

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17303

印度洋长鳍金枪鱼资源评估的影响因素分析

官文江^{1,2}, 朱江峰^{1,2}, 高峰^{1,2}

1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306;
2. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306

摘要: 多个模型被用于印度洋长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)的资源评估, 但这些模型的评估结果均存在较大的不确定性, 为此, 本文对影响印度洋长鳍金枪鱼资源评估的因素进行了分析。分析结果认为: (1) 由于渔业数据存在不报、漏报或混报及采样样本数过低、采样协议出现变化等问题, 造成印度洋长鳍金枪鱼渔业的渔获量、体长组成或年龄组成数据存在质量问题; (2) 尽管对单位捕捞努力渔获量(catch per unit effort, CPUE)进行了标准化, 但目标鱼种变化及捕捞努力量空间分布变化仍严重影响了标准化 CPUE 数据的质量; (3) 印度洋长鳍金枪鱼的种群生态学及繁殖生物学研究仍比较薄弱, 种群结构、繁殖、生长、自然死亡信息比较缺乏, 在资源评估中, 相关参数设置需借用其他洋区的研究结果; (4) 海洋环境对印度洋长鳍金枪鱼的资源变动与空间分布具有显著影响, 但评估模型较少考虑海洋环境的影响。由于上述问题的存在, 导致当前评估结果存在较大不确定性。未来, 应继续探索提高资源评估质量的方法, 同时研究建立管理策略评价框架, 以避免渔业资源评估结果的不确定性对该渔业可持续开发的影响。

关键词: 印度洋; 长鳍金枪鱼; 资源评估; 渔业数据; 种群结构; 海洋环境影响

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)05-1102-13

印度洋长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)在印度洋 25°N~40°S 之间均有分布, 是印度洋金枪鱼渔业的主要目标鱼种之一^[1]。印度洋长鳍金枪鱼的开发始于 20 世纪 50 年代, 被延绳钓、围网、流刺网及其他沿岸小型渔业所利用^[2], 主要捕捞国家或地区有印度尼西亚、日本、韩国和中国台湾等^[3]。近年, 印度洋长鳍金枪鱼也是我国金枪鱼渔业的目标鱼种, 因此, 加强对印度洋长鳍金枪鱼的科学研究, 及时掌握其资源状况, 对我国金枪鱼渔业的发展具有重要意义^[3]。

当前, 多个生物量动态模型^[4-7]、年龄结构模型^[8-10]被用于印度洋长鳍金枪鱼资源评估。尽管资源合成模型(stock synthesis, SS3)^[9]的结果被用于确定当前印度洋长鳍金枪鱼资源状态, 但该结果仍存在较大的不确定性^[2, 10]。本文尝试对影响印度洋长鳍金枪鱼资源评估的因素进行梳理,

以为该资源的科学评估与管理提供参考依据。

1 渔业资源评估模型

用于印度洋长鳍金枪鱼的评估模型可分为两类: 一类是生物量动态模型^[4-7], 另一类是年龄结构模型^[8-10]。生物量动态模型包括: 带协变量的产量模型(a stock production model incorporating covariates, ASPIC)^[5]、贝叶斯生物量动态模型(Bayesian biomass dynamic model, BBDM)^[6]、贝叶斯状态空间产量模型(Bayesian state-space production model, BSPM)^[7]。年龄结构模型则包括: 年龄渔获量统计模型(statistical-catch-at-age, SCAA)^[8]及 SS3^[10]。尽管上述 3 个生物量动态模型所需数据类似, 即主要为渔获量与标准化单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)数据, 但模型的参数化方法或参数估计方法存在较大差异。ASPIC

收稿日期: 2017-08-26; 修订日期: 2017-10-11.

基金项目: 国家自然科学基金浙江两化融合联合基金(U1609202); 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室开放基金项目(A1-0203-00-2009-2).

作者简介: 官文江(1974-), 副教授, 研究方向为渔业资源评估. E-mail: wjguan@shou.edu.cn

采用最大似然方法估计参数^[4], 而 BBDM 与 BSPM 则采用贝叶斯方法估计参数^[6-7]。BBDM 与 BSPM 的差异在于, BBDM 对参数内禀增长率提供了先验估计^[6], 而 BSPM 则增加了产量模型的形状参数及处理误差(process error)的估计^[7]。年龄结构模型所需数据比生物量动态模型复杂, 除渔获量及标准化 CPUE 数据外, 还需年龄或体长组成数据、种群结构及生物学等信息, 如生长、自然死亡、繁殖(时间、地点及能力)及性别比例等。SS3 与 SCAA 的区别在于: SS3 更灵活, 也更复杂, 既能使用年龄组成数据、也能使用体长组成数据, 但 SCAA 只能使用年龄组成数据。由于上述评估模型的假设及数据需求等各不相同, 其资源评估结果存在较大差异^[2], 但模型的评估效果往往取决于模型所需的假设及数据被满足的程度, 在数据或相关信息存在较大不确定性的条件下, 上述模型对印度洋长鳍金枪鱼资源状态的判断均有参考价值^[2], 因此, 在渔业资源评估中应注意评估模型的选择及由其引起的不确定性。

2 渔业数据

用于印度洋长鳍金枪鱼资源评估的渔业数据主要包括渔获量、体长或年龄组成及标准化 CPUE 等数据。这些数据的数量与质量直接影响印度洋长鳍金枪鱼资源评估的质量。

2.1 印度洋长鳍金枪鱼渔业概述

印度洋长鳍金枪鱼的商业捕捞始于 20 世纪 50 年代早期, 日本、中国台湾及韩国的超低温延绳钓渔业分别于该年代的早期(1952 年)、中期(1954 年)、晚期(1957 年)进入印度洋捕捞长鳍金枪鱼^[10]。直到 1986 年前, 印度洋长鳍金枪鱼主要被中国台湾、日本及韩国超低温延绳钓渔业所利用。1986—1991 年期间, 中国台湾流刺网渔业的渔获量与超低温延绳钓渔业的渔获量相当, 但在 1992 年, 流刺网被联合国禁止使用。随后, 超低温延绳钓渔业(主要为中国台湾超低温延绳钓渔业)的长鳍金枪鱼产量波动上升, 并于 2001 年达到高峰(约 4×10^4 t, 占总产量的 88% 左右), 随后, 其产量逐年减少, 近年维持在 1.3×10^4 t 左右。冰鲜延绳钓渔业始于 1974 年, 其长鳍金枪鱼产量逐

年增加, 在 2007 年以后, 冰鲜延绳钓渔业(主要为中国台湾与印度尼西亚的冰鲜延绳钓渔业)的产量超过超低温延绳钓渔业。2007—2014 年, 延绳钓渔业的长鳍金枪鱼产量约占长鳍金枪鱼总产量的 95%, 而冰鲜延绳钓渔业与超低温延绳钓渔业的长鳍金枪鱼产量之比约为 61 : 39^[2]。

此外, 印度洋长鳍金枪鱼也被欧盟、塞舌尔、毛里求斯等国的围网渔业、印度洋沿岸国家的流刺网等渔业所捕捞, 但其产量所占比重较低^[2]。

2.2 渔获量数据

渔获量数据始于 1950 年, 20 世纪 90 年代早期之前的渔获量数据较为可靠, 但此后, 由于部分重要渔业(如印度尼西亚的延绳钓渔业, 中国台湾的冰鲜延绳钓渔业)的渔获量数据存在漏报、不报或混报等问题, 尽管印度洋金枪鱼委员会(Indian Ocean Tuna Commission, IOTC)秘书处根据渔获量-捕捞努力量、联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)的 FishStat 数据库、港口采样、罐头厂进口等数据, 对缺失数据进行了估计或校正, 但渔获量数据的质量仍有所下降^[2]。由于渔获量-捕捞努力量数据缺失较多, 这造成部分渔业(如印度尼西亚延绳钓渔业)捕捞位置的确定存在困难^[2], 但当前评估模型的空间分辨率较低, 该影响较少被考虑。

尽管丢弃水平缺少观测(除欧盟围网渔业外), 但一般认为印度洋长鳍金枪鱼的丢弃水平很低^[2], 在资源评估中很少考虑丢弃。

2.3 体长或年龄组成数据

体长组成数据始于 1965 年, 主要来自超低温延绳钓渔业及欧盟与塞舌尔的围网渔业, 少量体长组成数据来自中国台湾、印度尼西亚冰鲜延绳钓渔业。体长组成数据主要存在如下几个方面的问题: (1)日本超低温延绳钓渔业的体长组成数据始于 1965 年, 但自 20 世纪 90 年代早期开始, 观测样本数逐年减少, 致使其观测样本数不足, 数据质量变差; (2)中国台湾超低温延绳钓渔业的体长组成数据始于 1980 年, 但 2003 年之后与之前的体长数据差异明显。一般认为, 2003 年之后, 采样协议有变化, 测量的小鱼过少而大鱼过多, 因而, 平均体长与体重偏大; (3)中国台湾流刺网渔

业, 伊朗、巴基斯坦等国的外海刺网渔业, 马来西亚、印度、菲律宾、阿曼等国的延绳钓渔业均缺少体长组成数据, 而中国台湾流刺网渔业非常重要, 其产量约为同期长鳍金枪鱼总产量的 50%; (4) 中国台湾及印度尼西亚冰鲜延绳钓渔业的体长组成数据非常有限(少数几年), 且采样覆盖率低, 数据质量较差^[2]。

年龄组成数据的质量取决于体长组成数据及年龄-体长关系表(age-length key)的质量。由于体长组成数据存在较大不确定性, 同时, 缺少本海域年龄-体长关系表数据, 使年龄组成数据的质量更差^[2, 11]。

体长或年龄组成数据主要用于估计选择系数, 而选择系数用于计算各龄鱼的捕捞死亡系数, 对渔业资源评估质量有重要影响。体长或年龄组成数据的缺失或质量不佳将使评估模型无法估计, 甚至错误估计选择系数, 如在当前资源评估中, 中国台湾流刺网渔业的选择系数无法估计, 只能采用 Bartoo 等^[12]的结果^[10], 这增加了资源评估结果的不确定性。

2.4 标准化 CPUE 数据

标准化 CPUE 数据主要来自中国台湾、日本及韩国的超低温延绳钓渔业。

1969 年以前, 日本超低温延绳钓渔业的长鳍金枪鱼产量所占比重较大, 但随其目标鱼种转变为南方蓝鳍金枪鱼(*Thunnus maccoyi*)与大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)后, 长鳍金枪鱼产量迅速大幅下滑, 并长期保持较低水平。自 2006 年以来, 由于南方蓝鳍金枪鱼配额减少等原因, 长鳍金枪鱼重新成为其目标鱼种(存在争议, 有人认为其目标鱼种为大眼金枪鱼), 引起其产量有所回升。日本标准化 CPUE 的变化与其产量变化具有类似性, 据此推测, 其标准化 CPUE 的变化与目标鱼种的改变仍紧密相关, 可能无法真正反映长鳍金枪鱼资源量的变化^[2]。韩国超低温延绳钓渔业存在类似情况, 其标准化 CPUE 的变化趋势与其捕捞产量的变化趋势类似, 也不能真正反映资源量的变化^[2]。

中国台湾超低温延绳钓渔业的 CPUE 数据始于 1980 年。在印度洋的中国台湾超低温延绳钓渔

业具有如下特点: (1) 自 20 世纪 80 年代中期以来, 中国台湾超低温延绳钓渔业由现代超低温延绳钓渔业与传统超低温延绳钓渔业共同组成, 现代超低温延绳钓渔业具有较高捕捞效率, 且主捕具有较高价值的黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)、大眼金枪鱼与南方蓝鳍金枪鱼^[11, 13]; (2) 中国台湾超低温延绳钓渔业存在从温带长鳍金枪鱼主捕区转移至赤道大眼金枪鱼主捕区的现象^[11]; (3) 在长鳍金枪鱼主捕区, 中国台湾超低温延绳钓渔业的目标鱼种也存在变化, 如在长鳍金枪鱼主捕区, 主捕西南海域剑鱼与热带金枪鱼、东南海域南方蓝鳍与大眼金枪鱼的捕捞努力量有所增加, 而自 2004 年开始, 其主捕油鱼(*Ruvettus pretiosus*)的捕捞努力量也日益增多^[11]。

中国台湾超低温延绳钓渔业的特点表明其目标鱼种随时而变, 而目标鱼种改变将导致其捕捞系数变化。尽管采用 GLM (generalized linear model) 模型对 CPUE 进行了标准化, 但中国台湾延绳钓渔业的标准化的 CPUE 仍受目标鱼种、捕捞区域或捕捞技术变化的影响, 可能仍无法真实反映资源量的变化, 如 1986 年以后, 标准化 CPUE 大幅降低就与目标鱼种改变紧密相关, 而不是资源量的大幅下降^[11]。尽管如此, 由于中国台湾超低温延绳钓渔业在印度洋长鳍金枪鱼渔业中占重要地位, 当前, 印度洋长鳍金枪鱼的资源评估主要采用该渔业或与该渔业紧密相关的标准化 CPUE 数据。

为提高标准化 CPUE 的质量, IOTC 联合使用日本、韩国、中国台湾超低温延绳钓渔业的捕捞日志数据(operational data), 并采用聚类方法识别船队的目标鱼种, 以去除目标鱼种变化、空间位置变化、渔船效应对标准化 CPUE 的影响^[14]。但从 CPUE 标准化结果看(如 1970 年以前 CPUE 的大幅下降与 2006 以后南部海域 CPUE 的上升), 目标鱼种变化仍影响联合标准化 CPUE 的质量, 使其不能正确反映长鳍金枪鱼资源量的变化^[2, 10, 14]。

在渔业资源评估中, 标准化 CPUE 是确定资源量变化趋势的重要数据, 比体长组成或年龄组成数据拥有更高权重^[15], 直接影响渔业资源评估质量。

3 印度洋长鳍金枪鱼的种群结构

在太平洋与大西洋, 长鳍金枪鱼一般分为南北两个种群, 分别对应南北两个海洋环流(ocean gyre), 但由于印度洋北部面积相对较小, 仅存在一个海洋环流, 因此, 当前仍假设印度洋长鳍金枪鱼为单种群^[16]。但基于形态学及 DNA 水平的研究, 印度洋长鳍金枪鱼可能以 90°E 为界, 分为两个种群^[17]。其他基因数据表明印度洋长鳍金枪鱼、太平洋长鳍金枪鱼有紧密关系^[18], 而血组频率(blood- group frequencies)^[19]与微卫星^[20]结果则表明印度洋长鳍金枪鱼、大西洋长鳍金枪鱼有联系^[21]。由于南非大陆不足以完全分割南印度洋与南大西洋温带水团系统, 形成环境障碍, 因此, 在东南大西洋与西南印度洋间的长鳍金枪鱼可能存在跨洋洄游^[21-22], 而两海域长鳍金枪鱼基因的同质性^[20]及体长分布特点^[21]等进一步支持了跨洋洄游假设。同样, Koto^[23]认为南太平洋与印度洋长鳍金枪鱼也存在洄游联系。据此, 单种群假设值得商榷^[21]。

印度洋长鳍金枪鱼的体长分布存在明显的纬向变化^[16, 21], 即 10°S 以北地区常年出现体长较大的性成熟个体, 产卵个体主要分布于 10°S~30°S 之间地区, 而性未成熟个体则主要分布于 30°S 以南地区, 且不同群体具有季节性南、北洄游特点^[1, 16]。南太平洋长鳍金枪鱼的体长分布存在明显的经向变化^[24], 但在印度洋是否存在该变化目前仍缺少数据支持。

在资源评估中, Nishida 等^[8]没有考虑种群空间结构的影响, 而 Langley 等^[10]在使用 SS3 进行资源评估时, 按 75°E 及 25°S 将印度洋划分为 4 个海域, 以定义长鳍金枪鱼的空间结构、组织评估数据。空间结构划分对资源评估结果具有重要影响^[25], 当前评估模型空间划分的科学性值得商榷, 忽略种群的空间结构^[5-8]或将捕捞长鳍金枪鱼的核心区域(15°S~25°S 之间的海域)划归至北部非核心区域的做法均存在问题^[11]。此外, 由于缺少标志放流数据, 印度洋长鳍金枪鱼的洄游估计存在困难^[10], 而使用区域作为渔业(areas-as-fleets)的方法或更灵活的选择模型也无法消除由洄游产生的影响^[25]。

4 印度洋长鳍金枪鱼的繁殖生物学

4.1 性别比

在北大西洋^[26]、南太平洋^[27]、北太平洋^[28]、地中海^[29]、印度洋^[30]等海域的长鳍金枪鱼渔获物中, 普遍存在雄性成鱼比例随体长增加而增加的现象, 当体长超过某一长度时, 如 95 cm^[24]、100 cm^[28]或 105 cm^[30]后, 雌鱼很少或缺失。在印度洋, 研究结果表明, 当长鳍金枪鱼体长小于 100 cm 时, 雌鱼数量占优势, 而当体长大于 105 cm 时, 则雄鱼数量占优势^[30]。对缺少大个体雌鱼的现象, 存在如下 3 种解释: (1)雌、雄鱼的差异生长, 即雄鱼生长率大于雌鱼, 雌鱼个体体长较小^[30]; (2)雌、雄鱼具有不同的自然死亡系数, 即雌鱼的繁殖增大了其自然死亡系数, 造成大个体雌鱼较少^[30]; (3)雌、雄鱼具有不同的捕捞系数, 即雌鱼捕捞系数较小, 因此, 渔获物中出现比例较少^[11]。

性别比随体长的变化在不同海域也存在差异^[11]。如在有些海域, 性别比接近 50%, 甚至出现最大体长以雌鱼为主的现象^[11, 30]。因此, 性别比是否存在显著差异, 仍存在争议。

当前资源评估通常假设补充时的性别比为 1:1, 性别比差异主要通过生长差异体现^[10]。由于渔业数据缺少性别信息, 因而在自然死亡系数、选择性模型及捕捞系数设置上均没有考虑性别差异的影响。若渔业数据性别比随体长变化差异明显, 且其成因与生长无关, 则其对当前资源评估结果可能产生重要影响。

4.2 性成熟比例

据 Dhurmeea 等^[30]的研究结果, 印度洋长鳍金枪鱼的 50%性成熟体长为 85.3 cm(雌性), 该值比南太平洋的 87 cm^[31]、大西洋的 90 cm^[32]略低, 但比地中海的 66 cm^[31]高。印度洋长鳍金枪鱼的 100%性成熟体长约为 94 cm, 各大洋大体一致^[28, 30-31]。同时, 在南太平洋, 长鳍金枪鱼的 50%性成熟体长随纬度、经度及时间而变化^[31], 如随纬度向南增加, 该长度逐渐变大。在 10°S, 该值为 75 cm, 而在 25°S~45°S 之间, 该值为 88 cm^[24]。南太平洋长鳍金枪鱼的 50%性成熟体

长与其特定个体的时空分布有关,因此,观测样本的时空覆盖范围将影响该参数的估计。由于 Dhurmeea 等^[30]的观测样本时空分布相对有限,其结果仍有待进一步确认^[2]。

长鳍金枪鱼的 50%性成熟年龄,在大西洋、北太平洋均为 5 龄^[32-33],南太平洋为 4.5 龄^[31],而长鳍金枪鱼的 100%性成熟年龄,通常为 6 龄^[33]或 7 龄^[31]。同样,南太平洋长鳍金枪鱼的 50%性成熟年龄随纬度具有明显的变化,即随纬度向南增加,该年龄变大,如在 10°S,该值为 2 龄,而在 25°S~45°S 之间,该值为 5 龄^[24]。体长与性成熟关系比年龄更密切,长鳍金枪鱼性成熟受体长驱动^[31]。

性成熟比例是计算产卵生物量(spawning stock biomass, SSB)的关键参数,而产卵生物量不仅是重要的管理参数,也是利用亲体-补充关系计算补充量的重要参数。由于 Dhurmeea 等^[30]的结果仍有待进一步确认^[2],同时,该结果仍缺少性成熟比例与年龄的关系。因此,在印度洋长鳍金枪鱼的资源评估中,性成熟比例与年龄的关系一般采用南太平洋的研究结果^[31, 34],性成熟比例随纬度等变化通常被忽略^[10]。性成熟比例设置差异是否对印度洋长鳍金枪鱼资源评估结果有严重影响,目前仍不清楚。

4.3 产卵位置、时间及产卵量

印度洋长鳍金枪鱼产卵场目前仍不十分清楚,一般认为其产卵场在 10°S~30°S 之间^[16],主要产卵场可能位于马达加斯加东海岸外海,产卵时间为 10 月至翌年 1 月,主要产卵月份为 11—12 月^[30]。此外,莫桑比克海峡、西印度洋赤道附近、好望角、圣诞岛周边及澳大利亚西北部均有可能是产卵场,其产卵位置的海表水温一般超过 24°C^[11, 21, 33]。

长鳍金枪鱼可分批产卵,其分批繁殖力(batch fecundity)与卵巢大小有关,而性腺生长与体长相关,因此分批繁殖力随体长或年龄增大而增大,并随产卵时间增加而减少,即产卵初期分批繁殖力大,产卵后期分批繁殖力低,且个体大的产卵时间长^[30, 35]。由于分批繁殖力随产卵时间而变化,同时又受个体状况影响,因此,不同状况的个体及不同时间捕捞的个体的分批繁殖力存在较大差异,这影响了分批繁殖力与体长的关系,使其与体

长的关系存在较大变化^[30]。同时, Dhurmeea 等^[30]的研究结果表明印度洋长鳍金枪鱼的分批繁殖力与体重关系不明显。

在亲体-补充量关系中,常使用产卵生物量 SSB 计算补充量,这隐含了种群繁殖潜力(reproduce potential)与 SSB 成正比关系^[36],仔幼鱼的存活率与亲体年龄、体长或个体状况无关^[37],且单位体重产卵量不随时间改变^[38]等假设^[39]。若分批繁殖力与体重无关,这将影响该假设的成立。同时,利用体长数据计算种群繁殖潜力可能更为合理,但在长鳍金枪鱼的资源评估中,较少采用这种方法计算繁殖潜力。

在印度洋长鳍金枪鱼的资源评估中,空间划分仅用于组织渔业数据,每个空间区域没有独立的种群动态,因此无须设置补充位置,补充时间则设为第四季度,即产卵高峰期。而在南太平洋长鳍金枪鱼的资源评估中,补充量则被按比例在 8 个区域、4 个季节中进行分配,分配比例由模型估计^[40]。补充位置或时间设置对评估的影响,目前缺少相关讨论。

4.4 亲体-补充量关系

亲体-补充量关系模型一般采用 Beverton-Holt (B-H)或 Ricker 模型。利用这些模型估计补充量面临的问题是:(1)陡度(steeptness)值的估计或假设。一般,陡度无法在评估模型中估计^[41],但对资源评估结果却有重要影响^[3]。对印度洋长鳍金枪鱼而言,一般认为该值在 0.7~0.9 之间,通常将其固定为 0.8。这与南太平洋的假设一致^[40],但与北太平洋的估计(0.84~0.95)或假设(0.9)存在较大差异^[42-44]。(2)亲体的计算方法。当前主要将 SSB 作为繁殖潜力代入 B-H 等模型以计算补充量,但繁殖潜力的计算可能受多种因素影响,并且具有随时间而变化的特点(见 4.3),这将影响补充量及其他参数的估计^[39]。(3)补充量处理误差的权重设置。一般而言,补充量的处理误差假设为服从对数正态分布的随机变量,其权重由其对数尺度下的标准差决定。该标准差直接影响补充量的变化,其值一般被假设为 0.6^[10],但该值是否适合印度洋长鳍金枪鱼仍值得怀疑。(4)补充量既与亲体有关,又受环境影响,同时,在模型中缺少反映补充量变动的观测数据,因此,补充量的估计很有

可能受各种因素影响而被错误估计^[11]。

5 印度洋长鳍金枪鱼的生长

5.1 年龄与体长关系

常采用硬组织鉴定法(鳍条、鳞片、脊椎骨及耳石)、长度分析法及标志放流方法估计长鳍金枪鱼的年龄与生长^[45], 但一般认为利用耳石估计的年龄与生长更准确^[46]。长鳍金枪鱼最大年龄的估计在不同海区存在差异, 如北太平洋为 15 龄(耳

石)^[47], 南太平洋为 14 龄(耳石)^[46], 北大西洋为 13 龄(鳞片)^[45], 南大西洋为 12 龄(鳍条)^[48], 地中海为 11 龄(鳍条)^[49], 而印度洋为 9~10 龄(鳍条^[50], 脊椎骨^[51])。

生长方程通常包括 von Bertalanffy、Gomperz、Logistic、Richard 及一般生长方程^[27], 同时非参数模型也用于表达年龄与体长关系^[52]。对于长鳍金枪鱼, 主要采用 von Bertalanffy 生长方程(表 1)。但 Williams 等^[27]的结果表明, 南太平洋长鳍金枪

表 1 长鳍金枪鱼的生长方程
Tab. 1 Growth equation for *Thunnus alalunga*

洋区 ocean	生长方程 growth equation	估计方法 estimation method	文献 reference
印度洋 Indian Ocean	$L = 113.70 \times [1 - e^{-0.194 \times (t+8.3900)}]$	P	[50]
印度洋 Indian Ocean	$L = 163.70 \times [1 - e^{-0.1019 \times (t+2.0688)}]$	V	[51]
印度洋 Indian Ocean	$L = 128.13 \times [1 - e^{-0.1620 \times (t+0.8970)}]$	S	[53]
印度洋 Indian Ocean	$L = 136.00 \times [1 - e^{-0.1590 \times (t+1.6849)}]$	E	[54]
印度洋 Indian Ocean	$L = 147.20 \times [1 - e^{-0.1330 \times (t+1.4985)}]$ *	E	[55]
印度洋 Indian Ocean	$L = 171.40 \times [1 - e^{-0.1180 \times (t+1.5015)}]$ *	E	[56]
北大西洋 North Atlantic	$L = 124.74 \times [1 - e^{-0.2300 \times (t+0.9892)}]$ $L_M = 115.66 \times [1 - e^{-0.4850 \times (t+0.8350)}]$ $L_F = 104.70 \times [1 - e^{-0.7350 \times (t+1.3040)}]$	P+S+E	[32]
北大西洋 North Atlantic	$L = 122.20 \times [1 - e^{-0.2090 \times (t+1.3380)}]$ $L_M = 131.65 \times [1 - e^{-0.1600 \times (t+1.1400)}]$ $L_F = 121.37 \times [1 - e^{-0.1900 \times (t+1.1300)}]$	P+T	[26]
南大西洋 South Atlantic	$L = 147.50 \times [1 - e^{-0.1260 \times (t+1.8900)}]$	P	[48]
地中海 Mediterranean	$L = 94.70 \times [1 - e^{-0.2580 \times (t+1.3540)}]$	P	[57]
北太平洋 North Pacific Ocean	$L = 124.10 \times [1 - e^{-0.1640 \times (t+2.2390)}]$	O	[47]
北太平洋 North Pacific Ocean	$L = 108.50 \times [1 - e^{-0.2922 \times (t+0.7683)}]$ $L_M = 114.00 \times [1 - e^{-0.2350 \times (t+1.010)}]$ $L_F = 103.50 \times [1 - e^{-0.3400 \times (t+0.5300)}]$	O	[56, 58]
北太平洋 North Pacific Ocean	$L = 112.38 \times [1 - e^{-0.2483 \times (t+1.0979)}]$ $L_M = 119.15 \times [1 - e^{-0.2077 \times (t+1.4530)}]$ $L_F = 106.57 \times [1 - e^{-0.2976 \times (t+0.7627)}]$	O	[58]
南太平洋 South Pacific Ocean	$L = \frac{102.09}{1 + e^{-0.6100 \times (t-1.1200)}}$ $L = \frac{105.34}{1 + e^{-0.5900 \times (t-1.2500)}}$ $L = \frac{96.97}{1 + e^{-0.6900 \times (t-0.9900)}}$	O	[27]
南太平洋 South Pacific Ocean	$L = 104.52 \times [1 - e^{-0.4000 \times (t+0.4900)}]$	O	[27]

注: 除印度洋的生长方程外, 其他生长方程为最近结果或在最近资源评估中被使用. * 1.4895 与 1.5015 由 Chang 等^[59]的数据估算. S 代表鳞片; V 代表脊椎骨; P 代表鳍条; E 代表长度分析法; T 代表标志回捕估计; O 代表耳石; 下标 F 与 M 分别表示雌性与雄性。

Note: The growth equations except those from Indian Ocean were selected as they were published in recent years or used in recent stock assessment. * means the 1.4895 与 1.5015 were estimated according to the data in Chang et al^[59]. S denotes scales; V denotes vertebrae; P denotes spines; E denotes length frequency analysis; T denotes tag-recapture estimates and O denotes otoliths. Subscript F and M denote female and male, respectively.

鱼的生长采用 Logistic 生长方程更合适(表 1)。

通常认为长鳍金枪鱼的生长存在性别差异,当超过某一年龄(如 4 龄^[27])时,雄鱼体长明显大于雌鱼,因此,雌鱼与雄鱼应采用不同生长方程^[27]。此外,长鳍金枪鱼的生长存在区域差异,如在南太平洋,东、中部长鳍金枪鱼的渐进体长(L_{∞})与生长参数(K)均比西部大^[27]。但这种差异有可能是渔具选择性或与体长相关的洄游造成的^[10, 27]。

印度洋长鳍金枪鱼生长方程的估计主要基于鳍条^[50]、鳞片^[53]、脊椎骨^[51]或长度分析法^[54-55](表 1)。基于鳍条、鳞片、脊椎骨的年龄鉴定在某种程度上缺少验证,不如基于耳石的年龄鉴定可靠^[10, 46],而基于长度分析法估计生长参数也存在相当大的不确定性^[24]。同时,印度洋长鳍金枪鱼的生长研究较少考虑性别差异。因此,在印度洋长鳍金枪鱼的资源评估中,没有采用本海域的生

长方程,而是采用了 Chen 等^[56]的结果,以区分性别差异对生长的影响^[10]。但 Chen 等^[56]结果与印度洋已有生长方程存在差异(表 1),使用 Chen 等的结果是否合适及其对评估结果可能的影响需进一步分析。

5.2 体重与体长关系

长鳍金枪鱼被多种渔业(如延绳钓、围网、刺网等)所利用,不同渔业的渔获物大小存在差异^[45],来自不同渔业的样本将影响体重与体长关系^[34]。如刺网渔业的渔获物主要为性未成熟的幼鱼,个体通常较小,而延绳钓渔业则主要捕捞性成熟的成鱼,个体通常较大,这使得基于刺网渔业数据的模型预测的体重偏小,而基于延绳钓渔业数据的模型预测的体重偏大^[60]。不同洋区的体重与体长关系也存在差异(表 2),一般,当体长小于 80 cm 时,预测的体重差异较小,但随体长的增加,预

表 2 长鳍金枪鱼体重-体长关系
Tab. 2 The weight-length relationships for *Thunnus alalunga*

洋区 ocean	渔业 fishery	性别 sex	体长-体重关系 weight-length relationship	文献 reference
印度洋 Indian Ocean	LL+GG	C	$W = 0.032411 \times L^{2.8758}$	[51]
印度洋 Indian Ocean	LL+GG	C	$W = 0.035050 \times L^{2.8770}$	[53]
印度洋 Indian Ocean	GG	C	$W = 0.056907 \times L^{2.7514}$	[60]
印度洋 Indian Ocean	GG	C	$W = 0.033783 \times L^{2.8449}$	[61]
		M	$W = 0.033830 \times L^{2.8676}$	
		F	$W = 0.041830 \times L^{2.8222}$	
西印度洋 West Indian Ocean	ALL	M	$W = 0.0043378 \times L^{3.3551}$	[62]
		F	$W = 0.0017551 \times L^{3.5625}$	
		C	$W = 0.0032537 \times L^{3.4240}$	
印度洋 Indian Ocean	LL	C	$W = 0.43400 \times L^{2.3430}$	[65]
印度洋 Indian Ocean	LL	C	$W = 1.00000 \times L^{2.0550}$	[66]
东印度洋 East Indian Ocean	LL	C	$W = 0.080000 \times L^{2.7271}$	[67]
北太平洋 North Pacific Ocean	ALL	C	$W_1 = 0.08700 \times L^{2.6700}$	[63]
			$W_2 = 0.03900 \times L^{2.8400}$	
			$W_3 = 0.02100 \times L^{2.9900}$	
			$W_4 = 0.02800 \times L^{2.9200}$	
南太平洋 South Pacific Ocean	ALL	C	$W = 0.0069587 \times L^{3.2351}$	[68]
北大西洋 North Atlantic	ALL	C	$W = 0.013390 \times L^{3.1066}$	[69]
南大西洋 South Atlantic	ALL	C	$W = 0.013718 \times L^{3.0973}$	[64]
地中海 Mediterranean	TL+SL	C	$W = 0.031190 \times L^{2.8800}$	[70]

注: 除印度洋的体重-体长外,其他体重-体长关系在最近资源评估中被使用。 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别代表第一、第二、第三、第四季体重。GG 为刺网,LL 为延绳钓,TL 为曳绳钓;SL 为表层延绳钓;ALL 为三种及以上渔具混合。F 与 M 表示雌性与雄性,C 表示两性混合。

Note: The length-weight equations except those from Indian Ocean were selected as they were used in recent stock assessment. W_1 , W_2 , W_3 , W_4 denote body weight in quarter 1, 2, 3 and 4, respectively. GG: gillnet; LL: longline; TL: troll-line; SL: surface longline; ALL denotes the albacore caught by three or more different fishing gears. F and M denote female and male, respectively; C denotes sexes combined.

测的体重差异逐渐增大^[34]。此外,同一洋区的体重与体长关系有可能存在性别差异^[61-62]、区域差异^[61]及季节变化^[63]。造成这种差异或变化的原因可能与种群组成、索饵或产卵洄游等生态过程或生命史过程有关^[62]。

Nishida 等^[34]根据各体重与体长曲线的位置、体长数据覆盖范围及与印度洋长鳍金枪鱼的种群关系,推荐使用 Penney 模型^[64](表 2),该模型的数据来自南大西洋长鳍金枪鱼。当前研究结果表明印度洋长鳍金枪鱼的体重与体长关系存在性别及区域差异^[61-62],尽管这些研究的采样样本覆盖范围仍有限,但 Penney 模型是否适合印度洋长鳍金枪鱼目前仍值得怀疑。在三大洋长鳍金枪鱼的资源评估中,均没有考虑体重与体长关系的性别与区域差异,而仅北太平洋考虑了体重与体长关系的季节变化^[44]。由于体重与体长关系直接影响渔获物重量、产卵生物量及生物参考点(如最大可持续产量)等量的计算,因此,使用不同体重与体长关系将会影响评估模型的参数估计及评估结果。但评估模型对体重与体长关系的敏感程度,当前仍缺少研究。

6 印度洋长鳍金枪鱼的自然死亡系数

自然死亡系数直接影响种群生产率的估计,若自然死亡系数设置偏大,估计的种群生产力则偏高,估计的生物量则偏大,而捕捞死亡系数的估计则偏低^[71]。因此,在渔业资源评估中,自然死亡系数是关键参数^[11, 72]。通常,自然死亡系数随时间、年龄、性别、世代、环境、摄食、种内种间竞争等变化而变化,而自然死亡系数的单点估计仅能作为某一条件下的平均值,使用单点估计具有较大不确定性^[72]。一般认为,年幼及年老的个体、性成熟的雌性个体可能具有较大的自然死亡率^[11]。关于自然死亡系数的设置,当前讨论较多的是:自然死亡系数随年龄(或体长)及时间有何变化,自然死亡系数是否存在性别差异,以及这些变化或差异对资源评估可能的影响。

有关印度洋长鳍金枪鱼自然死亡系数的信息非常有限,根据长鳍金枪鱼的寿命(12~15 龄或更长)推断其自然死亡系数介于 0.2~0.5/a 之间^[11]。

Liu 等^[73]利用延绳钓渔业数据与捕捞曲线方法估计印度洋长鳍金枪鱼的自然死亡系数为 0.2207/a, Lee 等^[74]利用 Pauly 经验公式计算的结果为 0.2060/a,而 Chang 等^[55]利用 MULTIFAN 软件^[75]估计的自然死亡系数为 0.22~0.25/a。Nishida 等^[34]认为幼鱼的自然死亡系数应该比成鱼高,其假设 0 龄鱼的自然死亡系数为 0.4/a,5 龄及以上鱼的自然死亡系数采用 Liu 等^[73]的结果(即 0.2207/a),1~4 龄鱼的自然死亡系数则通过上述两个值进行线性内插,从而得到所有年龄的自然死亡系数。由于年龄鉴定、渔业或调查时的选择性、捕捞水平、捕捞死亡系数估计等均存在问题,上述自然死亡系数的合理性无法确定^[10, 72]。当前,三大洋及地中海长鳍金枪鱼的自然死亡系数均假设为 0.3/a^[11, 71]。

如何合理设置印度洋长鳍金枪鱼的自然死亡系数仍缺少可靠的科学依据,这是印度洋长鳍金枪鱼资源评估结果不确定性的来源之一^[10-11]。

7 海洋环境对印度洋长鳍金枪鱼的影响

印度洋长鳍金枪鱼的资源变动和空间分布均与海洋环境有密切关系,如厄尔尼诺、拉尼娜事件均会引起印度洋长鳍金枪鱼的资源波动^[76],长鳍金枪鱼的空间分布也与印度洋 3 个主要流系统,即季风流、副热带环流、绕极流,紧密相关^[1],其季节洄游受海表水温、温度锋等因素影响^[1, 77]。渔业资源评估结果表明长鳍金枪鱼补充量存在较大波动^[10],这可能与海洋环境的影响也有关。但海洋环境对渔业资源量波动的影响及如何选择与计算海洋环境参数用于量化该影响仍缺少必要的研究。

8 展望

印度洋长鳍金枪鱼渔业的渔获量、体长组成或年龄组成、标准化 CPUE 数据均存在质量问题。部分渔获量、体长组成数据可利用相关信息进行恢复或通过数据之间的关系以相互验证、校正或估计,从而提高其质量^[2, 11]。如中国台湾流刺网体长组成数据可通过中国台湾流刺网渔业在南太平洋的体长组成数据进行恢复,或利用中国台湾学者的论文数据进行估计^[10-11]。IOTC 秘书处为此做

了很多工作,每次资源评估前都会对数据做一定的更新。但有些数据可能无法恢复(如中国台湾冰鲜延绳钓渔业 2000 年以前的渔获量数据),因此,在资源评估中,必须理解这部分数据引起的不确定性。提高标准化 CPUE 数据质量需解决的主要问题是减少目标鱼种及捕捞努力量空间分布变化的影响。尽管 Hoyle 等^[14]学者为此做了多种有益的尝试,但仍存在问题,提高标准化 CPUE 的质量是未来印度洋长鳍金枪鱼资源评估的核心问题之一。

印度洋长鳍金枪鱼的生物学研究仍比较薄弱^[45],种群结构、繁殖、生长、自然死亡信息比较缺乏,现有研究样本数据的时空覆盖范围、研究方法等仍存在一定局限性,有待进一步提高^[11, 45]。性别比例随体长变化,生长的性别、空间差异,自然死亡系数估计等将是需要优先关注的问题^[11]。在资源评估中,印度洋长鳍金枪鱼生物学数据可能来自不同洋区或假设,但生物学参数之间的内在关系没有给予足够关注,如自然死亡系数的假设同时会影响最大年龄(最大年龄越大则自然死亡系数应该越小)、生长模型的选择^[11]。同时,除自然死亡系数与陡度之外,当前资源评估缺少对其他生物学参数(如生长方程、体重-体长关系等)的敏感分析,这将低估评估结果的不确定性。印度洋长鳍金枪鱼的种群结构也是需要优先关注的重要问题,如果确实存在显著的跨洋洄游,则当前三个洋区的资源评估结果可能均不可靠,这也与南太平洋、南大西洋长鳍金枪鱼的资源评估与管理紧密相关。

由于渔业数据特别是体长组成(年龄组成更差)、标准化 CPUE 数据均存在较严重的质量问题,而生物学参数的设置也缺少足够的科学研究支持,采用复杂的年龄结构模型未必能给出科学的评估结果^[11],因此,对生物量动态模型^[5-6],特别是基于贝叶斯的生物量动态模型^[78]应给予关注。由于长鳍金枪鱼空间分布的异质性(如体长分布具有纬向性等),同时其资源变动与海洋环境关系密切,探索使用具有更高空间分辨率的评估模型如 SEAPODYM(spatial ecosystem and population dynamics model)^[79]将具有重要意义。

印度洋长鳍金枪鱼的资源评估面临渔业数据质量、生物学参数设置、种群结构假设等一系列问题,这使得渔业资源评估结果存在较大不确定性。研究建立管理策略评价(management strategy evaluation, MSE)框架^[80]是避免渔业资源评估结果不确定性、实现渔业管理目标的重要措施,但构建 MSE 框架非常复杂,当前进展仍相对缓慢^[81]。

参考文献:

- [1] Chen I C, Lee P F, Tzeng W N. Distribution of albacore (*Thunnus alalunga*) in the Indian Ocean and its relation to environmental factors[J]. Fisheries Oceanography, 2005, 14: 71-80.
- [2] IOTC. Report of the sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas (IOTC-2016-WPTmT06-R[E])[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July, 2016.
- [3] Zhu J F, Dai X J, Guan W J. Stock assessment of albacore *Thunnus alalunga* in the Indian Ocean[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(1): 1-8. [朱江峰, 戴小杰, 官文江. 印度洋长鳍金枪鱼资源评估. 渔业科学进展, 2014, 35(1): 1-8.]
- [4] Prager M. A suite of extensions to a nonequilibrium surplus-production model[J]. Fishery Bulletin, 1994, 92: 374-389.
- [5] Matsumoto T. Stock and risk assessments of albacore in the Indian Ocean based on ASPIC (IOTC-2016-WPTmT06-20)[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July, 2016.
- [6] Guan W, Zhu J, Xu L, et al. Using a Bayesian biomass dynamics model to assess Indian Ocean albacore (*Thunnus alalunga*) (IOTC-2016-WPTmT06-22)[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July, 2016.
- [7] Li B, Cao J, Zhu J. Analyzing population dynamics of Indian Ocean albacore (*Thunnus alalunga*) using Bayesian state-space production model (IOTC-2016-WPTmT06-24)[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July, 2016.
- [8] Nishida T, Sato K, Chang Y, et al. Stock assessment of albacore *Thunnus alalunga* in the Indian Ocean using Statistical-Catch-At-Age (SCAA) (IOTC-16-WPTmT06-21)[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July, 2016.
- [9] Methot R D, Wetzel C R. Stock synthesis: A biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management[J]. Fisheries Research, 2013, 142: 86-99.

- [10] Langley A, Hoyle S. Stock assessment of albacore tuna in the Indian Ocean using Stock Synthesis (IOTC-16-WPTmT06-25)[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July, 2016.
- [11] Fortteneau A. Indian Ocean albacore stock: review of its fishery, biological data and results of its 2014 stock assessment (IOTC-2016-WPTmT06-09)[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July, 2016.
- [12] Bartoo N, Holts D. Estimated drift gillnet selectivity for albacore *Thunnus alalunga*[J]. Fishery Bulletin, 1993, 92: 371-378.
- [13] Lee L K, Hsu C C, Chang F C. Albacore (*Thunnus alalunga*) CPUE Trend from Indian Core Albacore Areas based on Taiwanese longline catch and effort statistics dating from 1980 to 2013 (IOTC-2014-WPTmT05-19)[R]. Fifth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Busan, Korea, 28-31 July, 2014.
- [14] Hoyle S D, Yeh Y, Kim Z, et al. Report of the Third IOTC CPUE Workshop on Longline Fisheries (IOTC-2016-CPUEWS03-R[E])[R]. Third IOTC CPUE Workshop on Longline Fisheries, Shanghai, China, 22-23 July, 2016.
- [15] Francis R I C C. Data weighting in statistical fisheries stock assessment model[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, 68(6): 1124-1138.
- [16] Hsu C C. The status of Indian Ocean albacore-A review of previous work[R]. Proceedings of the Fifth Expert Consult on Indian Ocean Tunas, Indo-Pacific Tuna Development and Management Programme, Collective Volume of Working Documents, 1994, 8: 117-124.
- [17] Yeh S Y, Hui C F, Treng T D, et al. Indian Ocean albacore stock structure studies by morphometric and DNA sequence methods[R]. FAO IPTP/TWS/95/2/25, 1995.
- [18] Albaina A, Iriondo M, Velado I, et al. Single nucleotide polymorphism discovery in albacore and Atlantic bluefin tuna provides insights into worldwide population structure[J]. Animal Genetics, 2013, 44: 678-692.
- [19] Arrizabalaga H, Costas E, Juste J, et al. Population structure of albacore *Thunnus alalunga* inferred from blood groups and tag-recapture analyses[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 282: 245-252.
- [20] Montes I, Iriondo M, Manzano C, et al. Worldwide genetic structure of albacore (*Thunnus alalunga*) revealed by microsatellite DNA markers[J]. Marine Ecology Progress Series, 2012, 471: 183-191.
- [21] Nikolic N, Fonteneau A, Hoarau L, et al. Short review on biology, structure, and migration of *Thunnus alalunga* in the Indian Ocean (IOTC-2014-WPTmT05-13)[R]. Fifth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Busan, Korea, 28-31 July, 2014.
- [22] Beardsley G L. Proposed Migrations of Albacore, *Thunnus alalunga*, in the Atlantic Ocean[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1969, 98(4): 589-598.
- [23] Koto T. Studies on the albacore-XIV. Distribution and movement of the albacore in the Indian and the Atlantic Oceans based on the catch statistics of Japanese tuna longline fishery[J]. Bulletin Far Seas Fisheries Research Laboratory, 1969, 1: 115-129.
- [24] Farley J H, Williams A J, Davies C R, et al. Population biology of albacore tuna in the Australian region[R]. FRDC project 2009/012 Final Report, 2012.
- [25] Punt A E, Haddon M, Tuck G N. Which assessment configurations perform best in the face of spatial heterogeneity in fishing mortality, growth and recruitment: a case study based on pink ling in Australia[J]. Fisheries Research, 2015, 168: 85-99.
- [26] Santiago J, Arrizabalaga H. An integrated growth study for North Atlantic albacore (*Thunnus alalunga* Bonn. 1788)[J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62: 740-749.
- [27] Williams A J, Farley J H, Hoyle S D, et al. Spatial and sex-specific variation in growth of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) across the South Pacific Ocean[J]. PLoS ONE, 2012, 7(6): e39318.
- [28] Chen K S, Crone P R, Hsu C C. Reproductive biology of albacore *Thunnus alalunga*[J]. Journal of Fish Biology, 2010, 77(1): 119-136.
- [29] Karakulak F S, Ozgur E, Gokoglu M, et al. Age and growth of albacore (*Thunnus alalunga* Bonnaterre, 1788) from the eastern Mediterranean[J]. Turkish Journal of Zoology, 2011, 35: 801-810.
- [30] Dhurmeea Z, Zudaire I, Chassot E, et al. Reproductive biology of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the Western Indian Ocean[J]. PLoS ONE, 2016, 11(12): e0168605.
- [31] Farley J H, Hoyle S D, Eveson J P, et al. Maturity ogives for South Pacific albacore tuna (*Thunnus alalunga*) that account for spatial and seasonal variation in the distributions of mature and immature fish[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e83017.
- [32] Bard F X. Le Thon Germon (*Thunnus alalunga*, Bonnaterre 1788) de l'Océan Atlantique. De la dynamique des populations à la stratégie démographique[D]. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris XI, 1981.
- [33] Ueyanagi S. Observations on the distribution of tuna larva in the Indo-Pacific Ocean with emphasis on the delineation of spawning areas of albacore, *Thunnus alalunga*[J]. Bulletin Far Seas Fisheries Research Laboratory, 1969, 2: 177-219.

- [34] Nishida T, Kitakado T, Matsumoto T, et al. Consideration of albacore parameters for stock assessments in the Indian Ocean(IOTC-14-WPTmT05-16)[R]. Fifth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Busan, Korea, 28-31 July, 2014.
- [35] Farley J H, Williams A J, Hoyle S D, et al. Reproductive dynamics and potential annual fecundity of the South Pacific albacore tuna (*Thunnus alalunga*)[R]. PLoS ONE, 2013, 8(4): e60577.
- [36] Trippel EA, Kjesbu O S, Solemdal P. Effects of adult age and size structure on reproductive output in marine fishes[C] //Chambers R C, Trippel E A. Early life history and recruitment in fish populations. London, U. K: Chapman and Hall, 1997: 31-62.
- [37] Cardinale M, Arrhenius F. The relationship between stock and recruitment: are the assumptions valid?[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 196: 305-309.
- [38] Marshall C T, O'Brien L, Tomkiewicz J, et al. Developing alternative indices of reproductive potential for use in fisheries management: case studies for stocks spanning an information gradient[J]. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science, 2003, 33: 161-190.
- [39] Morgan M J, Murua H, Kraus G, et al. The evaluation of reference points and stock productivity in the context of alternative indices of stock reproductive potential[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2009, 66: 404-414.
- [40] Harley S J, Davies N, Tremblay-Boyer L, et al. Stock assessment for south Pacific albacore tuna (WCPFC-SC11-2015/SA-WP-06)[R]. Scientific Committee Eleventh Regular Session, Pohnpei, Federated States of Micronesia, 5-13 August, 2015.
- [41] Guan W J, Tang L, Tian S Q, et al. Using biomass dynamics model and Euler-Lotka equation to estimate steepness of stock-recruitment relationship[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(10): 48-56. [官文江, 唐琳, 田思泉, 等. 利用生物量动态模型与 Euler-Lotka 方程估算亲体-补充量模型的陡度参数[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(10): 48-56.]
- [42] Brodziak J, Lee H, Mangle M. Probable values of stock-recruitment steepness for North Pacific albacore tuna(ISC/11/ALBWG/11)[R]. ISC Albacore working group stock assessment workshop, Shimizu, Shizuoka, Japan, 30 May-11 June 2011.
- [43] Iwata S, Sugimoto H, Takeuchi Y. Calculation of steepness for the North Pacific Albacore(ISC/11/ALBWG/18)[R]. ISC Albacore working group stock assessment workshop, Shimizu, Shizuoka, Japan, May 30-June 11, 2011.
- [44] ISC. Stock assessment of albacore tuna in the North Pacific Ocean in 2014[R]. Report of the albacore Working Group. International Scientific Committee for Tuna and Tuna-like Species in North Pacific Ocean, Taipei, China, 16-21 July, 2014.
- [45] Nikolic N, Morandea G, Hoarau L, et al. Review of albacore tuna, *Thunnus alalunga*, biology, fisheries and management[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2017, 27(4): 775-810.
- [46] Farley J H, Williams A J, Clear N P, et al. Age estimation and validation for South Pacific albacore *Thunnus alalunga*[J]. Journal of Fish Biology, 2013, 82(5): 1523-1544.
- [47] Wells R J D, Kohin S, Teo S L H, et al, Uosaki K. Age and growth of North Pacific albacore (*Thunnus alalunga*): implications for stock assessment[J]. Fisheries Research, 2013, 147: 55-62.
- [48] Lee L K, Yeh S Y. Age and growth of south Atlantic albacore-a revision after the revelation of otolith daily ring counts[J]. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 2007, 60(2): 443-456.
- [49] Quelle P, Ortiz de Zárate V, Luque P L, et al. A review of Mediterranean albacore (*Thunnus alalunga*) biology and growth studies[J]. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 2011, 66(5): 1882-1896.
- [50] Zhou C, Li F, Tang H, et al. Age and growth of albacore Tuna (*Thunnus alalunga*) in the southern and central Indian Ocean based on Chinese observer data (IOTC-2012-WPTmT04-16)[R]. Fourth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 20-22 August, 2012.
- [51] Lee Y C, Liu H C. Age determination, by vertebra reading, in Indian Albacore, *Thunnus alalunga* (Bonnaterra)[J]. Journal of the Fisheries Society of Taiwan, 1992, 19(2): 89-102.
- [52] Fonteneau A. A working proposal for a Yellowfin growth curve to be used during the 2008 yellowfin stock assessment (IOTC-2008-WPTT-4)[R]. 10th Session of The Working Party On Tropical Tunas, Bangkok, Thailand, 23-31 October, 2008.
- [53] Huang C S, Wu C L, Kuo C L, et al. Age and growth of the Indian Ocean albacore, *Thunnus alalunga*, by scales[R]. FAO/IPTP/TWS/90/53, 1990: 111-112.
- [54] Hsu C C. Parameters estimation of generalized von Bertalanffy growth equation[J]. Acta Oceanographica Taiwanica, 1991, 26: 66-77.
- [55] Chang S K, Liu H C, Hsu C C. Estimation of vital parameters for Indian albacore through length frequency data[J]. Journal of the Fisheries Society of Taiwan, 1993, 20(1): 1-17.

- [56] Chen K S, Shimose T, Tanabe T, et al. Age and growth of albacore *Thunnus alalunga* in the North Pacific Ocean[J]. Journal of Fish Biology, 2012, 80: 2328-2344.
- [57] Megalofonou P. Age and growth of Mediterranean albacore[J]. Journal of Fish Biology, 2000, 57: 700-715.
- [58] Xu Y, Sippel T, Teo S L H, et al. A comparison study of North Pacific albacore (*Thunnus alalunga*) age and growth among various sources (ISC/14/ALBWG/04)[R]. ISC Albacore Working Group Meeting, La Jolla, CA, USA, 2014.
- [59] Chang S K, Hsu C C, Liu H C. Management implication on Indian Ocean albacore from simple yield analysis incorporating parameter uncertainty[J]. Fisheries Research, 2001, 51: 1-10.
- [60] Hsu C C. The length-weight relationship of Albacore, *Thunnus alalunga*, from the Indian Ocean[J]. Fisheries Research, 1999, 41: 87-92.
- [61] Lee Y C, Kuo C L. Age character of albacore, *Thunnus alalunga*, in the Indian Ocean[R]. FAO IPTP/TWS/88/61, 1988.
- [62] Dhurmeea Z, Chassot E, Augustin E, et al. Morphometrics of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the Western Indian Ocean(IOTC-2016-WPmT06-28)[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July 2016.
- [63] Watanabe K, Uosaki K, Kokubo T, et al. Revised practical solutions of application issues of length-weight relationship for the North Pacific albacore with respect to the stock assessment (ISC/06/ALBWG/14)[R]. ISC albacore Working Group Workshop, Shimizu, Shizuoka, Japan, November 28-December 5 2006.
- [64] Penney A J. Morphometric relationships, annual catches and catch-at-size for south African caught south Atlantic albacore (*Thunnus alalunga*)[J]. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 1994, 42(1): 371-382.
- [65] Zhu G, Xu L X, Zhou Y Q, et al. Length-frequency compositions and weight-length relations for big-eye tuna, yellowfin tuna, and albacore (Perciformes: Scombridae) in the Atlantic, Indian, and Eastern Pacific Oceans[J]. Acta Ichthyologica et Piscatoria, 2008, 38 (2): 157-161.
- [66] Xu L, Tian S Q. A study of fisheries biology for albacore based on Chinese observer data (IOTC-2011-WPTmT03-11)[R]. Third Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Busan, Korea, 20-22 September 2011.
- [67] Setyadji B, Novianto D, Nugraha B, et al. Catch and size distribution of albacores (*Thunnus alalunga*) in the Eastern Indian Ocean (IOTC-2012-WPTmT04-13)[R]. Fourth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 20-22 August 2012.
- [68] Hampton J. Stock assessment of albacore tuna in the south Pacific Ocean[R]. 15th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish. Honolulu, Hawaii, 22-27 July 2002.
- [69] Santiago J. A new length-weight relationship for the north Atlantic albacore[J]. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 1993, 40(2): 316-319.
- [70] Megalofonou P. Size distribution, length-weight relationships, age and sex of albacore, *Thunnus alalunga* Bonn., in the Aegean Sea[J]. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 1990, 33: 154-162.
- [71] Kinney M J, Teo S L H. Meta-analysis of north Pacific albacore tuna natural mortality (ISC/16/ALBWG-02/07)[R]. ISC Albacore Working Group Intercessional Workshop, the Pacific Biological Station, Nanaimo, BC, Canada, 8-14 November 2016.
- [72] Hamel O S. A method for calculating a meta-analytical prior for the natural mortality rate using multiple life history correlates[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72: 62-69.
- [73] Liu H C, Lee Y C. The yield per recruit analysis for Indian Ocean albacore stock[R]. The Third Asian Fisheries Forum, Asian Fisheries Society, Singapore, October 26-30, 1992.
- [74] Lee Y C, Hsu C C, Chang S K, et al. Yield-per-recruit analysis of the Indian Ocean albacore stock[R]. IPTP Collective Volume of Working Documents, 1991, 4: 136-148.
- [75] Fournier D A, Sibert J R, Majkowski J, et al. Multifan a likelihood-based method for estimating growth parameters and age composition from multiple length frequency data sets illustrated using data for southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1990, 47: 301-317.
- [76] Kumar P S, Pillai G N, Manjusha U. El Niño Southern Oscillation (ENSO) impact on tuna fisheries in Indian Ocean[J]. Springer Plus, 2014, 3: 591.
- [77] Lan K W, Kawamura H, Lee M A, et al. Relationship between albacore (*Thunnus alalunga*) fishing grounds in the Indian Ocean and the thermal environment revealed by cloud-free microwave sea surface temperature[J]. Fisheries Research, 2012, 113: 1-7.
- [78] Guan W, Tang L, Zhu J, et al. Application of a Bayesian method to data-poor stock assessment by using Indian Ocean albacore (*Thunnus alalunga*) stock assessment as an example[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(2): 117-125.
- [79] Lehodey P, Senina I, Murtugudde R. A spatial ecosystem and populations dynamics model (SEAPODYM) Modeling of tuna and tuna-like populations[J]. Progress in Oceanography, 2008, 78: 304-318.
- [80] Punt A E, Ralston S. A management strategy evaluation of rebuilding revision rules for overfished rockfish stocks[C]//

Heifetz J, DiCosimo J, Gharrett A J, et al. Biology, assessment, and management of North Pacific Rockfishes. Alaska Sea Grant College Program, AK-SG-07-01, 2007: 329-351.

[81] Mosquerira I. Status of development of the management

strategy evaluation work for Indian Ocean albacore tuna (IOTC-2016-WPTmT06-06)[R]. Sixth Session of the IOTC Working Party on Temperature Tunas, Shanghai, China, 18-21 July 2016.

Analysis of influencing factors on stock assessment of the Indian Ocean albacore tuna (*Thunnus alalunga*)

GUAN Wenjiang^{1,2}, ZHU Jiangfeng^{1,2}, GAO Feng^{1,2}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China

Abstract: The Indian Ocean albacore (*Thunnus alalunga*), which is widely distributed in the Indian Ocean from 25°N to 40°S, is one of the main target species of the Indian Ocean commercial tuna fishery. In recent years, China longline fleets have also targeted the albacore in the Indian Ocean. At present, several stock assessment models have been used to assess the Indian Ocean albacore tuna to determine the status of their stocks. However, there has been a substantial uncertainty regarding the results of these models. Therefore, in this paper, we have analyzed the factors influencing stock assessment for the Indian Ocean albacore tuna. This paper argues that: (1) substantial uncertainty exists in the catch and catch-at-size or catch-at-age data, because there were no, or incomplete, or incorrectly classified data from some important fleets reported, and the number of samples for size frequency data was very low, or the sampling protocols of the collection of size data changed with time; (2) although the catch per unit effort (CPUE) was standardized, the impacts of the changes in target species and the inhomogeneous distribution of fishing efforts of the fleets have still degraded the quality of the standardized CPUE; (3) because there were very few or limited studies on the biology of the Indian Ocean albacore, knowledge about their population structure, reproduction, growth, and natural mortality is limited, which has led to the values of some important biological parameters in the stock assessment models being set by using the results from the other oceans; (4) although the ocean environment has significant influences on the biomass dynamics and distribution of the Indian ocean albacore, only a few stock assessment models take these influences into account. These aforementioned issues have resulted in great uncertainties of the stock assessment. In the future, we need to further explore approaches to improve the quality of the stock assessment. However, at the same time, we have to develop a management strategy evaluation framework for the Indian Ocean albacore tuna to avoid the impacts of uncertainties of the stock assessment on the sustainable development of the fishery.

Key words: Indian Ocean; *Thunnus alalunga*; stock assessment; fisheries data; stock structure; ocean environmental impacts

Corresponding author: GUAN Wenjiang. E-mail: wjguan@shou.edu.cn