

DOI: 10.12264/JFSC2021-0610

种群模拟在渔业资源评估中的研究现状及展望

耿喆^{1, 2, 3}, 王扬^{1, 2, 3}, 戴小杰^{1, 2, 3}, 朱江峰^{1, 2, 3}

1. 上海海洋大学海洋学院, 上海 201306;
2. 农业部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306

摘要: 随着渔业资源评估理论、数理统计方法和计算机技术的进步, 资源评估模型朝着多样化和复杂化不断发展, 其中种群模拟技术是检测模型适用性和局限性的重要手段。该技术由种群仿真理念发展而来, 通过模拟“真实”种群的方式, 对资源评估结果和管理策略进行有效的评价和预测, 并凭借可结合海洋环境因子、鱼类洄游空间分布以及多鱼种渔业进行资源评估的特性, 已成为开发新资源的重要评估方法之一。为此, 本文对种群模拟的结构和发展过程进行了回顾, 对该技术的核心组成部分操作模型和常见的四类误差(过程误差、观测误差、模型结构误差和管理误差)展开分类讨论。此外, 本文还结合近年来迅速发展的数据缺乏和数据适中模型的特点, 根据实际应用案例对种群模拟的作用和使用前景进行梳理, 并就种群模拟技术发展中存在的主要问题和潜在解决办法提出分析和建议。

关键词: 种群模拟; 渔业资源评估; 渔业管理; 误差结构; 数据缺乏模型

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2022)08–1236–10

随着人们对鱼类种群数量变动规律认识的深入, 以及数理统计方法和计算机技术的发展, 越来越多来源的渔业数据、调查数据和生物学环节被考虑进渔业资源评估中, 使经典评估模型向复杂化和多样化发展^[1]。另一方面, 为满足全球范围内对渔业资源评估的需求, 用于数据缺乏渔业的一系列新型评估方法(data-limit methods, DLMs)也在不断涌现^[2], 仅 2006–2014 年间就有超过 16 种新方法被用于管理美国境内渔业^[3–4]。随着更多评估模型和方法的提出, 模型选择和使用难度也在相应增加^[5]。种群模拟方法依靠计算机模拟技术的发展, 通过“真实”种群的构建, 成为测试、筛选和评价管理策略的有效途径。种群构造过程中, 通常会加入资源评估中易被忽略的误差项来模拟“真实”种群, 包括测量、评估、作业和政策实施等过程中的不确定性^[6–7]。

种群模拟技术发展至今, 除保留了最初的根

据种群生活史信息、渔业渔获量信息和管理目标直接制定捕捞策略的功能外^[8–9], 还开发出如下功能: (1)对现有管理策略进行评价和预测(management strategy evaluation, MSE)^[10–11]; (2)测试不同程度的数据缺失或偏差状况下资源评估模型和方法的容错性与精确度^[12–14]; (3)对参数估计方法和其他辅助资源评估的模型进行测试如: 目标函数的权重设置^[15]、渔具选择性估计^[16]、自然死亡系数估算^[17]和评估诊断模型^[18]等。

2013 年世界资源评估方法大会期间, 国际海洋考察理事会(ICES)联合各区域性渔业组织成立种群模拟工作组, 旨在确定各鱼种最佳的评估模型和各模型的适用范围^[19]。联合国粮农组织也于 2014 年成立专项工作组, 对几种主要的数据缺乏条件下的渔业资源评估模型的可靠性进行种群模拟测试^[20]。在全球范围内, 种群模拟日趋成为渔业资源评估中的前沿技术, 有着广泛的应用前景,

收稿日期: 2021-12-31; **修订日期:** 2022-05-11.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0901202); 国家自然科学基金项目(41676120); 农业农村部全球渔业资源调查监测专项(公海渔业资源综合科学调查)

作者简介: 耿喆(1993–), 男, 博士后, 研究方向为种群动力学与渔业资源评估. E-mail: zgeng@shou.edu.cn

通信作者: 朱江峰, 教授, 研究方向为渔业资源评估. E-mail: jfzhu@shou.edu.cn

种群构建过程中的问题也成为各国学者讨论的热点。因此, 本文依据误差类型对种群模拟的研究现状进行分类和总结, 并对未来发展趋势展开讨论, 旨在为此类方法的应用提供理论支持和参考。

1 种群模拟基本结构

种群模拟应用时通常由 4 部分构成(表 1), (1)操作模型(operating model): 根据假设或已知的生活史信息、渔获量信息和年龄组成等构建有时间序列的种群动态^[21]; (2)观测模型(observation model): 模拟有偏差或无偏差渔业数据和调查数据^[16]; (3)估算模型(estimation model): 依据观测

模型生成的数据进行评估, 并生成捕捞策略; (4)预测模型或评价体系, 用于量化评估管理结果及资源预测。应用时会根据不同的研究目的, 在种群模拟的各部分加入不同类型的误差, 以达到模型选择或指导数据收集的作用^[6]。

通常种群模拟技术中的操作模型会略复杂于需要测试的评估模型, 以解释资源评估误差来源和考量评估模型的适用范围。而当操作模型过于复杂导致误差来源难以判断时, 可通过敏感性分析和改变权重的方法查找误差项^[1]。此外, 利用种群模拟进行管理策略评价时^[10], 其操作模型需与评估模型一致, 通过 Bootstrap 方法生成误差构建操作模型进行模型自检(self-testing)和预测^[19]。

表 1 种群模拟研究的基本结构及其应用方法和作用
bab. 1 The basic structure of population simulation and its application methods and functions

基本结构 basic structure	应用方法 method of application	结构作用 structure function
操作模型 operating model	通常由完整的资源评估模型构成如年龄(体长结构模型)和综合模型, 操作模型会略复杂于需要测试的评估模型, 以解释资源评估误差来源和考量评估模型的适用范围	利用渔业资源评估模型及结果构建完整的种群动态
观测模型 observation model	可采用 Bootstrap、Monte Carlo 和重采样等统计模拟方法, 不同数据类型应采用不同分布的误差结构, 如渔获量数据误差服从正态分布而体长结构数据误差则服从二项式分布。	根据操作模型输出的预测值, 结合观测数据误差分布模拟渔获量和调查数据等信息
估算模型 estimation model	由待测试的资源评估模型构成, 该结构输出结果应为渔获量或捕捞努力量以进行输入(input)或输出(output)捕捞限额。	基于观测模型输出的全部或部分数据, 使用待测试的资源评估模型形成管理策略
评价体系 performance metrics	通常由图表等定性或量化分析方法构成, 也可利用线性回归等方式对结果进行总结。	对多组模拟种群的评估效能和参数设置的敏感性进行总结以及量化分析

2 常见操作模型

2.1 剩余产量模型

构建“真实”种群动态时, 通常选用经典的种群动态模型(population dynamics model)。剩余产量模型(Production model)仅需要渔获量数据、资源丰度或捕捞努力量数据^[22], 虽缺少完整的生物学意义和演化形式^[5], 但因其结构简单易于模拟, 在计算机技术相对薄弱的 20 世纪 90 年代被使用(式 1)。Polacheck 曾通过该方法比较当时应用最广泛的两种剩余产量模型, 过程误差估计量模型(process-error estimators)和观测误差统计量模型(observation-error estimators), 首先用两组模型分别对资源状况进行评估, 再依据两组评估结果和

Monte Carlo 方法构建两组操作模型并对其进行二次评估, 发现过程误差估计量模型拟合结果会明显优于观测误差统计量模型^[23]。

$$B_{t+1} = B_t + G_t - C_t \tag{1}$$

剩余产量模型构结构简单, 可用于控制变量进行单一问题的研究^[24], 如内禀增长率 r 估算、观测误差影响等。但由于缺乏对自然死亡系数、繁殖力和性成熟等生物过程的估计, 以及缺乏对种群年龄结构的考虑, 现阶段已很少被用作操作模型的构建。此外单位补充量渔获量(yield-per-recruits, YPR)模型可通过 Beverton-Holt 或 Ricker 的亲体补充量关系, 反映补充量恒定状况下的产量与捕捞强度之间的关系^[25]。该模型增加了自然死亡、生长和补充等生物过程, 但其仅能反映当前资源开

发状况是否存在过度捕捞无法对具体的捕捞限额(如 MSY)进行设置, 基于 YPR 的操作模型常见于早期的种群模拟研究中, 包括澳大利亚对虾渔业和渔业丢率影响等研究^[25-26]。

2.2 年龄结构模型

统计年龄结构模型(statistical catch-at-age models)是操作模型构建中使用最为广泛的模型, 包括 ASAP 模型(age structured stock assessment program)^[27]、SS (stock synthesis) 模型^[28]和 Multifan-CL 模型^[29]等。该类模型可描述种群繁殖、自然死亡、生长等生物学过程^[5], 同时也考虑到渔业生产作业中对各年龄段种群的选择和丢弃情况, 可更真实的还原种群动态。该模型可准确赋值生物学参数和部分描述种群特征参数, 因此被诸多研究用于评估模型对参数错误估计的容错性, 如陡度 h ^[12], 初始资源状况^[13, 21]和渔具选择性^[30-31]等, 此外该模型也被用于测试模型诊断工具的效果^[18]和直接制定管理策略^[32]。年龄结构产量模型(age structure production model, ASPM)通过简化渔业选择性和过程误差使模型精简, 在以虾^[33]、蟹^[34]和岩礁性鱼类等(作业方式选择性差异小)渔业为研究对象的种群模拟中使用。

2.3 综合结构模型

综合结构模型(integrated analysis, IA)在传统资源评估模型基础上加入了对洄游、空间分布和环境因素的理解^[35-36], 可利用的数据包括标记放流数据、环境数据和体长组成数据等。利用种群模拟技术灵活可变的特性, 研究者将更多的渔业环节和生物演化过程加入操作模型, 通过与传统评估模型的比较, 从而促进新模型的开发和指导数据收集方向。例如: Maunders 等^[37]通过环境变化解释补充量波动, 相比于传统评估模型, 该方法可大大降低评估中过程误差造成的不确定性; Lee 等^[16]以太平洋蓝鳍金枪鱼为例, 以伴随年龄结构的洄游行为(成体自西太平洋向东太平洋洄游)设计操作模型, 通过比较当前常见的几种解决办法, 证明 FAA (fleet at area)方法^[28]通过假设各渔具在各区域均有独立的选择性是评估年龄结构洄游行为的最佳方案。

3 常见误差类型下的种群模拟

3.1 过程误差模拟

过程误差通常指由生物体自身和环境造成的误差, 常表现为自然死亡率、繁殖力和环境容纳量等参数的年间波动^[38]。不考虑环境因子时, 通过对上述参数叠加均值为零的对数分布或正态分布随机误差模拟该类误差, 该过程中对误差波动幅度除直接赋值外, 还可参考传统资源评估的输出结果, 如: SS3 评估结果中补充量标准差参数(recruitment deviation)和剩余产量模型评估结果过程误差标准误参数(process error)。Zhang^[14]曾以大西洋鳕(*Gadus morhua*)为例, 通过叠加不同幅度的过程误差, 证明大幅度的过程误差会增加 logistic 剩余产量模型高估评估结果的风险。当考虑环境因子的影响时, 通常引入新的参数用于描述环境因子与上述参数的关系^[39], 此外该过程中还需增加平衡参数用于保证引入环境因素后过程误差均值仍然为零^[37]。

3.2 观测误差模拟

观测误差指数据收集过程中产生的误差, 包括测量误差和捕捞效率的变动, 以及渔业调查获得丰度数据过程中产生的误差, 该类误差可通过标准化和体长体重曲线进行适当估计, 但在集群鱼类中, 因环境因素造成调查地点资源丰度发生的变化通常难以估计^[40]。以该类误差开展的模拟研究集中在对渔业选择性的估计, 选择性通常由渔具易损性(gear vulnerability)和种群可捕性(fish availability)共同决定。传统资源评估由于缺少标记放流数据, 通常只使用体长(或年龄)组成数据估算选择性, 但现实中体长组成数据由渔具选择性、种群年龄结构和空间分布共同决定^[41], 而种群模拟技术恰好可用于上述问题的讨论。Hulson 等^[31]曾分别构建中等和长生命周期种群, 讨论渔业调查船与生产船选择性不匹配时, 获取的丰度数据对各自种群评估结果的影响; Goethel 等^[42]曾模拟存在时空差异的大西洋黄盖鲽(*Limanda ferruginea*)对是否使用标记放流数据和如何使用标记放流数据展开讨论; Lauretta 等^[43]则通过模拟大西洋蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)和黄鳍金枪鱼

(*Thunnus albacares*)种群对不同标记放流站点设计方法的容错性展开讨论。以上种群模拟过程中, 往往使用均匀的随机分布描述未知的种群洄游、分布和产卵场等行为, 因此该方法如何模拟环境依赖性强的鱼类(中上层小型鱼类)有待进一步讨论。

3.3 模型结构误差模拟

模型结构误差指模型中参数估算错误, 以及模型自身结构产生的误差, 例如: 不同自然死亡系数估算方法^[44]、不同亲体补充量模型^[45]以及不同目标函数拟合方法^[46]等。模拟该类误差通常采用跨模型(Cross-Model)检测的方式^[19], 即构建更复杂的模拟种群, 用于检测相对简单的评估模型和方法。当无法产生更复杂模拟种群时, 也可依据两组模型分别构建模拟种群交互评估比较估算结果^[23]。例如检测错误的种群划分对种群管理的影响时, Kerr 等^[47]以大西洋鳕(*Gadus morhua*)为例模拟构建了更接近现实情况的 3 个相对独立的生物种群, 而管理时只将其划分为 2 个相对独立的管理集群, 讨论由此产生的不匹配的生物学数据和渔业数据对评估的影响。在数据缺乏状况下资源评估方法的开发过程中也常常使用该类模拟, 用于衡量不同数据缺乏状况下(如: 低质量渔获量数据、匮乏生物学研究和设置错误权重等)模型的容错性和评估精度^[8, 12-13, 48]。此外, 该类误差模拟也被用于评价和开发模型诊断工具, 如 Carvalho 等^[18]通过种群模拟构造错误的资源评估结果, 比较残差诊断图、参数相关性分析^[49]、回顾性分析^[50]和 ASPM 模型^[51]诊断错误评估结果

的能力; Piner 等^[52]也曾提出通过种群模拟的方法诊断错误模型设置, 即固定所有参数构建“真实”种群 D_0 , 增加其他参数的不确定性(除被检测参数 P)构建模拟种群($D_1, D_2, \dots, D_k$), 对种群 $D_1 \sim D_k$ 进行评估得到参数 P 的分布($P_1, P_2, \dots, P_k$), 再对“真实”种群 D_0 进行评估得到参数 P_0 , 最终依据参数估算结果 P_0 和 $P_1 \sim P_k$ 的分布运用统计学方法计算拒绝参数设定的概率。

3.4 实施误差模拟

实施误差指管理措施实施过程中产生的误差, 如丢弃率、误报率和非法捕捞等^[6]。由于渔获量重建技术尚未完全成熟, 历史渔获量缺失对模型评估的影响尚处于发展阶段, 随着各国际组织对数据收集重视程度的加深, 该项误差有随时间逐渐变小的趋势^[53]。丢弃率由资源丰度、捕捞成本和配额等因素共同决定, Needle^[54]曾在黑线鳕(*Melanogrammus aeglefinus*)的 MSE 中根据其年龄设定大致随时间变化的丢弃率。目前关于实施误差的模拟, 多集中在 MSE 方法和依据 HCR(harvest control rule)开展的资源预测中^[24, 55], 即结合评估结果应用含误差的总许可渔获量(TAC, Total Allowable Catch)对资源状况进行管理和预测(图 1)。

4 种群模拟的应用前景

4.1 数据缺乏模型

数据缺乏方法是缺少渔业数据、常规资源评估模型不适用情况下的潜在工具, 可以为渔业管理提供科学依据, 但多数方法在开发时未经过广

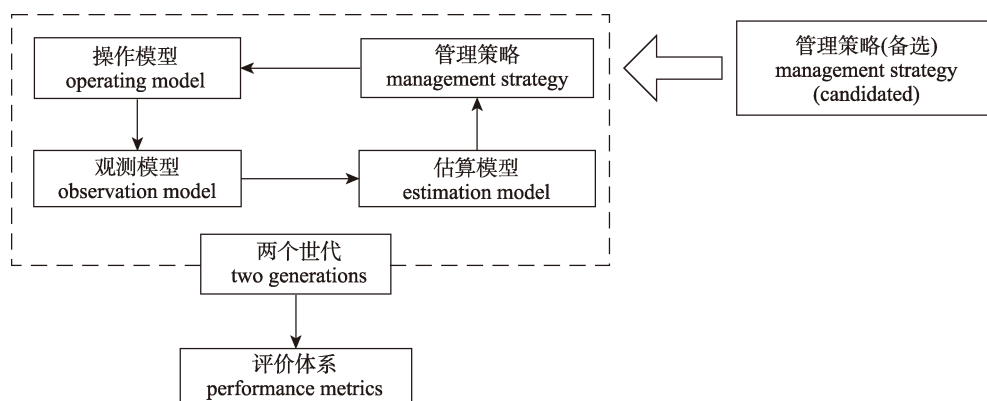


图 1 管理策略评价体系示意图

Fig. 1 Diagram of management strategy evaluation

泛的测试,因此局限性和适用范围是运用数据缺乏方法时应重点考虑的问题^[56]。由于我国渔业数据收集存在指标体系不完整,数据核实制度缺失和统计信息滞后等问题,近海多数渔业均存在不同程度和类型的数据缺乏状况^[57]。因此许多学者将 CMSY、BSM (Bayesian state-space model)和 LBB (length-based Bayesian biomass)等数据缺乏模型广泛应用于黄海、渤海和西北太平洋等我国境内和相邻海域的渔业资源评估^[58-61]。上述研究能在短时间内通过部分管理测考点的计算(如 MSY)填补渔获量限额研究领域的空白,但由于数据缺失问题上述模型的评估结果均无法验证,进而增加了不可逆的渔业资源管理的不确定性。

以渔获量模型为例(catch-only), DCAC 模型十分依赖对种群损耗参数的优先预判,该参数无法通过量化得出的,只能依靠相关从业者的经验或管理者的主观判断^[2]。Catch-MSY 模型则基于此前模型开发者的经验公式,评估的起始和终止年份的选择会直接影响管理参考点的判断^[62]。以印度洋大青鲨为例,当使用相同数据时,两组模型会得出差异较大的评估结果,但却无法根据输出结果直接评价模型优劣^[63]。而采用种群模拟方法,可以横向比较出 DCAC 会得出相对保守和悲观的结果,适用于濒危或急需保护的渔业,而 Catch-MSY 模型则可以对渔获量数据无缺失的渔业进行更精确的评估,从而提高资源使用效率^[8,21]。

此外,种群模拟还可以通过构建操作模型和观测模型来模拟数据缺乏造成的所有不确定性直接对捕捞措施进行测试,从而越过对资源现状的描述。该方法有数据需求量少、适用范围广和易操作等特点,并已在多种小型渔业中应用^[8,24]。但也有学者指出,该方法无法描述历史资源变动,即资源状况始终处于未知状况,因此模型会采用更保守的捕捞策略来降低过度捕捞风险。并在长时间实施该方法后,每年对管理策略的调整幅度会逐渐增大,因此当前该方法只能短时间替代传统资源评估模型^[34]。Data - Limited Methods Toolkit (DLM tool)作为一款高度集成的数据缺乏方法工具包,不但可以运行 DCAC、DBSRA 和易

Catch-MSY 等方法,还可以通过参数设定构建简的操作模型以实现管理策略评价和数据缺乏方法敏感性测试^[64]。

4.2 数据适中模型

数据适中(data-moderate)通常指含有相对资源丰度(或捕捞努力量)和渔获量数据,但缺乏体长数据的情况。该类模型已可以通过诊断工具对模型的拟合情况进行初步判断,但由于参数需求量少,模型通常将多个生物学进程整合,十分依赖于参数估计和数据收集的准确性^[5]。种群模拟技术是检验参数估算方法和衡量数据误差风险的有效手段。以使用范围最广且最接近完整资源评估的剩余产量模型为例,通过种群统计学利用生物学信息估算内禀增长率的先验分布,再将该分布与剩余产量模型相结合,是近年来较受欢迎的资源评估方案^[65]。Geng 等^[66]利用种群模拟技术揭示了将种群统计分析结果直接纳入贝叶斯剩余产量模型的风险,尤其是在渔获量和相对丰度数据存在高度观测误差情况下,模型会更倾向于选择高估的内禀增长率。因此在数据质量较差时,应当适当调整种群统计学估算的先验分布,以平衡剩余产量模型忽略年龄结构而产生的模型内在结构(mis-specification)误差。此外,种群模拟还可用于测试不同数据类型对资源评估模型的贡献度,以指导未来的数据收集工作^[67]。

5 问题与展望

种群模拟在构建洄游、分布、产卵等未知的生物学过程时通常采用均匀随机分布的原则^[16,43],该方法难以反映小型鱼类的集群现象,其模拟结果往往倾向于保守丧失评估精度^[40],因此在构架模拟种群时恰当的引入环境因子能构建更“真实”的种群。Lee 等^[16]已通过种群模拟证明 FAA 方法可能是单鱼种资源评估中,估算随年龄洄游种群选择性时容错性最高的方法,但其与真实评估结果仍有不小差距,而 Thorson 等^[68]通过种群模拟提出的结合多鱼种数据共同估算选择性和捕捞能力可能更接近真实情况。现阶段,多鱼种和基于生态系统的种群模拟由于需要大量数据的支持仍

处于发展中,但与多鱼种资源评估模型类似,其必将成为未来重要的研究方向^[69]。

在数据缺乏状况下,可通过种群模拟技术尽可能多的构建模拟种群以涵盖由数据缺乏造成的所有不确定性,从而跳过对资源现状的描述直接制定捕捞策略。该方法有数据需求量少、适用范围广和易操作等特点,并已在多种小型渔业中应用^[8,24]。但也有学者指出,该方法无法描述历史资源变动,即资源状况始终处于未知状况,因此模型会采用更保守的捕捞策略来降低过度捕捞风险。并在长时间实施该方法后,每年对管理策略的调整幅度会逐渐增大^[34],因此当前该方法只能短时间替代传统资源评估模型。此外,通过复杂模型判断数据缺乏模型评估能力时,需充分考虑到两者模型假设是否相同,如DCAC和DB-SRA模型中通常需要 F_{MSY} 和 M 的比值,该 F_{MSY} 为最大可持续产量下对应的捕捞死亡系数(与 B_{MSY} 有关),但使用年龄结构模型构建模拟种群输出的 F_{MSY} 通常由 $F_{0.4}$ (40%产卵潜力下对应的捕捞死亡系数)直接替代^[70],当 B_{MSY} 与40%产卵潜力对应的生物量有明显差异时显然难以通过该模拟测试评估模型,因此对上述模型赋值时需谨慎考虑种群特性。

考虑到错误的渔业管理措施对渔业资源的损害往往是不可逆的,因此我们在制定管理措施之前,需要根据不同的数据缺乏情况筛选出最为恰当的数据缺乏方法。随着对渔业管理策略选择的认识加深,MSE逐步成为各区域性渔业管理组织筛选和决定管理措施的必要步骤(如,印度洋金枪鱼委员会、北太平洋渔业委员会和美洲间热带金枪鱼委员会等)。MSE可帮助管理者依据不同管理目标和期望(如最大程度可持续利用、保守开发或者种群重建)选择对应的管理措施。本研究建议采用基于年龄结构模拟种群开展MSE研究,测试基于数据缺乏方法的捕捞控制规则(HCR)、基于总可捕量(TAC)和捕捞努力量控制的管理措施的效果。但也需注意在种群模拟技术中,传统资源评估中的MSE方法与数据缺乏状况下直接生成的HCR均不可能完全拒绝过度捕捞,其仅可依据管理目标制定相对合适的管理策略^[71]。随着各学科

的交叉合作,种群模拟技术在未来能有效结合经济、社会、保育等多方面因素制定更科学有效的管理策略。

参考文献:

- [1] Maunder M N, Punt A E. A review of integrated analysis in fisheries stock assessment[J]. Fisheries Research, 2013, 142: 61-74.
- [2] Geng Z, Zhu J F, Xia M, et al. Estimate of sustainable yield of blue shark (*Prionace glauca*) in the Indian Ocean using data-poor approach[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(5): 1099-1106. [耿喆, 朱江峰, 夏萌, 等. 运用数据缺乏方法估算印度洋大青鲨可持续渔获量[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 1099-1106.]
- [3] Newman D, Carruthers T, MacCall A, et al. Improving the Science and Management of Data-limited Fisheries an Evaluation of Current Methods and Recommended Approaches[R]. Natural Resources Defense Council, NRDC Report, 2014(10): 14-09-B
- [4] Newman D, Berkson J, Suatoni L. Current methods for setting catch limits for data-limited fish stocks in the United States[J]. Fisheries Research, 2015, 164: 86-93.
- [5] Guan W J, Tian S Q, Zhu J F, et al. A review of fisheries stock assessment models[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(5): 1112-1120. [官文江, 田思泉, 朱江峰, 等. 渔业资源评估模型的研究现状与展望[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1112-1120.]
- [6] Butterworth D S, Punt A E. Experiences in the evaluation and implementation of management procedures[J]. ICES Journal of Marine Science, 1999, 56(6): 985-998.
- [7] Walters C J. A generalized computer simulation model for fish population studies[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1969, 98(3): 505-512.
- [8] Carruthers T R, Kell L T, Butterworth D D S, et al. Performance review of simple management procedures[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 73(2): 464-482.
- [9] Butterworth D S, Geromont H F. Evaluation of a class of possible simple interim management procedures for the Namibian Hake fishery[J]. South African Journal of Marine Science, 2001, 23(1): 357-374.
- [10] Punt A E, Butterworth D S, de Moor C L, et al. Management strategy evaluation: Best practices[J]. Fish and Fisheries, 2016, 17(2): 303-334.
- [11] Tong Y H, Chen X J, Kolody D. Evaluation of three harvest control rules for bigeye tuna (*Thunnus obesus*) fisheries in the Indian Ocean[J]. Journal of Ocean University of China, 2014, 13(5): 811-819.

- [12] Wetzel C R. Challenges of Data-limited Stock Assessments Simple Vs. Complex Stock Assessment Techniques and the Influence of Data[D]. Washington: University of Washington, 2011.
- [13] Wetzel C R, Punt A E. Evaluating the performance of data-moderate and catch-only assessment methods for US west coast groundfish[J]. *Fisheries Research*, 2015, 171: 170-187.
- [14] Zhang Z E. Evaluation of logistic surplus production model through simulations[J]. *Fisheries Research*, 2013, 140: 36-45.
- [15] Punt A E. Some insights into data weighting in integrated stock assessments[J]. *Fisheries Research*, 2017, 192: 52-65.
- [16] Lee H H, Piner K R, Maunder M N, et al. Evaluation of alternative modelling approaches to account for spatial effects due to age-based movement[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, 74(11): 1832-1844.
- [17] Lee H H, Maunder M N, Piner K R, et al. Estimating natural mortality within a fisheries stock assessment model: An evaluation using simulation analysis based on twelve stock assessments[J]. *Fisheries Research*, 2011, 109(1): 89-94.
- [18] Carvalho F, Punt A E, Chang Y J, et al. Can diagnostic tests help identify model misspecification in integrated stock assessments? [J]. *Fisheries Research*, 2017, 192: 28-40.
- [19] Deroba J J, Butterworth D S, Methot R D, et al. Simulation testing the robustness of stock assessment models to error: Some results from the ICES strategic initiative on stock assessment methods[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2014, 72(1): 19-30.
- [20] Rosenberg A A, Fogarty M J, Cooper A B, et al. Developing new approaches to global stock status assessment and fishery production potential of the seas[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.
- [21] Carruthers T R, Punt A E, Walters C J, et al. Evaluating methods for setting catch limits in data-limited fisheries[J]. *Fisheries Research*, 2014, 153: 48-68.
- [22] Schaefer M B. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean[J]. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 1957, 2(6): 247-285.
- [23] Polacheck T, Hilborn R, Punt A E. Fitting surplus production models: Comparing methods and measuring uncertainty[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993, 50(12): 2597-2607.
- [24] Breen P A. A voluntary harvest control rule for a New Zealand rock lobster (*Jasus edwardsii*) stock[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2009, 43(4): 941-951.
- [25] Chen Y, Xu L X, Chen X J, et al. A simulation study of impacts of at-sea discarding and bycatch on the estimation of biological reference points $F_{0.1}$ and F_{max} [J]. *Fisheries Research*, 2007, 85(1-2): 14-22.
- [26] Die D J, Watson R A. A per-recruit simulation model for evaluating spatial closures in an Australian penaeid fishery[J]. *Aquatic Living Resources*, 1992, 5(3): 145-153.
- [27] Legault C M, Restrepo V R. A flexible forward age-structured assessment program[J]. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers*, 1998, 49: 246-253.
- [28] Methot R D Jr, Wetzel C R. Stock synthesis: A biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management[J]. *Fisheries Research*, 2013, 142: 86-99.
- [29] 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(2): 301-317.
- [30] Hurtado-Ferro F, Punt A E, Hill K T. Use of multiple selectivity patterns as a proxy for spatial structure[J]. *Fisheries Research*, 2014, 158: 102-115.
- [31] Hulson P J F, Hanselman D H. Tradeoffs between bias, robustness, and common sense when choosing selectivity forms[J]. *Fisheries Research*, 2014, 158: 63-73.
- [32] Dichmont C M, Deng A, Punt A E, et al. Management strategies for short-lived species: The case of Australia & a poor Northern Prawn Fishery: 1. Accounting for multiple species, spatial structure and implementation uncertainty when evaluating risk[J]. *Fisheries Research*, 2006, 82(1-3): 204-220.
- [33] Parker D, Winker H, Bernard A, et al. Evaluating long-term monitoring of temperate reef fishes: A simulation testing framework to compare methods[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 333: 1-10.
- [34] Dichmont C M, Brown I W. A case study in successful management of a data-poor fishery using simple decision rules: The Queensland spanner crab fishery[J]. *Marine and Coastal Fisheries*, 2010, 2(1): 1-13.
- [35] Maunder M N, Langley A D. Integrating the standardization of catch-per-unit-of-effort into stock assessment models: Testing a population dynamics model and using multiple data types[J]. *Fisheries Research*, 2004, 70(2-3): 389-395.
- [36] Maunder M N, Punt A E. A review of integrated analysis in fisheries stock assessment[J]. *Fisheries Research*, 2013, 142:

- 61-74.
- [37] Maunder M, Watters G. A general framework for integrating environmental time series into stock assessment models: Model description, simulation testing, and example [J]. Fishery Bulletin, 2003, 101(1): 89-99.
- [38] Francis R, Shotton R. "Risk" in fisheries management: A review[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54(8): 1699-1715.
- [39] Wang J T, Chen X J, Tanaka K, et al. Environmental influences on commercial oceanic ommastrephid squids: A stock assessment perspective[J]. Scientia Marina, 2017, 81(1): 37.
- [40] de Oliveira J A A, Butterworth D S, Roel B A, et al. The application of a management procedure to regulate the directed and bycatch fishery of South African sardine *Sardinops sagax*[J]. South African Journal of Marine Science, 1998, 19(1): 449-469.
- [41] Langseth B J, Schueller A M, Shertzer K W, et al. Management implications of temporally and spatially varying catchability for the Gulf of Mexico menhaden fishery[J]. Fisheries Research, 2016, 181: 186-197.
- [42] Goethel D R, Legault C M, Cadrin S X. Testing the performance of a spatially explicit tag-integrated stock assessment model of yellowtail flounder (*Limanda ferruginea*) through simulation analysis[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2015, 72(4): 582-601.
- [43] Lauretta M V, Goethel D R. The robustness of Brownie tag return models to complex spatiotemporal dynamics evaluated through simulation analysis[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2017, 74(11): 1845-1861.
- [44] Rice J, Semba Y. Age and sex specific natural mortality of the blue shark (*Prionace glauca*) in the North Pacific Ocean[R]. ISC/14/SHARKWG-1, 2014.
- [45] Punt A E, Smith A D M. Harvest strategy evaluation for the eastern stock of gemfish (*Rexea solandri*)[J]. ICES Journal of Marine Science, 1999, 56(6): 860-875.
- [46] Chen Y, Breen P A, Andrew N L. Impacts of outliers and mis-specification of priors on Bayesian fisheries-stock assessment[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(11): 2293-2305.
- [47] Kerr L A, Cadrin S X, Kovach A I. Consequences of a mismatch between biological and management units on our perception of Atlantic cod off New England[J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71(6): 1366-1381.
- [48] Carruthers T R, Walters C J, McAllister M K. Evaluating methods that classify fisheries stock status using only fisheries catch data[J]. Fisheries Research, 2012, 119-120: 66-79.
- [49] Guan W J, Tang L, Zhu J F, 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.
- [50] Cadigan N G, Farrell P J. Local influence diagnostics for the retrospective problem in sequential population analysis[J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(2): 256-265.
- [51] Punt A E, Butterworth D S, Penney A J. Stock assessment and risk analysis for the South Atlantic population of albacore *Thunnus alalunga* using an age-structured production model[J]. South African Journal of Marine Science, 1995, 16(1): 287-310.
- [52] Piner K R, Lee H H, Maunder M N, et al. A simulation-based method to determine model misspecification: Examples using natural mortality and population dynamics models[J]. Marine and Coastal Fisheries, 2011, 3(1): 336-343.
- [53] IOTC. Stock assessment of blue shark (*Prionace glauca*) in the Indian ocean[R], IOTC, 2015, WPEB11-49
- [54] Needle C L. Management strategy evaluation for North Sea haddock[J]. Fisheries Research, 2008, 94(2): 141-150.
- [55] Cooke J G. Improvement of fishery-management advice through simulation testing of harvest algorithms[J]. ICES Journal of Marine Science, 1999, 56(6): 797-810.
- [56] Geng Z, Zhu J F, Xia M, et al. Research progress in fishery stock assessment using data-poor/limited methods[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018(5): 130-137. [耿喆, 朱江峰, 夏萌, 等. 数据缺乏条件下的渔业资源评估方法研究进展 [J]. 海洋湖沼通报, 2018(5): 130-137.]
- [57] Chen Y Y, Tang Y. On improving statistical system of marine fisheries in China[J]. Marine Fisheries, 2012, 34(4): 476-481. [陈园园, 唐议. 关于改善我国海洋渔业统计制度的建议[J]. 海洋渔业, 2012, 34(4): 476-481.]
- [58] Liang C, Xian W W, Liu S D, et al. Assessments of 14 exploited fish and invertebrate stocks in Chinese waters using the LBB method[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 314.
- [59] Liang C, Xian W W, Pauly D. Assessments of 15 exploited fish stocks in Chinese, south Korean and Japanese waters using the CMSY and BSM methods[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 623.
- [60] Wang Y B, Wang Y C, Liang C, et al. Assessment of 12 fish species in the northwest Pacific using the CMSY and BSM methods[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 616.
- [61] Wang Y B, Wang Y C, Liu S D, et al. Stock assessment using LBB method for eight fish species from the Bohai and Yellow Seas[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 164.
- [62] Geng Z, Zhu J F, Wang Y, et al. Stock assessment for Indian

- Ocean blue marlin (*Makaira nigricans*) using Catch-MSY model[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 41(8): 26-35. [耿喆, 朱江峰, 王扬, 等. 应用 Catch-MSY 模型评估印度洋蓝枪鱼资源[J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 26-35.]
- [63] Geng Z. Stock assessment and performance evaluation for data limited fishery: as an example of Indian Ocean blue shark[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021. [耿喆. 数据缺乏状况下的渔业资源评估及效果评价: 以印度洋大青鲨为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.]
- [64] Carruthers T R, Hordyk A R. The Data-Limited Methods Toolkit (DLM tool): An R package for informing management of data-limited populations[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(12): 2388-2395.
- [65] Geng Z, Wang Y, Kindong R, et al. Demographic and harvest analysis for blue shark (*Prionace glauca*) in the Indian Ocean[J]. Regional Studies in Marine Science, 2021, 41: 101583.
- [66] Geng Z, Punt A E, Wang Y, et al. On the dangers of including demographic analysis in Bayesian surplus production models: A case study for Indian Ocean blue shark[J]. Fisheries Research, 2020, 230: 105636.
- [67] Xia M, Carruthers T, Kindong R, et al. How can information contribute to management? value of information (VOI) analysis on Indian Ocean striped marlin (*Kajikia audax*)[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 646174.
- [68] Thorson J T, Berkson J. Evaluating single- and multi-species procedures to estimate time-varying catchability functional parameters[J]. Fisheries Research, 2010, 101(1-2): 38-49.
- [69] van Kirk K F, Quinn T J II, Collie J S, et al. Assessing uncertainty in a multi species age-structured assessment framework: The effects of data limitations and model assumptions[J]. Natural Resource Modeling, 2015, 28(2): 184-205.
- [70] NEFSC. Final report of the working group on re-evaluation of biological reference points for New England groundfish[M]. Northeast Fisheries Science Center Reference Document 02-04. 2002.
- [71] Punt A E, Smith A D M, Cui G R. Review of progress in the introduction of management strategy evaluation (MSE) approaches in Australia South East Fishery[J]. Marine and Freshwater Research, 2001, 52(4): 719.

Research process and prospects of population simulations in fishery stock assessment

GENG Zhe^{1,2,3}, WANG Yang^{1,2,3}, DAI Xiaojie^{1,2,3}, ZHU Jiangfeng^{1,2,3}

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

2. Key Laboratory of Exploitation of Oceanic Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;

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

Abstract: Stock assessment is the key to the scientific management and decision-making of fishery resources. With improvements in stock assessment and computer performance, stock assessments are developing toward diversification and complexity. In the last decade, more than 16 new data-limited/poor stock assessment methods and approaches have been developed for species and fisheries with low-quality data. However, there is a lack of effective tools for developing, selecting, and diagnosing assessment models. Population simulations can promote effective management strategy evaluations by building operating models. Meanwhile, population simulation is an important tool to develop new assessment approaches, due to its ability to flexibly integrate different sources of information, such as environment survey data, tagging and releasing data, and multi-species data. In general, population simulation usually consists of 4 components: the operating models, observation model OM, estimation model, and performance metrics. This study first summarized and reviewed the structure and development of population simulation, then classified and evaluated the advantages and disadvantages of various OMs, namely, a population-dynamics/ surplus-production-model-based OM, statistical catch-at-age models, age structured-stock-assessment-program-based OM, and integrated-analysis-based OM. In addition, for the applications of the population simulation, we summarized the potential problems of four common sources of uncertainty in stock assessment and fishery management: (1) process error, indicating the deviation or bias caused by the species itself and the environment; (2) observation error, reflecting the uncertainty caused by fishery operations, data collection, and time-varying catch efficiency; (3) model error, representing the error of parameter estimation and model structure (for example, the equilibrium production model ignores the age structure); and (4) management implementation error, indicating errors generated during the implementation of management measures, such as discard rate, misreporting, and illegal fishing. In addition, we used practical cases to analyze the role and prospect of population simulation in data-limited and data-moderated methods. Simulation analysis can play an effective role in diagnostics when selecting methods on which to base stock assessments. It is suggested that the following issues should be considered and addressed in future research. (1) Most data-limited methods contain potential and essential assumptions, but may not reflect the biological character of the assessed species, which should be considered by decision-makers in model-based management. (2) Multi-species and ecosystem-based population simulation are still under development due to lack of sufficient data, but it will be an important research direction in the future. (3) Neither management strategy evaluation nor stock assessment can completely reject overfishing, and it is possible to select appropriate management strategies with current information and management objectives. Finally, (4) with cross-disciplinary cooperation, population simulation can effectively combine economic, social, conservation, and other factors to formulate more scientific and effective management strategies.

Key words: population simulation; stock assessment; fishery management; error structure; data-limited methods

Corresponding author: ZHU Jiangfeng. E-mail: jfzhu@shou.edu.cn