳定的参数估计, 受采样随机性的影响较小。该结果表明结合 Bootstrap 的 ELEFAN 方法可以较好地应用于方氏云鲷等数据缺乏的小型渔业评估中。

3.1 生长参数的变化

本研究中, 2016—2018 年的方氏云鲷优势体长组的体长范围小于 2013—2015 年, 使用不同算法对两群体的 VBGF 参数的估计结果较为一致,

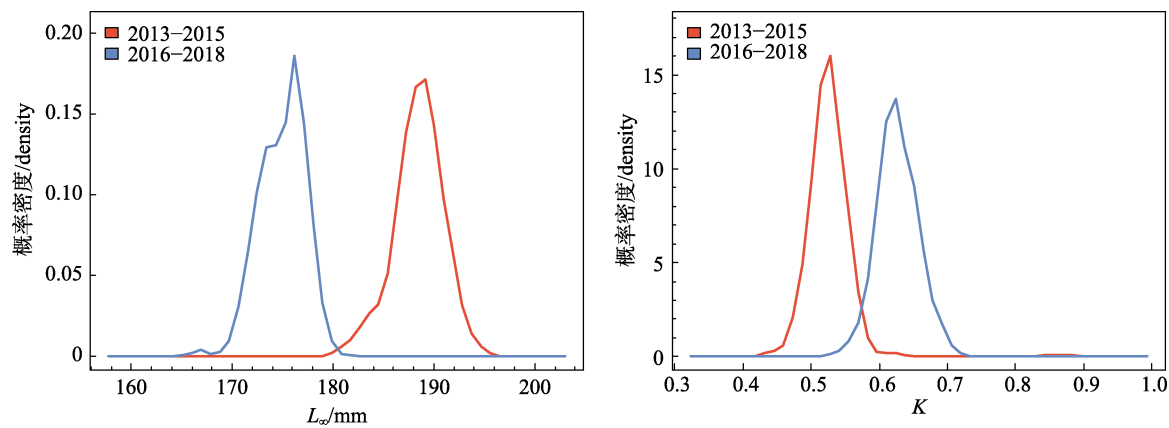


图 5 方氏云鲷 von-Bertalanff 参数 L_{∞} 和 K 的分布在 2013—2015 年与 2016—2018 年的差异
Fig. 5 Differences of von-Bertalanff growth parameters L_{∞} and K in *Pholis fangi* between 2013—2015 and 2016—2018

2016—2018 年的方氏云鲷极限体长 L_{∞} 较小, 生长参数 K 较大, 说明方氏云鲷的体型趋于小型化, 生长速度加快, 产生这样的现象可能是由于该鱼种受过度捕捞和环境变动等因素的胁迫产生了适应性进化^[33]。通常方氏云鲷等小型鱼类在生活史策略上偏向 r 选择类型, 当环境压力较大时, 其可能通过加快生长速度等方式以更早地达到性成熟体长或年龄^[34], 同时其也会通过减小个体大小来减少生存能量付出, 将更多的能量专用于繁殖以应对不良的生存环境。对比相关研究的方氏云鲷生物学参数估计结果, 该现象仍较为明显^[27] (表 2)。不过有研究对大连海域方氏云鲷群体 (1985—1987 年) 进行生长参数的估计, 其参数估计结果 $L_{\infty}=180.8\text{ mm}$, $K=0.3203$, 与本研究的结论存在差异, 可能是由于其使用年龄-体长数据估算方法, 或者是调查海区不同以及样品代表性不足等方面的差异所导致的^[28]。

表 2 不同方氏云鲷群体生长参数的估计结果比较
Tab. 2 Comparison of estimation results about growth parameters of different *Enedrias fangi* stocks

海区 sea area	年份 year	L_{∞}	K
青岛近海 coastal water of Qingdao	2008	190	0.49
海州湾 Haizhou Bay	2013–2015	188.57	0.53
海州湾 Haizhou Bay	2016–2018	176.45	0.61

因此, 本研究认为方氏云鲷群体在近年来具有小型化的趋势。作为海州湾的优势种以及经济鱼类的饵料种, 方氏云鲷在生态系统及食物网中的地位也越来越重要^[2, 35], 其生长参数的变化可

能对其捕食者的能量摄入造成一定的影响, 从而导致其捕食者的摄食结构发生变化, 进而对整个海州湾生态系统产生影响^[36]。

3.2 ELEFAN 方法

研究表明, 当分组组距增大到一定程度时, 拟合优度参数 $Rn_{\max}$ 会接近甚至是等于 1。这与 $Rn_{\max}$ 的算法有关, 随着分组组距的增大会在同一组内合并更多体长不同的个体, 使体长频数分布的峰值个数明显变少, 这样就更容易使曲线穿过全部的正峰值, 从而使 $Rn_{\max}$ 等于 1。不过较大的组距会模糊同一体长分组内个体之间的体长差异, 无法真实反映实际中存在的体长频数分布的峰值。陈国宝等^[37]的研究中提出, 不合理的体长分组组距会导致体长频率分布图难以形成明显的“峰”与“谷”而产生参数估计误差, 因此在进行 ELEFAN 计算前, 可根据先前研究结果将极限体长 L_{∞} 和生长参数 K 限定在一定范围后再进行计算, 排除掉不合理的估计值。本研究结果也表明, 在确定最适分组组距时需结合研究物种的相关生物学信息, 判断其估算的生物学参数 (如 t_{anchor}) 是否严重偏离实际情况, 避免结果仅为“数学上最优”而非“生物学上最优”。

通过 FAO 推出的 FiSAT II 软件中也可以完成 ELEFAN 方法的全部运算过程^[38]。设计者出于使用时简洁性的目的, 将移动平均数的项数固定, 用户无法对这一参数进行修改^[20, 37], 已有研究表明这可能会导致生长参数的估算结果出现较大误差^[25]。本研究结果也表明, 不合理的分组组距所

对应的 Rn_{max} 不仅小于本研究所设定的分组组距 6 mm 所得, 还会计算出不合理的生物学参数。因此在使用 ELEFAN 方法对不同物种或群体进行研究前, 有必要对体长分组组距、移动平均数的项数等参数进行一定的分析, 找出合适的参数设置以确保研究结果的准确性。

VBGF 参数估计的优化方法中, 模拟退火(SA)算法求得 Rn_{max} 要小于其他两种算法。这可能是因为该方法只求得了局部最优解而非全局最优解。此外, 为提高计算精度而设定较高分辨率的情况下, 响应面分析(RSA)算法所需运算时间较长。TropFishR 包中遗传算法(GA)可以进行并行运算, 相比其他两种算法, 使用并行遗传算法不仅显著减少了运算时间, 同时可以提高求解质量^[39]。本研究推荐结合 Bootstrap 的 ELEFAN 方法, 相比传统的单次 ELEFAN 方法, 可以更好地观测生长参数估计的误差, 给出相应的参数分布置信区间, 也更容易求得全局最优解, 从而更准确地对生长参数作出估计与比较。

需要注意的是, 本研究中所采用的 ELEFAN 方法基于以下几点基本假设: (1)VBGF 可以较为准确地描述方氏云鲷的生长; (2)研究种群的生长模式在 3 年的时间区间内没有明显变化; (3)长度的不同是由于年龄的差异所导致的, 不考虑同样年龄个体的体长差异; (4)样品具有足够的代表性, 可以较好地代表海州湾的方氏云鲷种群。这些假设条件是否满足对于估算结果有着重大影响, 需要在今后的研究中进一步探讨。例如, 本研究所用的 VBGF 未考虑许多鱼类存在不同季节的生长差异, 即季节性生长。一些研究引入新的参数对 VBGF 进行修正, 建立了季节性的 VBGF^[40-42]。除 VBGF 之外, 其他类型的生长方程也可以用来描述鱼类生长变化的规律, 如 Ricker 指数生长方程和逻辑斯蒂生长方程等。一般渔业资源评估模型中均采用 VBGF^[43], 而对于特定鱼种而言, 其适合的生长模型需要进一步验证。因此, 今后的研究中应该考虑鱼类生长在季节和年际间的变化, 以更好地应对气候变化、近海环境变化、捕捞压力等对海洋生态系统的胁迫。

参考文献:

- [1] Wang Z F. Research on ecological recovery suitability assessment for Haizhou Bay special marine reserves[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011. [王在峰. 海州湾海洋特别保护区生态恢复适宜性评估[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.]
- [2] Wang X L, Xu B D, Ji Y P, et al. Fish community structure and its relationships with environmental factors in Haizhou Bay and adjacent waters of East China in winter[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1707-1714. [王小林, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 海州湾及邻近海域冬季鱼类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1707-1714.]
- [3] Luan J, Xu B D, Xue Y, et al. Size distribution and length-weight relationships in *Pholis fangi* in Haizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(6): 1323-1331. [栾静, 徐宾铎, 薛莹, 等. 海州湾方氏云鲷体长与体重分布特征及其关系[J]. 中国水产科学, 2017, 24(6): 1323-1331.]
- [4] Li L. Study on morphology and genetics of *Pholis fangi* and *P. nebulosa*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. [李琳. 方氏云鲷和云鲷的形态学与遗传学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.]
- [5] Huang X X, Zeng X Q, Zhang C. The reproductive biology of *Enedrias fangi* in the inshore waters of Qingdao[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(8): 55-59. [黄晓璇, 曾晓起, 张驰. 青岛近海方氏云鲷繁殖生物学的初步研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(8): 55-59.]
- [6] Li S Y. Feed habits of *Enedrias fangi* in Jiaozhou Bay based on stomach contents analysis and stable isotope analysis[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [李世岩. 基于稳定同位素和胃含物分析研究胶州湾方氏云鲷的摄食习性[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.]
- [7] Li L, Song N, Gao T X. Analysis of *Pholis fangi* by control region sequence[C]//Society of Ichthyology of Chinese Society of Oceanology and Limnology, Society of Ichthyology of China Zoology Society. Summary Collection of Symposium Papers. 2012. [李琳, 宋娜, 高天翔. 方氏云鲷群体控制区序列分析[C]//中国海洋湖沼学会鱼类学分会, 中国动物学会鱼类学分会. 2012 年学术研讨会论文摘要汇编. 2012.]
- [8] Li M, Li Z G, Xu B D, et al. Effects of spatiotemporal and environmental factors on the distribution and abundance of *Pholis fangi* in Haizhou Bay using a generalized additive model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(4): 812-819. [李敏, 李增光, 徐宾铎, 等. 时空和环境因子对海州湾方氏云鲷资源丰度分布的影响[J]. 中国水产科学,

- 2015, 22(4): 812-819.]
- [9] Pauly D, Christensen V, Froese R, et al. Fishing down aquatic food webs[J]. American Scientist, 2000, 88(1): 46-51.
- [10] Liu Q G, Shen J Z, Chen M K, et al. Advances of the study on the miniaturization of natural economical fish resources[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(1): 79-83. [刘其根, 沈建忠, 陈马康, 等. 天然经济鱼类小型化问题的研究进展[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(1): 79-83.]
- [11] Ye J Q, Xu Z L, Chen J J, et al. Resources status analysis of large yellow croaker in Guanjingyang using von Bertalanffy growth equation and fishing mortality parameters[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(2): 238-246. [叶金清, 徐兆礼, 陈佳杰, 等. 基于生长和死亡参数变化的官井洋大黄鱼资源现状分析[J]. 水产学报, 2012, 36(2): 238-246.]
- [12] Guo X P, Jin X S, Dai F Q. Growth variation of small yellow croaker (*Pseudosciaena polyactis* Bleeker) in Bohai sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(2): 243-249. [郭旭鹏, 金显仕, 戴芳群. 渤海小黄鱼生长特征的变化[J]. 中国水产科学, 2006, 13(2): 243-249.]
- [13] Zhu J C, Zhao X Y, Li F G. Growth characters of the anchovy stock in the Yellow Sea with its annual and seasonal variations[J]. Marine Fisheries Research, 2007, 28(3): 64-72. [朱建成, 赵宪勇, 李富国. 黄海鲱鱼的生长特征及其年际与季节变化[J]. 渔业科学进展, 2007, 28(3): 64-72.]
- [14] Pilling G M, Apostolaki P, Failler P, et al. Assessment and management of data-poor fisheries[M]// Advances in Fisheries. Blackwell Publishing, 2008, 12: 37-42.
- [15] Costello C, Ovando D, Hilborn R, et al. Status and solutions for the world's unassessed fisheries[J]. Science, 2012, 338(6106): 517-520.
- [16] Bentley N. Data and time poverty in fisheries estimation: potential approaches and solutions[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(1): 323-328.
- [17] Xu B D, Zhang C L, Xue Y, et al. Optimization of sampling effort for a fishery-independent survey with multiple goals[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187: 252.
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Specifications for oceanographic survey (Part 6): Marine biological survey (GB/T 12763.6-2007)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家质量监督检验检疫总局. 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.]
- [19] Bertalanffy L V. A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws. II)[J]. Human Biology, 1938, 10(2): 181-213.
- [20] Pauly D, David N. ELEFAN I, a BASIC program for the objective extraction of growth parameters from length-frequency data[J]. Meeresforschung, 1981, 28: 205-211.
- [21] Bellido J M, Pierce G J, Romero J L, et al. Use of frequency analysis methods to estimate growth of anchovy (*Engraulis encrasicolus* L. 1758) in the Gulf of Cádiz (SW Spain)[J]. Fisheries Research, 2000, 48(2): 107-115.
- [22] Chen Z Z, Qiu Y S. Estimation of growth and mortality parameters of *Parargyrops edita* Tanaka in Beibu Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(3): 251-257. [陈作志, 邱永松. 北部湾二长棘鲷生长和死亡参数估计[J]. 水产学报, 2003, 27(3): 251-257.]
- [23] Chen G B, Qiu Y S. Growth, Mortality and Rational Utilization of Horse Mackerel in Northern South China Sea[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2004, 24(1): 35-40. [陈国宝, 邱永松. 南海北部竹筴鱼的生长、死亡及合理利用[J]. 广东海洋大学学报, 2004, 24(1): 35-40.]
- [24] Jaiswar A K, Chakraborty S K, Raja R, et al. Population dynamics of lizard fish *Saurida tumbil* (Teleostomi/Synodontidae) from Mumbai, west coast of India[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2003, 32(2): 147-150.
- [25] Taylor M H, Mildenerberger T K. Extending electronic length frequency analysis in R[J]. Fisheries Management and Ecology, 2017, 24(4): 330-338.
- [26] Pauly D. A review of the ELEFAN system for analysis of length-frequency data in fish and aquatic invertebrates[C]// ICLARM Conference Proceedings 13, 1987: 7-34.
- [27] Hang X X. Study on the fishery biology of *Enedrias fangi* Wang et Wang in inshore waters of Qingdao[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. [黄晓璇. 青岛近海方氏云鲷(*Enedrias fangi* Wang et Wang)渔业生物学初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.]
- [28] Jiang Z Q, Qin K J. Age and growth of *Enedrias fangi* in Dalian[J]. Journal of Dalian Fisheries College, 1989, 5(1): 33-41. [姜志强, 秦克静. 大连地区方氏云鲷的年龄和生长[J]. 大连水产学院学报, 1989, 5(1): 33-41.]
- [29] Hoggarth D D. Stock assessment for fishery management: A framework guide to the stock assessment tools of the Fisheries Management and Science Programme (FMSP)[M]. Food and Agriculture Organization, 2006.
- [30] Johnson R W. An introduction to the bootstrap[J]. Teaching Statistics, 2010, 23(2): 49-54.
- [31] Bradley E, Tibshirani R J. Introduction to the Bootstrap[M]. New York and London: Chapman & Hall, 1993: 49-54.
- [32] 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.
- [33] Stokes K, Law R. Fishing as an evolutionary force[J]. Ma-

- rine Ecology Progress Series, 2000, 208: 307-309.
- [34] Ernande B, Dieckmann U, Heino M. Adaptive changes in harvested populations: plasticity and evolution of age and size at maturation[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2011, 271(1537): 415-423.
- [35] Liu X F. Study on feeding ecology and food relations of two high trophic level fishes in Haizhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [刘西方. 海州湾两种高营养级鱼类摄食生态及其食物关系研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.]
- [36] Smith A D M, Tam J. Impacts of fishing low-trophic level species on marine ecosystems[J]. Science, 2011, 333(6046): 1147-1150.
- [37] Chen G B, Li Y Z, Chen P M, et al. Optimum interval class size of length-frequency analysis of fish [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(4): 659-666. [陈国宝, 李永振, 陈丕茂, 等. 鱼类最佳体长频率分析组距研究[J]. 中国水产科学, 2008, 15(4): 659-666.]
- [38] Gayanilo F C Jr, Sparre P, Pauly D. FAO-ICLARM Stock Assessment Tools II[M]. Computerized Information, 2005.
- [39] Cantú-Paz E. Designing efficient and accurate parallel genetic algorithms (parallel algorithms)[M]. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [40] Pitcher T J, Macdonald P D M. Two models for seasonal growth in fishes[J]. Journal of Applied Ecology, 1973, 10(2): 599-606.
- [41] Cloern J E, Nichols F H. A von Bertalanffy growth model with a seasonally varying coefficient[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1978, 35(11): 1479-1482.
- [42] Somers I F. On a seasonally oscillating growth function[J]. Fishbyte, 1988, 6: 8-11.
- [43] Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: Agriculture Press, 1995: 25-31. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 农业出版社, 1995: 25-31.]

Evaluating the growth parameters of *Pholis fangi* based on the bootstrap-ELEFAN method

WANG Kun¹, ZHANG Chongliang¹, CHEN Ning¹, REN Yiping^{1,2}

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

2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China

Abstract: Fish stock assessment usually requires a wide range of supporting data, including an abundance index, production, age structure. However, some data are hardly available in many fisheries because of limited research funding and social attention. Therefore, many fisheries, particularly small-scale fisheries, often do not have sufficient data to support fish stock assessment and are considered data-limited or data-poor. An increasing amount of literature has been focused on the development of data-poor stock assessment methods in recent decades, among which electronic length frequency analysis (ELEFAN) is a prevalent method that uses length frequency distribution data to assess the status of fisheries. One crucial application of the ELEFAN is the estimation of growth parameters in the Von Bertalanffy growth function (VBGF). However, the method is based on certain optimization algorithms and cannot provide information on its precision or confidence intervals for growth parameters, which implies that the reliability of ELEFAN needs to be tested in future studies. This study used a bootstrap approach to evaluate the uncertainty of the ELEFAN method based on the survey data of *Pholis fangi* in Haizhou Bay. This species is one of the dominant species in Haizhou Bay and plays an important role in the food web and ecosystem of the Yellow Sea. Although the declines in fishery resources have drawn increasing attention in many regions of the world, relevant studies have commonly focused on large-scale fisheries, whereas small-scale fisheries, such as that of *P. fangi*, has been largely overlooked. Therefore, the biological characteristics of this species and their temporal changes is not well understood. This study was focused on the temporal changes in VBGF growth parameters of *P. fangi* in Haizhou Bay at different survey periods. We conducted annual bottom trawl surveys in Haizhou Bay in the spring and autumn from 2013 to 2018, and used the ELEFAN method to estimate the VBGF growth parameters infinite length (L_{∞}) and growth parameter (K) of *P. fangi*. In addition, the bootstrapped ELEFAN was used to evaluate the variation in the growth parameters, and the difference was compared between 2013–2015 and 2016–2018. We analyzed the robustness of ELEFAN with respect to three aspects: (1) the effect of bin size of body length on parameter estimation, (2) the selection of different optimization algorithms (Simulated Annealing, SA; Genetic Algorithm, GA; Response Surface Analysis, RSA), and (3) the confidence intervals of parameter estimation through the bootstrap approach. The results showed that the VBGF growth parameters of *P. fangi* in Haizhou Bay changed significantly during 2013–2018, and the decreased infinite length (L_{∞}) and increased growth parameter (K) indicated that there was a significant trend of miniaturization. The bin size of body length significantly affected the goodness of model fit and improper bin size settings might lead to unreasonable parameter estimations. Bootstrapped ELEFAN provided robust parameter estimations compared to the conventional ELEFAN approach, and the bootstrapped results were less affected by the randomness of sample data. The Genetic Algorithm could benefit from parallel computing in the TropfishR package, which significantly sped up computation. This study improved the understanding of population dynamics of *P. fangi*. In particular, the changes of growth characteristics of this species may have a substantial impact on the Haizhou Bay ecosystem. We demonstrated that bootstrapped ELEFAN performed well and could be applied to the prevalent data-poor and small-scale fisheries.

Key words: *Pholis fangi*; von-Bertalanffy growth parameter; ELEFAN; bootstrap

Corresponding author: ZHANG Chongliang. E-mail: Zhanglelg@163.com