

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19264

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

陈锦辉^{1,2}, 王学昉^{2,3,4}, 田思泉^{2,3,4,5,6}, 高春霞^{2,3,4,6}, 麻秋云^{2,3,4}, 刘志豪^{2,3}

1. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092;
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 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;
6. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306

摘要: 大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)作为一种具有极高经济价值的公海金枪鱼捕捞对象, 其资源状况和管理情况一直受到学者的高度关注, 而对其生活史特征, 尤其是生长特征的研究, 是对大眼金枪鱼进行准确资源评估和合理养护管理的基础和关键部分。本研究基于中国科学观察员于 2013—2018 年收集的印度洋大眼金枪鱼生物学数据, 通过体长-体重关系研究其生长特征, 并运用线性混合效应模型分析其生长特征在不同年份、季度和海域间的差异。依据收集的 8806 尾大眼金枪鱼样本, 求得其上颌叉长 FL 和加工重量 GT (去掉鳃、尾鳍和内脏后的重量)之间的幂函数关系式, 其中条件因子 a 的估计均值(95%置信区间)为 $1.07 (0.99\sim 1.14)\times 10^{-5}$, 异速生长参数 b 的估计值(95%置信区间)为 3.08 (3.07~3.10)。本研究构建了 7 个不同异质性组合的混合效应模型, AIC 值和均方根误差值均表明同时考虑年份、季度和区域差异的模型拟合效果最佳。最佳模型的结果表明, 印度洋 15°S 以南和以北海域的大眼金枪鱼个体生长特征差异极小, 北部个体仅略重于南部个体; 相比于第三和第四季度, 相同体长的大眼金枪鱼在第一和第二季度具有更多的重量; 2015 年和 2016 年采集的个体在同样体长时体重更重, 而 2014 年和 2017 年的大眼金枪鱼体重比其他年份更轻。本研究结果旨在为大眼金枪鱼的资源评估及渔业管理提供基础资料, 异质性的研究方法也可以应用于其他近海、远洋渔业种类的生活史特征、种群特征和资源评估研究。

关键词: 远洋渔业; 热带金枪鱼; 体长-体重关系; 混合效应模型; 时空差异

中图分类号: S931 文献标志码: A 文章编号: 1005-8737-(2020)05-0570-09

金枪鱼渔业是中国远洋渔业的支柱产业, 而大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)是金枪鱼船队在印度洋的两个捕捞目标之一, 早在 1995 年中国已有渔船赴印度洋捕捞大眼金枪鱼, 渔获产量在 2005 年达到最高值(8867 t)。近年来因国际渔业管理组织的限捕管理, 中国在印度洋的大眼金枪鱼产量维持在约 4000 t 水平, 占印度洋金枪鱼船队总产量的 1/3 以上, 且其经济价值较高, 为中国创造了较高的远洋渔业收益^[1-2]。

大眼金枪鱼不仅是中国研究和关注的重要种类, 也因其极高的经济价值和公海水域的高度洄游性, 成为世界各国消费、捕捞和研究的焦点。印度洋大眼金枪鱼由印度洋金枪鱼管理委员会 (Indian Ocean Tuna Commission, IOTC) 统一管理, 每 3 年 IOTC 的热带金枪鱼工作组将集中对其进行数据统计分析、CPUE (Catch per Unit Effort) 标准化和资源评估, 进而对其养护管理措施进行修订和完善, 以期保持该种群和渔业的可持续健康

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2019-10-15.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”项目(2019YFD0901404); 国家自然科学基金项目(31902372); 中国博士后科学基金面上项目(2019M651475); 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室开放基金(2019301101).

作者简介: 陈锦辉(1974-), 男, 研究员, 研究方向为水生野生动植物保护. E-mail: 1114260882@qq.com

通信作者: 麻秋云, 博士后, 研究方向为渔业生物学和种群动力学. E-mail: qyma@shou.edu.cn

发展^[3]。作为渔业资源管理和评估的基础,生活史特征尤其是生长特征的研究一直备受关注,也是数据收集和统计的重点^[4-6]。生长特征的研究直接影响到大眼金枪鱼种群动态的评价、种群结构的分析和其资源评估结果。

大眼金枪鱼作为大洋中长距离高度洄游的种类^[7],其个体生长在不同时空下,因饵料、水文、气候等因素的影响会表现出不同的发育特征,进而影响到其种群不同的时空结构^[4]。大眼金枪鱼是海洋生态系统食物链顶端的高级捕食者,其他种类通过捕食关系直接或间接地影响其饵料资源,因此对于大眼金枪鱼生活史特征的基础研究不仅能反映其栖息环境的变化,也能够反映生态系统中其他种类的影响,这对于认识远洋生态系统及其重要种类特征都具有重要意义。本研究根据中国印度洋金枪鱼船队上科学观察员采集的生物学数据,分析研究大眼金枪鱼的生长特征,并探讨生长特征的时空差异,为其更全面的资源评估和渔业管理提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据取自我国印度洋远洋渔业船队 2013—2018 年的观察员数据。以大眼金枪鱼为目标鱼种的金枪鱼渔船主要在印度洋西部海域作业(39.5°S~10.5°N, 23.5°E~90°E, 图 1),其作业方式

为延绳钓,钓钩主要为日式钓钩(尺寸为 10.16 cm 或者 10.67 cm),主要饵料为鲐和沙丁鱼。随船科学观察员记录渔船每次作业的时间和经纬度,并在渔获物中随机选取一定数量的大眼金枪鱼样本(每一采样点取 30 尾,不足 30 尾的全取),测量其长度、重量、性别、摄食等生物学特征。本研究为分析大眼金枪鱼的生长特征及其时空差异,选用的数据包括大眼金枪鱼的体长(即上颌叉长 FL, cm)、加工重量 GT(去掉鳃、尾鳍和内脏后的加工重量, kg)、作业的时间和地点(经纬度)等。本研究分析了 2013—2018 年共计 8806 个大眼金枪鱼样本,不同年份、季度和区域间样本数量存在较大差异(表 1)。

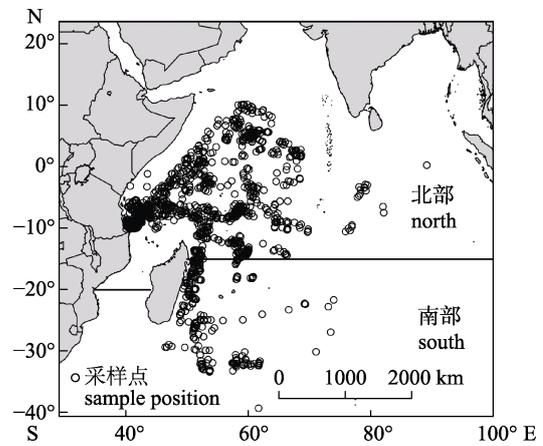


图 1 2013—2018 年印度洋大眼金枪鱼数据采集位置
Fig. 1 The sampling positions of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean from 2013 to 2018

表 1 2013—2018 年印度洋大眼金枪鱼生物学数据

Tab. 1 Biological data for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean from 2013 to 2018

年份 year	第 1 季度 the 1st quarter		第 2 季度 the 2nd quarter		第 3 季度 the 3rd quarter		第 4 季度 the 4th quarter		总计 total
	北部 north	北部 north	北部 north	南部 south	北部 north	南部 south	北部 north	南部 south	
2013							622		622
2014	288				5	25			318
2015							164		164
2016	235						1478	48	1761
2017	601		378		358	64	1316	599	3316
2018	27		257		447	322	1458	114	2625

1.2 生长特征

本研究依据体长-体重关系分析了大眼金枪鱼的生长特征。采用幂函数的体长-体重关系方程^[8],并假设其误差为对数正态分布:

$$W = aL^b e^\varepsilon, \varepsilon \in N(0, \sigma_w^2) \quad (1)$$

式中, W 为个体重量(kg), L 为长度(cm), a 为条件因子, b 为异速生长参数。为便于计算,本文将该方程进行了对数转化:

$$\ln W = \ln a + b \ln L + \varepsilon, \varepsilon \in N(0, \sigma_w^2) \quad (2)$$

1.3 异质性分析

本研究应用广义线性模型(generalized linear model, M1)拟合大眼金枪鱼体长-体重关系的一般特征,用线性混合效应模型量化其体长-体重关系的时空异质性(M2~M8,表2)。基于 IOTC 对大眼金枪鱼的研究和管理,尤其是 CPUE 标准化和资源评估,均以年-季度为时间间隔^[9-10];基于大眼金枪鱼的分布和不同作业方式的主要渔场分布,本研究以 15°S 为界将印度洋分为南北两个海域,而北部海域又以 80°E 为界分为东部和西部^[9-10]。由于我国大眼金枪鱼船队在印度洋东部海域作业极少(图 1),难以获得大眼金枪鱼样本,因此本文只研究了印度洋西部海域大眼金枪鱼的生长差异。

表 2 印度洋大眼金枪鱼体长-体重关系的拟合模型及其 AIC 值和均方根误差 RMSE

Tab. 2 The constructions, AIC and root mean squared error (RMSE) of the alternative models for length-weight relationships of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

模型 model	随机效应 random effect	AIC	RMSE
M1	无 none	-11194	0.611
M2	季度 quarter	-11504	0.588
M3	年份 year	-12061	0.575
M4	区域 region	-11313	0.611
M5	季度+年份 quarter+year	-12365	0.571
M6	季度+区域 quarter+region	-11551	0.585
M7	年份+区域 year+region	-12092	0.573
M8	季度+年份和区域 quarter+year+region	-12365	0.568

注: M1 为广义线性模型, M2~M8 为混合效应模型。

Note: M1 is the generalized linear model, and M2~M8 are the mixed effects models.

在混合效应模型中,各参数分为固定效应和随机效应两个部分,固定效应用于反映种类生长特征的平均情况,而随机效应用于分析不同数据来源造成的异质性^[11-12]。来自不同的年份(2013—2018)、季度(4个季度)和地区(北部和南部)的随机效应应用于条件因子 a , 即:

$$\ln W = \ln a + b \ln L + \varepsilon = (\text{FE} + \text{RE}) + b \ln L + \varepsilon \quad (3)$$

式中, FE 为其固定效应(fixed effects), RE 为随机效应(random effects)。

基于随机效应的不同组合,本研究共构建了 7 个混合效应模型(M2~M8,表 2),其随机效应分

别来自季度(M2, RE=RE_q)、年份(M3, RE=RE_y)、区域(M4, RE=RE_r)、季度+年份(M5, RE=RE_q+RE_y)、季度+区域(M6, RE=RE_q+RE_r)、年份和区域(M7, RE=RE_y+RE_r)和季度+年份+区域(M8, RE=RE_q+RE_y+RE_r)。

通过计算 AIC (akaike information criterion)值和均方根误差(root mean squared error, RMSE)值来比较不同模型的拟合效果,两者值越小,则表明模型的拟合效果越好^[13-14]。其计算公式分别为:

$$\text{AIC} = 2k - 2 \ln(\text{LH}) \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (5)$$

式中, k 为参数的数量, LH 为似然函数, N 为样本数量, \hat{y} 为拟合值, y 为观测值。本研究的数据处理和分析均在 R 语言中(version: R i386 3.6.0)通过程序包 lme4 和 nlme 来完成^[15-16]。

2 结果与分析

8806 尾大眼金枪鱼样本大多于 2017 和 2018 两个年度在印度洋北部的热带海域采集,且第一季度和第四季度的样本采集数量较多(表 1)。本研究收集的大眼金枪鱼样本的叉长范围是 51~203 cm,平均叉长 137 cm,优势叉长组为 100~170 cm;去鳃、尾和内脏后的重量范围为 2.5~138.0 kg,平均重量 45.0 kg,重量多集中在 10~80 kg。而 2016 年的大眼金枪鱼样本的长度和重量范围,与 2013—2015 年相比都更广(图 2,图 3)。

基于广义线性模型(M1),求得大眼金枪鱼体长-体重关系中的 $\ln a$ 的估计均值为 -11.45, 95% 置信区间(confidence interval, CI)为 -11.52~-11.38,对应的条件因子 a 均值为 1.07×10^{-5} , 95% CI 为 $0.99 \times 10^{-5} \sim 1.14 \times 10^{-5}$; 异速生长参数 b 的估计均值为 3.08, 95% CI 为 3.07~3.10。M1 的模拟曲线与观测值的拟合效果较好(图 4)。

所有 7 个混合效应模型(M2~M8)的 AIC 值和 RMSE 值均显著小于 M1,而其中同时考虑季度、年份和区域的模型(M8)拟合效果最好,其 AIC 值和 RMSE 值均最小(表 2)。说明印度洋大眼金枪鱼的体长-体重关系具有显著的时空差异。依据最优

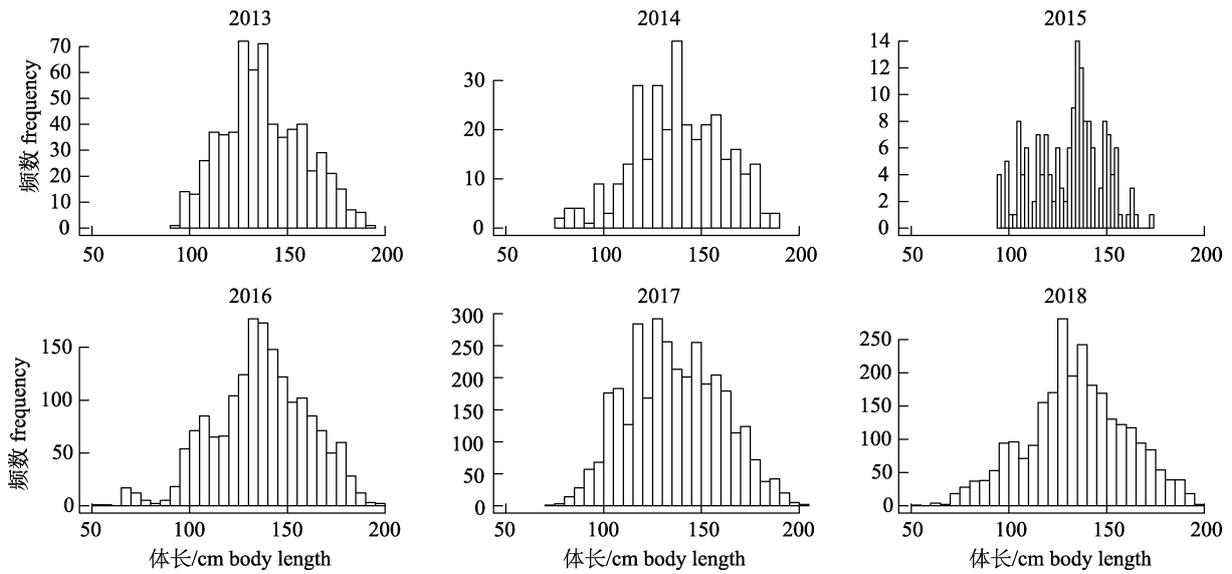


图 2 2013—2018 年间印度洋大眼金枪鱼长度频率的差异
Fig. 2 The length variations of *Thunnus obesus* during 2013–2018 in the Indian Ocean

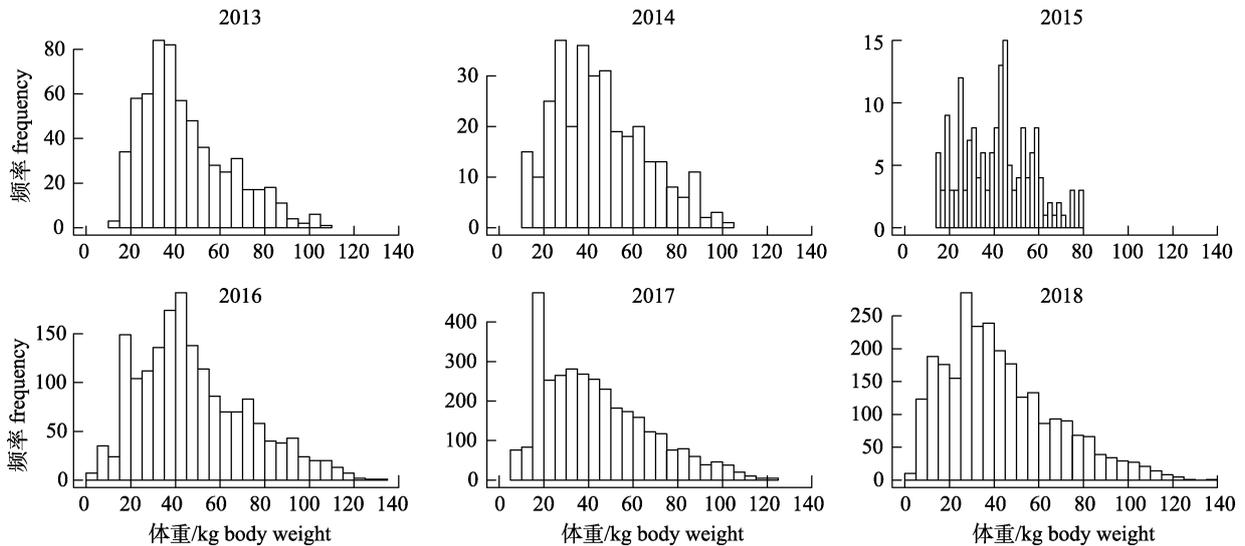


图 3 2013—2018 年间印度洋大眼金枪鱼重量频率的差异
Fig. 3 The weight variations of *Thunnus obesus* during 2013–2018 in the Indian Ocean

模型 M8 的结果, 本文得到了位于不同时空的大眼金枪鱼的条件因子 a 的估计值(表 3)及其体长-体重关系曲线(图 5~图 7)。

印度洋南部和北部海域的大眼金枪鱼, 其体长-体重关系差异极小, 北部个体仅略重于南部个体(图 5)。在体长相同的情况下, 大眼金枪鱼在第一和第二季度获得更多的重量, 而在第三和四季度重量增加较小(图 6)。2015 年和 2016 年采集的大眼金枪鱼个体在同样体长时体重更大, 而

2014 年和 2017 年的体重非常接近且比其他年份更轻(图 7)。最优模型 M8 的固定效应也给出了大眼金枪鱼生长的一般特征: $W=1.26 \times 10^{-5} L^{3.05}$ 。

3 讨论

本研究依据大量的观测数据分析了印度洋西部海域大眼金枪鱼在 2013—2018 年的生长特征及其时空异质性。研究表明, 大眼金枪鱼的上颌叉长(L)与加工重量(W)的关系式为 $W=1.26 \times 10^{-5} L^{3.05}$,

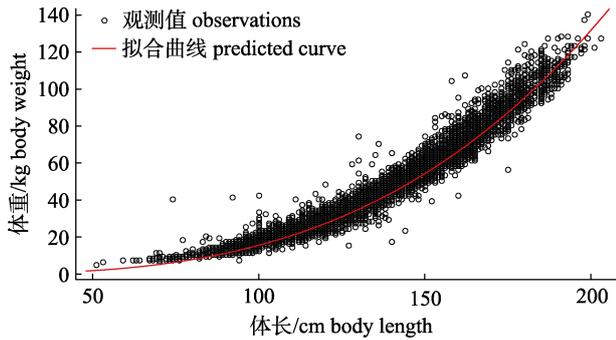


图 4 印度洋大眼金枪鱼体长-体重关系的观测值和广义线性模型对其的拟合曲线

Fig. 4 The observations and predicted curve from the generalized linear model for length-weight relationships of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

表 3 印度洋大眼金枪鱼体长-体重关系中参数 a 估计值的时空差异

Tab. 3 The spatial and temporal variations of a estimates in the length-weight relationships for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

异质性 variation	随机效应 random effect	$\ln a$	$a (\times 10^{-5})$
北部 north	0.00334	-11.28	1.26
南部 south	-0.00334	-11.29	1.26
第 1 季度 the 1st quarter	0.042859	-11.24	1.32
第 2 季度 the 2nd quarter	0.019195	-11.26	1.28
第 3 季度 the 3rd quarter	-0.03812	-11.32	1.21
第 4 季度 the 4th quarter	-0.02393	-11.31	1.23
2013	-0.0093	-11.29	1.25
2014	-0.05052	-11.33	1.20
2015	0.084914	-11.20	1.37
2016	0.05424	-11.23	1.33
2017	-0.04559	-11.33	1.20
2018	-0.03376	-11.32	1.22

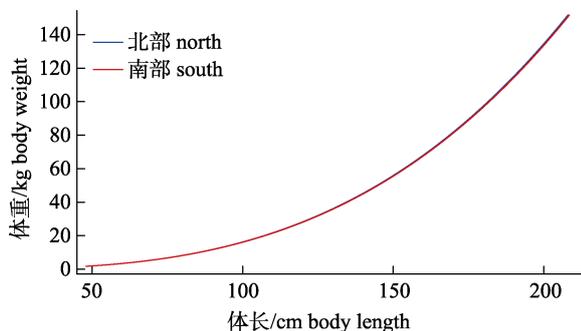


图 5 印度洋大眼金枪鱼体长-体重关系在不同地区的差异

Fig. 5 The spatial variations of length-weight relationships for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

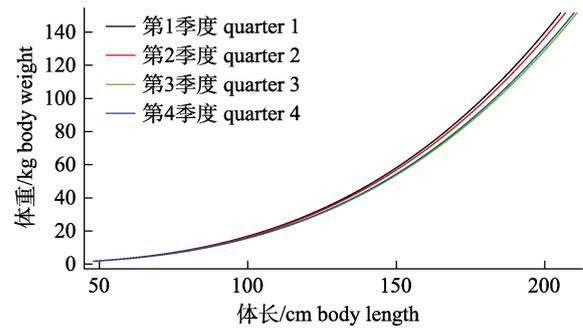


图 6 印度洋大眼金枪鱼体长-体重关系在不同季度的差异

Fig. 6 The variations of length-weight relationships in different quarters for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

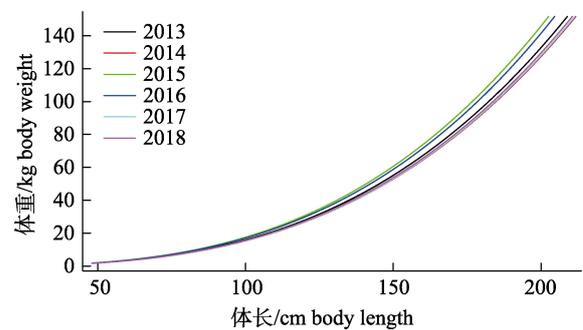


图 7 印度洋大眼金枪鱼体长-体重关系在不同年份的差异

Fig. 7 The variations of length-weight relationships in different years for *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

表明大眼金枪鱼体型为梭形且生长模式为等速生长。混合效应模型的研究结果表明,虽然引入 15°S 南北部海域的地区差异数据可以提高模型的误差解释率,但两个海域的大眼金枪鱼个体并没有明显的生长差异。而生长特征的时间差异则比较显著,在体长相同的情况下,大眼金枪鱼在上半年的体重增加幅度要优于下半年,2015 年和 2016 年采集个体的体重更大,其差异在大个体上反映更加明显。

不同年份、季度和区域存在样本采集数量的差异,可能造成异质性的研究结果有一定的不确定性。例如本研究中,2013 年的大眼金枪鱼样本均产自第四季度的北部海域,而大多数 2014 年的样本产自第一季度的北部海域。虽然混合效应模型可以综合分析不同数据来源的异质性,但时空均匀且充足的样本更具有代表性,也更能准确地估算其异质性。因此将来的样本调查和数据采集

也需侧重各样本在不同时空的代表性。

由于本研究数据均来自于渔业生产数据,采集的重量信息为加工重量 GT(加工去掉鳃、尾和内脏后重量, kg), 长度为上颌叉长 FL(cm), 这与其他文献基于科研调查数据收集的全重 TW 和全长 TL 之间存在一定的差异, 例如 Fishbase 中大眼金枪鱼全重(g)和全长(cm)关系式中参数 a 和 b 的值分别为 0.01318 和 3.02, b 值基本一致, 但 a 值差异极大。运用去掉鳃、尾和内脏后的加工重量, 可以去除个体因为性腺发育、短时间摄食的剧烈变化等对体重造成的影响, 而使用上颌叉长可以减少测量易损尾鳍时造成的全长测量误差。但这也造成和其他研究结果进行比较验证过程的困难, 其加工重量和全重的关系, 以及叉长与全长的关系, 都亟待丰富数据和进一步的研究。李凤莹^[17]的研究表明大眼金枪鱼 $TL=1.06 \times FL+2.21$ ($R^2=0.996$), 但该研究取自 2008—2009 年间共 9 个月在印度洋中南部海域的样本, 鉴于生长特征的显著年间差异, 该关系式的应用也需要更周全的考虑和校正。此外加工重量和全重的关系也需要相关研究, 因此用本研究结果来反映全重与全长的关系需要更进一步的补充研究。

本研究采用了混合效应模型分析了印度洋大眼金枪鱼生长特性的时空差异特征, 分别将区域、季度和年份作为随机效应应用于条件因子 a 上。相比于简单的广义线性模型, 混合效应模型既能够通过固定效应反映数据的一般特征, 又能够通过随机效应同时反映不同数据来源的差异性, 而不必同时构建多个的线性模型。即在本研究中, 模型 M8 的参数 a 和 b 的固定效应分别为 1.26×10^{-5} 和 3.05, 反映了大眼金枪鱼生长模型的一般特征; 而随机效应则给出了南北部水域、4 个季度和 2013—2018 年 6 个年份中样本的差异。不必构建 $2+4+6=12$ 个广义线性模型来求解时空差异, 因此混合效应模型不仅更加简洁高效, 也能够减少模型求解过程中参数过度拟合的问题^[12, 18]。目前该方法在生物学和渔业科学领域的应用日益广泛, 在中国近海小黄鱼的生活史特征和黄鲔的体长体重-关系等均有成熟完善的研究^[19-20], 该方法也可以进一步扩展到其他近海、远洋渔业种

类的生活史特征、种群特征研究和资源评估等更广阔的领域。

中国对大眼金枪鱼的捕捞作业早于 20 世纪 90 年代, 而相关研究自 2000 年之后才逐渐丰富, 且早期多集中于其渔场分布和渔具开发与优化等方面^[21-22], 近期开始扩展至摄食生态、DNA 分析、生长特征和简单的资源评估等方面^[23-26]。关于大眼金枪鱼的研究多集中于太平洋, 印度洋和大西洋的研究相对较少^[27-29], 近年来随着我国数据收集的增多, 研究才逐渐扩展, 但仍集中于短时间内小范围的研究^[24, 28], 而本研究基于 6 年来中国印度洋作业海域的所有大眼金枪鱼生物学数据, 更加全面研究了大眼金枪鱼的生长特征, 而且重点分析了之前研究中很少涉及的时空异质性。

对鱼类生长、死亡等生活史特征的准确理解, 是研究其种群动力学的基础, 进而直接影响对该资源的准确评估, 以及该渔业是否被合理管理以实现可持续开发。例如体长是科学调查以及渔业生产调查中最易采集的信息, 相比于重量, 长度更容易测量, 而在计算渔获量、分析资源量的过程中, 则需要体长-体重关系来求解个体重量; 此外在单位补充量产量模型、年龄结构模型等资源评估模型中, 体长-体重关系都是必不可少的内容。个体生长特征的异质性可能直接导致其种群动力学的变化, 若其生长特征存在时空差异, 则在资源评估过程中需要考虑不同时空的种群是否存在显著的不同, 进而采取不同的评估方法和渔业管理办法。总之, 本研究的大眼金枪鱼生长特征及其时空异质性作为基础性研究, 可为 IOTC 在其资源评估和渔业管理中提供必要参考, 值得充分考虑和重视。

近年来随着生态保护意识和资源可持续开发观念的逐渐深入, 以及世界各国渔业资源捕捞强度的过度增加, 国际上对于公海海域渔业资源的管理日趋严格。全球三大洋的金枪鱼渔业均有相关的区域性国际渔业管理组织(Regional Fisheries Management Organizations, RFMOs)进行研究和管理工作。RFMOs 研究渔业种群的种群特征、定期进行资源评估, 进而制定并定期修订其养护管理措施^[30]。为维护我国远洋渔业的利益, 同时也随着

我国渔业科学的发展,我国对于远洋渔业种群的研究逐渐增强,并进一步完善。目前所有远洋渔船均需提交捕捞作业的渔捞日志,汇总渔业生产数据,此外每年都有 5% 的远洋渔船配备科学观察员,采集更加丰富和详细的样本数据^[2],也正是由于观察员收集的丰富数据,本研究才能够涵盖更广的时空区域,进而分析其时空异质性。今后随着数据积累的逐渐丰富以及中国科研实力的增强,有望对大眼金枪鱼有更广范围和更深层次的研究,为充分了解热带金枪鱼种群及其生态系统特征提供基础资料,为维护我国远洋渔业利益提供科学建议和依据。

致谢: 诚挚感谢上海海洋大学科学观察员师生和远洋渔船船员的样本采集和数据测量工作;感谢韩东燕博士在论文撰写和修改过程中提供的建议和帮助。

参考文献:

- [1] Xu L X, Dai X J. National report of China in IOTC waters in 2004[R]. Indian Ocean Tuna Commission, IOTC-2005-SC-INF13, Rome, 2005.
- [2] Zhu J F, Wu F, Yang X M. National report to the scientific committee of the Indian Ocean Tuna Commission (China)[R]. Indian Ocean Tuna Commission, IOTC-2018-SC21-NR02, Rome, 2018.
- [3] Indian Ocean Tuna Commission. Compendium of active conservation and management measures for the Indian Ocean Tuna Commission[R]. Rome, 2018.
- [4] Zhu J F, Maunder M N, Aires-Da-Silva A M, et al. Estimation of growth within stock synthesis models: Management implications when using length-composition data[J]. Fisheries Research, 2016, 180: 87-91.
- [5] Eveson P, Million J, Sardenne F, et al. Updated growth estimates for skipjack, yellowfin and bigeye tuna in the Indian Ocean using the most recent tag-recapture and otolith data[R]. Indian Ocean Tuna Commission, Rome, 2012.
- [6] Hallier J P, Bernard S, Olivier M, et al. Growth of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern Atlantic Ocean from tagging-recapture data and otolith readings[R]. International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Rome, 2005, 57(1): 181-194.
- [7] Dagorn L, Bach P, Josse E. Movement patterns of large bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the open ocean, determined using ultrasonic telemetry[J]. Marine Biology, 2000, 136(2): 361-371.
- [8] Keys A B. The weight-length relation in fishes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1928, 14(12): 922-925.
- [9] Hoyle S D, Kim D N, Lee S I, et al. Collaborative study of tropical tuna CPUE from multiple Indian Ocean longline fleets in 2016[R]. Indian Ocean Tuna Commission, Rome, 2016.
- [10] Langley A. Stock assessment of bigeye tuna in the Indian Ocean for 2016—model development and evaluation[R]. Indian Ocean Tuna Commission, Rome, 2016.
- [11] Cnaan A, Laird N M, Slasor P. Using the general linear mixed model to analyse unbalanced repeated measures and longitudinal data[J]. Statistics in Medicine, 1997, 16(20): 2349-2380.
- [12] Aggrey S E. Logistic nonlinear mixed effects model for estimating growth parameters[J]. Poultry Science, 2009, 88(2): 276-280.
- [13] Akaike H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [14] Burnham K P, Anderson D R. Model Selection and Multi-model Inference: A Practical Information-Theoretic Approach[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2002: 181.
- [15] Pinheiro J C, Bates D M. Fitting linear mixed-effects models[M]//Mixed-Effects Models in S and S-PLUS. New York: Springer, 2000: 133-199.
- [16] Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, et al. nlme: Linear and nonlinear mixed effects models[CP/OL]. (2020-03-04). <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- [17] Li F Y. The age and growth of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the south-central Indian Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [李凤莹. 印度洋中南部大眼金枪鱼年龄与生长研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [18] Schinckel A P, Adeola O, Einstein M E. Evaluation of alternative nonlinear mixed effects models of duck growth[J]. Poultry Science, 2005, 84(2): 256-264.
- [19] 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.
- [20] 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鲛鲷体长体重关系的时空差异[J]. 中国水产科学, 2018, 25(6):

- 1299-1307.]
- [21] He S, Wang X F, Dai X J, et al. Relationship between change of bigeye tuna catches by Chinese tuna purse seine fleets and FAD closure[J]. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(5): 110-116. [何珊, 王学昉, 戴小杰, 等. 中国金枪鱼围网船队大眼金枪鱼渔获物的特征变化与人工集鱼装置禁渔期的关系[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(5): 110-116.]
- [22] Yang S L, Wu Y M, Zhang B B, et al. Relationship between fishing grounds temporal-spatial distribution of *Thunnus obesus* and thermocline characteristics in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 281-290. [杨胜龙, 伍玉梅, 张怵怵, 等. 中西太平洋大眼金枪鱼中心渔场时空分布与温跃层的关系[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 281-290.]
- [23] Zhou C, Zhu G P, Chen J T, et al. Relationship between age and growth of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the southern Indian Ocean[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(3): 536-544. [周成, 朱国平, 陈锦淘, 等. 印度洋南部大眼金枪鱼年龄鉴定及其与生长的关系[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(3): 536-544.]
- [24] Song L M, Zhao H L, Li D J. Relationship between age and muscle fat content of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the western and central Indian Ocean[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(4): 741-747. [宋利明, 赵海龙, 李冬静. 印度洋中西部大眼金枪鱼年龄与鱼体脂肪含量的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(4): 741-747.]
- [25] Zheng X C, Dai X J, Zhu J F, et al. Analysis on stomach content of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the east-central Pacific Ocean[J]. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(1): 75-80. [郑晓春, 戴小杰, 朱江峰, 等. 太平洋中东部海域大眼金枪鱼胃含物分析[J]. *南方水产科学*, 2015, 11(1): 75-80.]
- [26] Zhu J F. Stock assessment of big-eye tuna *Thunnus obesus* in eastern Pacific Ocean: A comparative study of the full and the simplified SS3 model[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(3): 12-21. [朱江峰. 运用SS3评估东太平洋大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)资源——复杂模型和简化模型的比较[J]. *渔业科学进展*, 2017, 38(3): 12-21.]
- [27] Liu T. Preliminary study on the biological characteristics and stock status of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [刘涛. 印度洋大眼金枪鱼生物学特征及资源状态初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [28] Li D J. Using vertebra and fin spine study age and growth of bigeye tunain the Western Central Indian Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [李冬静. 利用鳍棘和脊椎骨研究印度洋中西部大眼金枪鱼的年龄与生长[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [29] Wang W T, Tian S Q, Dai X J, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of size for *Thunnus Obesus* in the Central Atlantic Ocean based on logbook data[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(5): 770-777. [汪文婷, 田思泉, 戴小杰, 等. 中大西洋延绳钓渔业大眼金枪鱼体长频率时空分布[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(5): 770-777.]
- [30] Xu L X, Dai X J. Management of Indian Ocean Tuna Fisheries[M]. Beijing: Science Press, 2019. [许柳雄, 戴小杰. 印度洋金枪鱼渔业管理[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]

Growth heterogeneity of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean explored by the mixed effects model

CHEN Jinhui^{1,2}, WANG Xuefang^{2,3,4}, TIAN Siqian^{2,3,4,5,6}, GAO Chunxia^{2,3,4,6}, MA Qiuyun^{2,3,4}, LIU Zhihao^{2,3}

1. Shanghai Aquatic Wildlife Conservation and Research Center, Shanghai 200092, China;
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, 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, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
6. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: As a commercially important tuna in the high seas, bigeye tuna (*Thunnus obesus*) has become one of the most important target species in Chinese distant-water fisheries. The research and management of *T. obesus* is receiving more interest, especially for its life history, stock assessment, and fishery management. The fish life history traits including growth, is the fundamental and key process of population dynamics and stock assessment, with an increasing attention in recent years. Based on the data collected by Chinese observers onboard from 2013 to 2018, the growth of the bigeye tuna was analyzed, with the spatial-temporal variations. A total of 8806 individuals were measured, including the wet weight (kg; after removing gills, gut, and tail) and fork length (cm). The predicted power length-weight function indicated that the estimated condition factor a is $1.07 (0.99-1.14) \times 10^{-5}$, while the estimated allometric growth parameter b is $3.08 (3.07-3.10)$. Mixed effects models were established to estimate the variations from different years, quarters, and regions, while 7 model candidates were considered with different random effect sources. AIC (Akaike Information Criterion) and Root Mean Square Error values revealed that the mixed effect model performed best with all variations from years, quarters, and regions. Results from the best model indicated that: (1) there were no substantial differences between bigeye tuna in the north or south Indian Ocean divided by 15°S ; (2) individuals collected in the first and second quarters tended to gain more weight than those collected in the third and fourth quarters at the same longitude; and (3) individuals collected in 2015 and 2016 grew better, while those collected in 2014 and 2017 gained much less weight at the same fork length. The outcome from this study could assist the stock assessment and fishery management for this important tuna species in the Indian Ocean, and the methodology used in this paper can also be applied to the heterogeneity studies of other species in both coast water and far ocean.

Key words: distant-water fisheries; trophic tuna; length-weight relationship; mixed effects model; spatial-temporal variations

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