

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17399

鱼类自然死亡系数评估研究进展

耿平^{1,2}, 张魁¹, 徐姗楠¹, 陈作志¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部外海渔业开发重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300;

2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306

摘要: 自然死亡系数是渔业资源评估中不可或缺的重要参数, 其准确度直接决定了资源评估结果的可靠性, 进而影响渔业管理策略的制定。本文从生活史参数、标志回捕和年龄结构 3 个方面列举了国内外自然死亡系数的常用评估方法, 讨论了相关方法的优缺点及影响因素, 并以犬齿牙鲆(*Paralichthys dentatus*)和中国近海鱼类为例对比分析不同模型的计算结果。在此基础上, 着重介绍了 Pauly 经验公式在中国近海主要经济鱼类自然死亡系数评估中的应用进展及存在问题。根据渔业资源调查和研究数据现状, 认为现阶段使用 Pauly 经验公式评估中国近海经济鱼类自然死亡系数具有积极作用。

关键词: 自然死亡系数; 评估方法; Pauly 经验公式; 鱼类种群

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)03-0694-11

自然死亡系数(natural mortality coefficient, M)是渔业资源评估和管理中最重要的生物学参数之一^[1]。联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)将其定义为, 由捕捞之外所有因素造成的某个渔业种群单位时间内的相对死亡率, 这些因素包括掠食、衰老、疾病、环境变化等^[2]。除了简易的剩余产量模型以外^[3-4], 所有渔业种群动力模型都需要直接或间接地评估 M 。渔业资源评估结果的可靠程度与 M 的准确程度有明显正相关关系^[5]。Gislason 等^[6]曾指出, 如果没有 M , 根据商业或者科学调查所获得的年龄或规格(体长, 体质量)等生物学数据就无法估算捕捞死亡率, 同时对后期捕捞水平的预测也将失效。更严重的是, M 的错误评估将会对模型计算造成偏差, 进而影响捕捞强度以及捕捞配额的设定^[7]。因此, 在渔业资源评估和管理中, 对 M 的准确评估非常重要。

对于生长、死亡及年龄等渔业生物学参数而言, M 是最难评估的参数之一^[8]。事实上, M 随年龄^[5]、性别、种群以及栖息地环境而异, 同时还受到捕食者、种群内部和种群间的竞争作用影响, 这也使得对 M 的评估愈发困难^[9]。国外学者开展了较多关于 M 评估方法的研究, 但并没有达到令人满意的程度^[10]。研究证实, 通过直接方法来获得 M 是很困难的, 尽管有众多声称可利用标记和遥感数据可靠评估 M 的新方法, 但这些方法通常不具有实用性^[11]。因此大多数资源评估方法中对 M 的估算都依赖于间接方法^[12], 有的直接假定其为常数。国内对 M 的评估方法研究报道较少^[13], 除了传统的指定其为某一常数外, 通常是利用经验公式进行评估, 其中以 Pauly^[14]经验公式最为常见。然而, 验证发现, 部分国内文献中 Pauly 经验公式存在误用的情况。为此, 本文根据收集的文献, 概要介绍了国内外不同评估 M 方法的优缺

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2018-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31602157); 农业部财政专项“南海北部近海渔业资源调查”项目(2014-2018); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201403008).

作者简介: 耿平(1993-), 男, 硕士研究生, 从事渔业资源评估研究. E-mail: bsg1030@live.com

通信作者: 陈作志, 男, 研究员, 从事渔业资源和海洋生态研究. E-mail: zzchen2000@163.com

点及影响因子,重点就 Pauly 经验公式在中国近海主要经济鱼类 M 评估中的应用进行了校验和评述,旨在抛砖引玉,为更好地开展鱼类种群自然死亡系数及资源评估提供参考。

1 自然死亡系数的评估

鱼类的生产力是由生长、补充以及自然死亡3个因素所决定的,因此对 M 的认知有助于分析渔获产量以及种群的恢复力^[15]。在实际应用中,不同构造的评估模型已成为获取参数 M 的主要依据。对于评估模型的选择,通常的步骤包括:

(1) 从理论和实际出发,假定一个有效的和合适的模型系统类别;

(2) 通过限制模型参数,利用数据和系统来确定一个比较适用的模型;

(3) 估算所选模型的参数;

(4) 验证该模型;若选择的模型合适,则利用其进行资源评估;否则,重新从(2)开始^[16]。

Quinn 等^[17]综述了6种评估 M 的常见方法:(1)渔获曲线分析法;(2)体长频率分析法;(3)标志-回捕实验;(4)拟合种群模型;(5)生活史分析(元分析);(6)收集死亡的个体。而 Zheng^[10]认为以上方法都具有很大的不确定性。本文根据不同模型方法中使用的数据类型,从生活史参数、标志回捕和年龄结构等3个方面概述了国内外评估自然死亡系数的常用方法。

1.1 基于生活史参数的评估方法

基于生活史的评估方式描述的是 M 与诸如最大年龄、50%性成熟年龄(T_{m50})、50%性成熟体长(L_{m50})、生长系数(K)、渐近全长(L_{∞})及体质量这些生活史参数之间的强相关关系。根据不同的观测数据,又引申出了许多不同生活史参数与 M 值之间的关系式。例如 Jensen^[18]曾测定了 Beverton-Holt 生活史恒等式中的常数值,提出可利用 Von Bertalanffy 生长系数 K , 性成熟年龄与 M 的关系来评估 M , 并通过对众多鱼类的回归分析得出了新的常量式;同时 Jensen 认为,由于该常量式独立于任何生长模型,因而具有通用性。与此相似, Lorenzen^[19]的模型认为 M 与个体体质量强相关。其将人工养殖与天然水域生态系统中种群的 M 对

比,以年度为单位进行测量,发现即使二者处于相同纬度,自然生态系统中的种群仍具有更高的 M 值。而 Peterson 等^[20]基于体质量针对 M 提出了异速增长模型,以实验为依据的研究表明鱼类种群的自然死亡系数与个体的体重密切相关^[21]。在此之后, McGurk^[22]通过鱼卵、仔鱼的数据对 Peterson-Wroblewski 模型进行了测试,结果表明该模型通常会低估表层鱼类鱼卵、仔鱼的 M 值,这是由于鱼卵、仔鱼的呈斑块空间分布而易遭受捕食者的捕食,从而影响了 M 的估算。Vetter^[12]指出,此类基于众多生活史参数而建立的评估方法,具有以下优点:(1)只需要较小的数据量即能建立模型;(2)可有效地在宏观层面上证明物种的变动趋势以及建立生态学理论。但同时因结果的单一以及对 M 评估的准确性不高,造成难以准确判断该种群 M 的变化趋势以及习性的演变,并且此类方法并不优于回归分析的方法。因此,在数据不够充分,只需要粗略评估 M 时,可以用此类方法。而在利用生活史参数评估过程中,以经验公式最为常见。

基于实验数据所得的关系式即经验公式,即在某参数难以测量或直接获取的成本很高时,通过一个简单的替代关系,转化为对其他某些简便易得的参数求解。其中一个突出的实例就是在渔业资源评估过程中基于生活史参数以及环境变量采用经验公式的评估方法求解 M ^[23]。如 Beverton 等^[24]发现了个体生长速率与 M 之间的关系,并建立了函数式; Kenchington^[25]发现当生长系数 K 能准确估算时,利用 Pauly 公式得到的 M 将具有较高可靠性。此类方法随后被作为评估 M 的工具,尤其是在只有某些生活史参数可获得的情况下。在渔业资源评估中,已广泛运用经验公式估测 M 值,尤其是在发展中国家^[26]。

在此类公式中以 Pauly 经验公式应用最为广泛。该方法基于84种鱼类共175个种群的数据,根据其渐近全长 L_{∞} (cm)、生长系数 K , 以及鱼群栖息地环境平均水温 T 等参数,应用 Pauly 分析发现 M 与生长参数呈负相关关系,而与年平均水温以及生长系数为正相关。所得经验公式如下:

$$\lg M = -0.0066 - 0.279 \lg L_{\infty} + 0.6543 \lg K + 0.4634 \lg T \quad (1)$$

$$\lg M = -0.2107 - 0.0824 \lg W_{\infty} + 0.6757 \lg K + 0.4627 \lg T \quad (2)$$

而詹秉义^[8]在他的《渔业资源评估》一书中,将公式(1)改为以自然常数 e 为底的关系式。

$$\ln M = -0.0152 - 0.279 \ln L_{\infty} + 0.6543 \ln K + 0.4634 \ln T \quad (3)$$

并且由公式(3)分析得出:小型鱼种有大的 M ; 快速生长的鱼种有大的 M ; 栖息地水域温度越高, M 值越高。而由公式(3)可类推得到公式(2)的等价转换公式,即

$$\ln M = -0.48516 - 0.0824 \ln W_{\infty} + 0.6757 \ln K + 0.4627 \ln T \quad (4)$$

同时 Pauly^[14]认为 M 与环境水温有直接关系,鱼类种群栖息地水温越高, M 越高。因为在水温更高的热带环境中,相比于别的栖息地环境,其他条件相同情况下,个体需要摄取更多的能量以满足其较高的新陈代谢需求,故而鱼群有更大概率遭遇饥饿的捕食者,进而造成了更高的自然死亡率。除此之外,Pauly 发现极地附近海域的个体以及鳕科鱼类的评估结果出现较大偏差。

Gislason 对 Pauly 的经验算法提出了改进^[27],在对 163 套数据共 75 种资源进行分析后,其认为 M 与资源种群的渐近体长、生长系数相关,同时与体长存在相关关系,当移除温度因子后,方程总的拟合度基本不变。

$$\ln M = 0.659044546 + 1.444042278 \ln L_{\infty} - 1.691163861 \ln L + 0.897624850 \ln K \quad (5)$$

式中, L 为估算自然死亡系数时对应的体长。徐海龙等^[28]在利用该方法时发现,中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 的 M 值可能会在放流初期被低估而在稳定生长期被高估。

除此之外,以最大年龄为主要参数的经验公式也是在中国近海资源评估中较为常见的一种方法。如 Tanaka^[29]基于 M 值与鱼类寿命成反比关系提出的回归关系,而詹秉义等^[30]依据此关系式利用真鲷 (*Pagrus major*) 等 9 种鱼类的 M 和最大年龄 (t_{λ}) 得出一个更为简易的经验公式:

$$M = -0.0021 + 2.5912 / t_{\lambda} \quad (6)$$

Alverson 等^[31]则通过研究提出 M 和 t_{λ} 及生长参数 K 有如下关系式:

$$M = \frac{3K}{e^{0.38t_{\lambda}K} - 1} \quad (7)$$

1.2 标记回捕法

标记回捕法是评估自然死亡系数时极为常用的一类方法^[32-33]。自从 20 世纪末统计学家以及生物学家致力于利用统计模型评估资源丰度,标记回捕法便受到极大关注^[34-35]。死亡率与年龄相关,并且稚鱼期和幼鱼期阶段的个体具有更高的死亡率,成熟期个体死亡率则较低,到接近最大年龄时死亡率又开始增加。基于单位捕捞努力渔获量 (catch per unit effort, CPUE) 作为表示资源丰度的相对指标,假定捕捞作业过程中可捕系数不随时间而变化,Chapman 等^[36]提出了单位努力量回捕模型。Williams 等^[37]则认为随着时间推移以及捕捞条件不断变化,捕捞概率 (capture probability) 不太可能为恒定值。而实际的资源丰度与捕捞率 (catch rate) 之间的关系无疑是很重要的,因为受到鱼类行为和捕捞条件的影响,即使种群处于衰退状态,其渔获量仍然可能很高^[36]。根据个体放生时的尺寸大小分类,Hampton^[38]以西太平洋热带地区的金枪鱼为研究对象,提出了标记的体长结构模型 (size-structured tagging model), 并利用 VBGF 生长方程计算标记个体放生期间的增长量,结合最大似然估计法计算捕捞死亡系数和 M 值。同时他认为在回捕数据和生长参数可获得的情况下,该方法具有通用性。不同于传统的模型假设,Treble 等^[39]通过实验发现回捕标签的丢失率并不是固定不变的,而是与放生时间成正比,并因此提出了一个时间序列模型。为了降低标签脱落造成的影响,更准确地评估 M 值,Wetherall^[40]提出使用双标签的方法,所得评估结果可认为是无偏量。Brooks 等^[41]提出了泛化的回捕模型,在同时存在休闲性和经济性捕捞的渔业中,允许对各自的捕捞死亡率进行单独估计。Pine 等^[42]总结了基于标记回捕、遥感追踪定位等途径来研究渔业资源状况的方法,并认为联合这些经过改进的模型方法可以极大提高资源评估的准确性。Pollock 等^[43]将标记回捕模型 (tag return models) 与遥感标记模

型(telemetry tagging models)相结合, 利用关于捕捞以及自然死亡的个体信息, 以获得更为精确和有效的无偏估计量。通过模拟分析, Pollock 等^[34]发现当个体的迁移概率为 1 时, 组合方法中 M 的相对标准误差(relative standard error, RSE)结果相对于标记回捕法和遥感标记法的结果有所改善。

而在 2017 年, Thorley 等^[44]对 Kootenay 湖中 2008—2013 年期间大型(≥ 500 mm)强壮红点鲑(*Salvelinus confluentus*)和虹鳟(*Onchorhynchus mykiss*)的研究中, 利用 CJS 模型(Cormack-Jolly-Seber Model)结合贝叶斯分析计算二者 M 值, 在所建立的模型中假设: 标记的个体是总体中的随机样本; 没有标签的影响; 所有个体都被正确识别; 没有个体洄游离开该水域; 在每个时间间隔内重新捕获的可能性无个体差异等。基于这些假设, 众多与 M 相关的影响因素将不被考虑, 同时受各种假设条件的束缚, 即使能得到较为准确的评估结果, 这种估算方法也不具有通用性。

理论上, 标记回捕法可较好地估算自然死亡系数, 尤其是在采用了具有高奖励性的标签(high reward tagging)时, 更可以将休闲渔业过程中的捕捞量影响降至最低。但在实际操作过程中, 标记法具有很高的成本, 同时回补率的可靠性不高, 因此受到很大限制而没有被广泛使用。

1.3 年龄结构的分析法

年龄被认为是潜在影响 M 评估结果的最重要因素, 并且也是评估模型中最为常用的参数^[6]。因而对于渔业数据, 基于年龄的分组方式最为常见。根据年龄信息, 可以获得该种群各年龄段的生长状况, 通过时间序列就能掌握该种群的动态变化。因此依靠年龄结构的种群分析方法逐渐成为主流^[45]。在这之中实际种群分析(Virtual Population Analysis, VPA)^[46]或股分析(Cohort Analysis, CA)^[47]是相对简单的年龄结构模型^[48]。

VPA 是渔业资源评估的经典模型之一, 特别是在评估资源量、捕捞死亡水平以及预报未来的资源量和渔获量方面有着广泛的应用。基本思想是利用每年的渔获量和死亡数据求算年初的资源量, 通过多次的重复逆向计算, 即可得到种群过去的资源变动情况^[13]。CA 方法是 VPA 模型的简化模型, 其将传统 VPA 的非线性计算方法转变

为线性模型。Pope^[47]认为在 M 小于 0.3, 捕捞死亡系数小于 1.2 时, 得到的结果可以极为精确。

实际种群分析(VPA)能够重现渔业的开发史, 王迎宾^[13]利用其实现了在渔业种群的动态中对 M 进行求算, 提出了多种使用分年龄组渔获量及辅助信息估算鱼类 M 的方法, 并通过模拟和渔业实践对方法进行验证, 均得到了比较理想的结果。但补充量(R)数据的质量对 M 估算的影响较大。不同模型和数据的误差结构会影响 M 的估算结果, 广义线性模型和 Pearson 残差分析表明, 正态分布的数据误差和对数正态分布的模型误差得到了较优的 M 估计值。

Maunder 等^[49]认为当可以获得连续的长期年龄结构渔捞数据时, VPA 的计算方法将是首选。但不能忽视的是, 该方法本身具有一定的不确定性, 单纯的分年龄组产量数据并不能计算最高年龄组的捕捞死亡系数^[50]。同时与传统的计算方法相比较, 其对数据的要求更高, 而中国早期的渔业捕捞数据存在着不全、不准的情况。因此, 对于大时间尺度的渔业资源状况分析, 仍是具有局限性的。

2 评估模型的对比分析

2.1 利用不同经验公式计算犬齿牙鲈 M 值

Maunder 等^[51]以犬齿牙鲈(*Paralichthys dentatus*)为例, 对比分析了基于不同生活史参数评估方法所得到的 M 值(表 1)。结果表明, Pauly^[14]和 Gunderson^[52]都给出了近似的 M 值, 而 Pauly 得出的 M 值最高, 并且所有评估结果普遍高于当前所设想的 M 值。Jensen^[18]得出的 M 估计值偏高是由于犬齿牙鲈低龄性成熟个体造成的, 同时雄性个体相对于雌性个体具有更高的 M 值。

增加对其他蝶形目种群 M 值的对比评估, 可更准确分析经验公式与生活史参数间的关系。根据以往使用 Beverton-Holt^[24]公式、Pauly 经验公式, 以及 Gunderson 公式评估某些蝶形目的结果, 并结合 Froese^[53]提供的 M 值(FishBase 通常使用标记回补或渔获曲线分析的方法计算 M 值), 发现所有的估算结果在 0.1~0.6 之间。然而, 大多数的评估结果并不准确或评估方法存在问题^[51]。假若没有综合性的评估, 那么评估结果的不确定性以及其偏差的大小则很难被确定。

表 1 利用不同经验公式计算犬齿牙鲆 M 值
Tab. 1 Estimates of M (a^{-1}) for *Paralichthys dentatus* with different methods

公式 equation	雌性 female	雄性 male	参考文献 reference
$e^{(1.46-1.01 \ln a_{\max})}$	0.21	0.25	[54]
$1.60k$	0.30	0.35	[18]
$1.65/a_{\max}$	1.18	0.34	[18]
$e^{(-0.0152-0.279 \ln L_{\infty}+0.6543 \ln K+0.4634/\ln T)}$	0.38	1.50	[14]
1.79GSI	0.36	0.42	[52]

2.2 使用不同方法估算中国近海鱼类 M 值

费鸿年等^[55]利用 11 种广东大陆架鱼类的有关生活史参数,用式(1)、式(6)、式(7)三种经验公式分别估算 M 值,结果如表 2 所示。从表中可以看出, M_3 明显偏大, M_1 与 M_2 结果较为接近,但 M_2 大于 M_1 。结合 Tang^[56]对黄海的太平洋鲱鲤 (*Clupea pallasii*)估算结果,费鸿年认为 M_3 的结果

对 K 值的变化敏感,如果过分地体现某一生长参数的作用,将导致估算结果的不稳定。从 M_1 的结果可发现, Pauly 经验公式的估算值并不是一定偏高,而是得到一个较为合理的值。

2.3 Pauly 经验公式在中国近海鱼类种群自然死亡系数评估中的应用

Pauly 经验公式是中国渔业资源评估中估算 M 的最常用方法之一,目前已在短尾大眼鲷^[57-59] (*Priacanthus macracanthus*)、花斑蛇鲻^[60]、竹荚鱼^[61] (*Trachurus japonicus*)、带鱼^[62-63] (*Trichiurus japonicus*)、小黄鱼^[64-67] (*Larimichthys polyactis*)、刺鲷^[68-69] (*Psenopsis anomala*)、二长棘犁齿鲷^[70-73] (*Evynnis cardinalis*)、金线鱼^[74-76]、棘头梅童鱼^[77] (*Collichthys lucidus*)、多齿蛇鲻^[78-79]、黄鲫^[80-81] (*Setipinna taty*)及蓝圆鲹^[82-83]等 M 的评估中得到了广泛应用。

表 2 利用不同方法估算中国近海鱼类 M 值
Tab. 2 Estimates of M (a^{-1}) for inshore fishes of China with different methods

中文名 Chinese name	学名 Latin name	L_{∞}	K	t_k	M_1	M_2	M_3
马六甲鲱鲤♀	<i>Upeneus moluccensis</i> ♀	194.5	0.36	4	0.48	0.65	2.49
马六甲鲱鲤♂	<i>Upeneus moluccensis</i> ♂	173.0	0.28	4	0.42	0.65	2.6
条尾鲱鲤	<i>Upeneus bensasi</i>	137.5	0.5	4	0.65	0.65	2.31
多齿蛇鲻	<i>Saurida tumbil</i>	570.0	0.24	6	0.27	0.43	1.66
花斑蛇鲻	<i>Saurida undosquamis</i>	480.0	0.16	5	0.22	0.52	2.17
长尾大眼鲷	<i>Priacanthus tayenus</i>	251.0	0.69	3	0.68	0.86	3.05
蓝圆鲹	<i>Decapterus maruadsi</i>	268.0	0.4	5	0.47	0.52	1.85
深水金线鱼♂	<i>Nemipterus bathybius</i> ♂	236.0	0.23	6	0.34	0.43	1.67
金线鱼♀	<i>Nemipterus virgatus</i> ♀	318.0	0.22	6	0.3	0.43	1.69
金线鱼♂	<i>Nemipterus virgatus</i> ♂	318.0	0.35	6	0.41	0.43	1.52
黄鲷	<i>Dentex tumifrons</i>	250.0	0.16	9	0.29	0.29	1.07
二长棘鲷	<i>Paragyrops edita</i>	255.0	0.28	6	0.38	0.43	1.61
红鳍笛鲷	<i>Lutjanus erythropterus</i>	715.0	0.22	6	0.24	0.43	1.69

注: M_1 、 M_2 和 M_3 分别用式(1)、式(6)和式(7)式估算。
Note: M_1 , M_2 and M_3 are estimated by equation (1), (6) and (7), respectively.

根据文献提供的参数,本研究对其中一些评估结果进行了验算,结果发现,有多篇文献在使用 Pauly 经验公式评估 M 时存在不同程度的误用,分析发现,误用的原因主要包括:

(1) 公式错误。在将 Pauly 原公式转换为以 e 为底的对数公式时,公式中的常数项出现错误,致使评估结果与准确值有所偏差。如卢振彬等^[81]

估算 1990 年福建沿岸黄鲫的 M 值为 0.73,实际应修正为 0.88。

(2) 单位错误。Pauly 经验公式中渐进全长 L_{∞} 的单位为厘米(cm),而部分文献中存在使用以毫米(mm)为单位的 L_{∞} 计算的情况。如张国政等^[64]评估 2008 年黄海中南部小黄鱼的 M 值为 0.43,实际应修正为 0.98。

(3) 在给定渐近全长时, 未用其计算。在 Pauly 原文中曾指出 L_{∞} 表示个体的渐近全长(total length)。尽管部分鱼类的渐近全长和渐近体长相差不大, 但对 M 值仍会有一定影响。如陈国宝等^[82]计算 1997—1999 年南海北部陆架区蓝圆鲈 M 值为 0.85, 实际应修正为 0.83。

(4) 渐近全长计算错误。渐进全长是通过 VBGF 生长方程(Von Bertalanffy growth function)得到体长, 然后利用个体体长和全长数据进行回归最终拟合计算而成的。但个别文献中存在回归结果计算失误的情况。如陈作志等^[72]求解 1992—1993 年北部湾二长棘鲷 M 值为 1.045, 实际应修正为 0.96。

以上列举的 4 种错误中, 以(1)最为常见, 但(2)对结果偏差的影响最大; 除此之外, 还有一些未知原因的错误, 此处不再一一赘述。

3 讨论

M 由于受众多不可控因素的影响, 因而一直是资源评估中的难点。虽然近年来有学者认为在某些特定条件下, M 可以被准确评估, 如 Lee 等^[1]通过对靠近美国太平洋海岸的 12 种底栖鱼实验数据进行仿真模拟发现两种情况: (1)当评估 M 的相关数据集具有较小的变异值, 同时相对偏差接近于零; (2)评估该参数的原始数据处于模拟数据的数据集范围内时, 可以准确评估出该资源的 M 值。但利用当前的评估模型和捕捞数据是无法将 M 准确评估出来的。首先, 所有的评估模型在处理具体渔业数据时是失真的, 因为模型中存在着各种前提假设, 甚至部分模型的假设是与实际情况相违背的。其次, 由于现实情况的复杂性和多变性, 在使用统计学方法评估渔业资源时, 残差将是一直存在的。残差的存在同时引发了我们对通过评估模型得到 M 的可靠程度的思考。然而不同渔业数据间的差异以及模型自身带入的偏差令所有的评估模型都有一定程度的不确定性。不同模型由不同的变量拟合而成, 这就使得在评估同一目标参数时其结果的准确性不具有可比性, 因为不同变量具有不同程度的误差, 甚至部分变量是在另一变量的基础上获得的, 这无疑会增加结

果偏差变大的概率。

本文提及的 Pauly 经验公式^[14]只是众多评估模型中的一种, 尽管该公式具有局限性, 如不能估计软体动物和甲壳类的 M 值, 以及 Pascual 等^[23]认为 Pauly 公式的可靠性被高估了, 并且 Pauly 公式产生的误差大小是由具体情况而决定的。不容忽视的是, 错误的 M 值对资源评估的影响无疑是巨大的, 其不仅会导致种群生产力评估错误, 还会导致资源丰度随时间变化的趋势结果变得不准确, 但其模型参数的易得性及计算方法的简便性使得它沿用至今。因此, 数据的质量也是保证评估结果准确可信的重要因素, 对数据质量与模型准确性之间的关系探索是很有必要的。虽然随着渔业技术的发展, 可获得的渔业数据将会越来越多且质量会越来越高, 但据不完全统计, 目前世界范围内超过 80% 的渔业资源处于数据缺乏状态, 仅有 1% 的鱼种进行过系统性的资源评估^[84], 并且现有的资源评估仍存在不确定性^[85]。在持续的过度捕捞及水体污染等因素影响下, 中国近海鱼类种群衰退严重, 大部分种类出现个体小型化、低龄化现象, 目前中国近海的渔获物主要以 1 龄鱼或低于 1 龄鱼组成, 再加上完善的标志回捕体系没有建立, 因而导致了基于年龄结构和标志回捕法在中国近海渔业种群自然死亡系数的评估应用难以开展。因此, 在进行较大尺度的渔业资源评估时, 使用生活史参数的经验公式评估 M 应用最为广泛。

4 小结与展望

渔业资源评估是渔业管理的基础性工作, 其评估结果是制定渔业管理政策的主要依据。近年来, 随着国家越来越重视渔业资源保护和可持续发展, 掌握渔业资源状态, 为管理决策提供依据的科技需求愈加迫切。鱼类自然死亡系数评估方法的研究一直是渔业资源评估领域中的难点, 中国对其研究起步较晚, 在实际应用方面也主要以各类经验公式为主。近年来, 中国学者虽然在模型参数及评估过程的不确定分析也取得了一定的进展, 但当前正确理解 Pauly 公式以及评估 M 值仍面临困难。尽管如此, 综合国内外应用情况来

看, 当前 Pauly 经验公式对于中国渔业资源评估, 特别是数据有限条件下开展鱼类资源 M 的评估仍具有积极意义。对于后期的研究, 除了应该注意文中提到的几种错误, 还应提高渔业数据采集的质量, 同时将传统的方法与贝叶斯等不确定性分析方法结合起来, 以进一步降低参数评估及渔业管理决策中的风险, 促进渔业资源保护和可持续利用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Sparre P, Ursin E, Venema S C, et al. Introduction to Tropical Fish Stock Assessment[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 117-118.
- [3] Schaefer M B. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries[J]. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin, 1954, 1(2): 23-56.
- [4] Pella J J, Tomlinson P K. A generalized stock production model[J]. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin, 1969, 13(3): 419-497.
- [5] Aanes S, Engen S, Sæther B E, et al. Estimation of the parameters of fish stock dynamics from catch-at-age data and indices of abundance: can natural and fishing mortality be separated?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2007, 64(8): 1130-1142.
- [6] Gislason H, Daan N, Rice J C, et al. Size, growth, temperature and the natural mortality of marine fish[J]. Fish and Fisheries, 2010, 11(2): 149-158.
- [7] Clark W G. Effects of an erroneous natural mortality rate on a simple age-structured stock assessment[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1999, 56(10): 1721-1731.
- [8] Zhan B Y. Fish Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 109-113. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 109-113.]
- [9] 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, 2014, 72(1): 62-69.
- [10] Zheng J. Uncertainties of natural mortality estimates for eastern Bering Sea snow crab, *Chionoecetes opilio*[J]. Fisheries Research, 2003, 65(1-3): 411-425.
- [11] Hewitt D A, Hoenig J M. Comparison of two approaches for estimating natural mortality based on longevity[J]. Fishery Bulletin, 2005, 103(2): 433-437.
- [12] Vetter E. Estimation of natural mortality in fish stocks: a review[J]. Fishery Bulletin, 1988, 86(1): 25-43.
- [13] Wang Y B. Estimation of fish natural mortality coefficient using virtual population analysis[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007: 12-18. [王迎宾. 应用实际种群分析(VPA)求解鱼类自然死亡系数的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007: 12-18.]
- [14] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks[J]. ICES Journal of Marine Science, 1980, 39(2): 175-192.
- [15] Sippel T, Lee H H, Piner K, et al. Searching for M : Is there more information about natural mortality in stock assessments than we realize?[J]. Fisheries Research, 2017, 192: 135-140.
- [16] Zhang Y X, Miao Z Q. Review of fish assessment models[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2006, 25(3): 305-311. [张月霞, 苗振清. 渔业资源的评估方法和模型研究进展[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2006, 25(3): 305-311.]
- [17] Quinn T J, Deriso R B. Quantitative Fish Dynamics[M]. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- [18] Jensen A. Beverton and Holt life history invariants result from optimal trade-off of reproduction and survival[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1996, 53(4): 820-822.
- [19] Lorenzen K. The relationship between body weight and natural mortality in juvenile and adult fish: a comparison of natural ecosystems and aquaculture[J]. Journal of Fish Biology, 1996, 49(4): 627-642.
- [20] Peterson I, Wroblewski J. Mortality rate of fishes in the pelagic ecosystem[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1984, 41(7): 1117-1120.
- [21] Post J R, Evans D O. Size-dependent overwinter mortality of young-of-the-year yellow perch (*Perca flavescens*): laboratory, in situ enclosure, and field experiments[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, 46(11): 1958-1968.
- [22] McGurk M D. Natural mortality of marine pelagic fish eggs and larvae: role of spatial patchiness[J]. Marine Ecology Progress Series, 1986, 34(3): 227-242.
- [23] Pascual M A, Iribarne O O. How good are empirical predictions of natural mortality?[J]. Fisheries Research, 1993, 16(1): 17-24.
- [24] Beverton R J H, Holt S J. The Lifespan of Animals (Collo-

- quia on Ageing): A review of the lifespans and mortality rates of fishes in nature, and their relation to growth and other physiological characteristics[M]. CIBA Foundation Symposium, 1959, 5: 142-179.
- [25] Kenchington T J. Natural mortality estimators for information-limited fisheries[J]. Fish and Fisheries, 2014, 15(4): 533-562.
- [26] Venema S C, Christensen J, Pauly D. Contributions to tropical fisheries biology. Papers prepared by the participants at the FAO/DANIDA follow-up training courses on fish stock assessment in the Tropics, Hirtshals, Denmark 5-30 May 1986, Manila, Philippines 12 January-6 February 1987[R]. FAO Fisheries Report, 389: 519.
- [27] Gislason H, Daan N, Rice J, et al. Does natural mortality depend on individual size?[C]. ICES Science Conference, 2008/F: 16.
- [28] Xu H L, Chen Y, Chen X J, et al. Comparison of two empirical estimates of natural mortality for Chinese shrimp[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(1): 45-54. [徐海龙, 陈勇, 陈新军, 等. 两种经验方法估算中国明对虾自然死亡率的比较[J]. 水产学报, 2016, 40(1): 45-54.]
- [29] Tanaka S. Studies on the dynamics and management of fish populations[J]. Bulletin of the Tokai Regional Fisheries Research Laboratory, 1960, 28: 1-200.
- [30] Zhan B Y, Lou D C, Zhong J S. An assessment of the filefish population and rational exploitation of the resource[J]. Journal of Fisheries of China, 1986, 10(4): 409-418. [詹秉义, 楼冬春, 钟俊生. 绿鳍马面鲀资源评析与合理利用[J]. 水产学报, 1986, 10(4): 409-418.]
- [31] Alverson D L, Carney M J. A graphic review of the growth and decay of population cohorts[J]. ICES Journal of Marine Science, 1975, 36 (2): 133-143.
- [32] Montgomery S, Barchia I, Walsh C. Estimating rates of mortality in stocks of *Metapenaeus macleayi* in estuaries of eastern Australia[J]. Fisheries Research, 2012, 113(1): 55-67.
- [33] Gunderson D R, Zimmermann M, Nichol D G, et al. Indirect estimates of natural mortality rate for arrowtooth flounder (*Atheresthes stomias*) and darkblotched rockfish (*Sebastes crameri*)[J]. Fishery Bulletin, 2003, 101(1): 175-182.
- [34] Pollock K H, Hoenig J M, Jones C M. Estimation of fishing and natural mortality when a tagging study is combined with a creel survey or port sampling[J]. American Fisheries Society Symposium, 1991, 12: 423-434.
- [35] Williams B K, Nichols J D, Conroy M J. Analysis and Management of Animal Populations[M]. San Diego: Academic Press, 2002.
- [36] Chapman F A, Hartless C S, Carr S H. Population size estimates of sturgeon in the Suwannee River, Florida, U. S. A[J]. Gulf of Mexico Science, 1997, 2: 88-91.
- [37] Hilborn R, Walters C J. Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty[M]. New York: Chapman and Hall, 1992.
- [38] Hampton J. Natural mortality rates in tropical tunas: size really does matter[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(5): 1002-1010.
- [39] Treble R J, Day R W, Quinn II T J. Detection and effects on mortality estimates of changes in tag loss[J]. Canadian Journal of Aquatic Science, 1993, 50: 1435-1441.
- [40] Wetherall J A. Analysis of double tagging experiments[J]. Fishery Bulletin, 1982, 80(4): 687-701.
- [41] Brooks E N, Pollock K H, Hoenig J M, et al. Estimation of fishing and natural mortality from tagging studies on fisheries with two user groups[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1998, 55(9): 2001-2010.
- [42] Pine W E, Pollock K H, Hightower J E, et al. A review of tagging methods for estimating fish population size and components of mortality[J]. Fisheries Research, 2003, 28(10): 10-23.
- [43] Kenneth H P, Honghua J, Joseph E H. Combining telemetry and fisheries tagging models to estimate fishing and natural mortality rates[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2004, 133(3): 639-648.
- [44] Thorley J L, Andrusak G F. The fishing and natural mortality of large, piscivorous Bull Trout and Rainbow Trout in Kootenay Lake, British Columbia (2008-2013)[J]. PeerJ, 2017, 5: e2874.
- [45] Megrey B A. Review and comparison of age-structured stock assessment models from theoretical and applied points of view[J]. American Fisheries Society Symposium, 1989, 6: 8-48.
- [46] Gulland J. Estimation of mortality rates. Annex to Arctic fisheries working group report[R]. International Council for the Exploration of the Sea, C. M, 1965 Doc. No. 3, 1965.
- [47] Pope J. An investigation of the accuracy of virtual population analysis using cohort analysis[J]. ICNAF Research Bulletin, 1972, 9(10): 65-74.
- [48] 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.]
- [49] Maunder M N, Punt A E. A review of integrated analysis in fisheries stock assessment[J]. Fisheries Research, 2013, 142(6): 61-74.
- [50] Liu Q, Wang Y J. Preliminary study of the tuning methods in fisheries virtual population analysis (VPA)[J]. South China

- Fisheries Science, 2007, 3(1): 1-6. [刘群, 王艳君. 对渔业实际种群分析(VPA)中调谐方法的初步研究[J]. 南方水产, 2007, 3(1): 1-6.]
- [51] Maunder M N, Wong R A. Approaches for estimating natural mortality: Application to summer flounder (*Paralichthys dentatus*) in the U. S. mid-Atlantic[J]. Fisheries Research, 2011, 111(1): 92-99.
- [52] Gunderson D R. Trade-off between reproductive effort and adult survival in oviparous and viviparous fishes[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54(5): 990-998.
- [53] Froese R, Pauly D. "FishBase," World Wide Web electronic publication, Version(09/2010)[OL]. <http://www.fishbase.org/search.php>.
- [54] Hoenig J M. Empirical use of longevity data to estimate mortality rates[J]. Fisheries Bulletin, 1983, 82(1): 898-903.
- [55] Fei H N, Zhang S Q. Fishery Resources[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1990: 308-313. [费鸿年, 张诗全. 水产资源学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 308-313.]
- [56] Tang Q. Modification of the ricker stock recruitment model to account for environmentally induced variation in recruitment with particular reference to the blue crab fishery in Chesapeake Bay[J]. Fisheries Research, 1985, 3(1): 13-21.
- [57] Sun D R, Qiu Y S. Estimation of growth and mortality parameter of *Priacanthus macracanthus* in Beibu Bay[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2003(1): 7-12. [孙典荣, 邱永松. 北部湾短尾大眼鲷生长和死亡参数的估算[J]. 福建水产, 2003(1): 7-12.]
- [58] Zhang K, Chen Z Z, Wang Y Z, et al. Population structure of *Priacanthus macracanthus* in the Beibu Gulf, and parameters for its growth, mortality and maturity[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2016, 35(5): 20-28. [张魁, 陈作志, 王跃中, 等. 北部湾短尾大眼鲷群体结构及生长、死亡和性成熟参数估计[J]. 热带海洋学报, 2016, 35(5): 20-28.]
- [59] Sun D R, Qiu Y S. Estimation of growth and mortality parameters of *Priacanthus macracanthus* in the North Continental Shelf of South China Sea[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2004, 24(1): 28-34. [孙典荣, 邱永松. 南海北部大陆架短尾大眼鲷生长和死亡参数估计[J]. 广东海洋大学学报, 2004, 24(1): 28-34.]
- [60] Shu L M, Qiu Y S. Estimate for growth, mortality parameters and first capture specification suggestion of *Saurida undosquamis* (Richardson) in Northern South China Sea[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2004, 24(3): 29-35. [舒黎明, 邱永松. 南海北部花斑蛇鲷生长死亡参数估计及开捕规格[J]. 湛江海洋大学学报, 2004, 24(3): 29-35.]
- [61] 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. 南海北部竹荚鱼的生长、死亡及合理利用[J]. 湛江海洋大学学报, 2004, 24(1): 35-40.]
- [62] Zhu J F, Qiu Y S. Growth and mortality of hairtails and their dynamic pool models in the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(6): 93-99. [朱江峰, 邱永松. 南海北部带鱼生长死亡与参数动态综合模式[J]. 海洋学报, 2005, 27(6): 93-99.]
- [63] Lin L S, Zheng Y J, Chen J H, et al. A preliminary study on fishery biology of main commercial fishes surveyed from the bottom trawl fisheries in the East China Sea[J]. Marine Science, 2006, 30(2): 21-25. [林龙山, 郑元甲, 程家骅, 等. 东海区底拖网渔业主要经济鱼类渔业生物学的初步研究[J]. 海洋科学, 2006, 30(2): 21-25.]
- [64] Zhang G Z, Li X S, Jin X S, et al. Changes of biological characteristics of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in the central and southern Yellow Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6854-6861. [张国政, 李显森, 金显仕, 等. 黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6854-6861.]
- [65] Zhang G Z, Li X S, Jin X S, et al. Growth, mortality and optimum catchable size of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis* Bleeker) in the Southern Yellow Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 839-846. [张国政, 李显森, 金显仕, 等. 黄海南部小黄鱼生长、死亡和最适开捕体长[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 839-846.]
- [66] Liu Z L, Xie H Y, Yan L P, et al. Comparative population dynamics of small yellow croaker *Larimichthys polyactis* in Southern Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(6): 627-632. [刘尊雷, 谢汉阳, 严利平, 等. 黄海南部和东海小黄鱼资源动态的比较[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(6): 627-632.]
- [67] Liu Q, Xu B D, Ye Z J, et al. Growth and Mortality of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) inhabiting Haizhou Bay of China[J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(4): 557-561.
- [68] Wang Y B, Yu C G, Yu C D, et al. Preliminary research on the rational utilization of *Psenopsis anomala* in the offshore water of South Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2010, 29(2): 114-119. [王迎宾, 俞存根, 虞聪达, 等. 浙江南部外海刺鲳资源合理利用的初步研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2010, 29(2): 114-119.]
- [69] Du J G, Lu Z B, Chen M R, et al. Changes in ecological parameters and resources of Japanese butterfish, *Psenopsis anomala*, in the middle and north Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2010, 29(2): 234-240. [杜建

- 国, 卢振彬, 陈明茹, 等. 台湾海峡中北部海域刺鲷种群生态学参数及其变动趋势[J]. 台湾海峡, 2010, 29(2): 234-240.]
- [70] Zhang K, Chen Z Z, Qiu Y S. Decadal changes in growth, mortality and maturity parameters of *Evynnis cardinalis* in Beibu Gulf[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(6): 9-16. [张魁, 陈作志, 邱永松. 北部湾二长棘犁齿鲷生长、死亡和性成熟参数的年际变化[J]. 南方水产科学, 2016, 12(6): 9-16.]
- [71] Hou G, Zhu X L, Lu H S. Growth, mortality and population composition of crimson sea bream, *Paragyrops edita* Tanaka in Beibu Gulf[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2008, 28(3): 50-55. [侯刚, 朱立新, 卢伙胜. 北部湾二长棘鲷生长、死亡及其群体组成[J]. 广东海洋大学学报, 2008, 28(3): 50-55.]
- [72] Chen Z Z, Qiu Y S. Estimation of growth and mortality parameters of *Paragyrops 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.]
- [73] Feng B, Hou G, Lu H S. Management recommendation for *Paragyrops edita* in Beibu Gulf based on per-recruitment analysis[J]. System Science and Comprehensive Studies in Agriculture, 2009, 25(1): 114-119. [冯波, 侯刚, 卢伙胜. 北部湾二长棘鲷资源开发保护策略研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(1): 114-119.]
- [74] Wang X H, Qiu Y S, Du F Y. Study on the growth, mortality and optimum catchable size of *Nemipterus virgatus* in the Northern South China Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 2004, 34(2): 224-230. [王雪辉, 邱永松, 杜飞雁. 南海北部金线鱼生长、死亡和最适开捕体长研究[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(2): 224-230.]
- [75] Wang X H, Qiu Y S, Du F Y. Study on the growth, mortality and optimum catchable size of *Nemipterus Virgatus* in the Northern South China Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 2004, 34(2): 224-230. [王雪辉, 邱永松, 杜飞雁. 南海北部金线鱼生长、死亡和最适开捕体长研究[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(2): 224-230.]
- [76] Lu Z B, Du J G. Growth and mortality character of *Nemipterus virgatus* in southern Taiwan Strait[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(5): 75-79. [卢振彬, 杜建国. 台湾海峡南部金线鱼的生长与死亡特性[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(5): 75-79.]
- [77] Liu Y W, Xue Y, Wei B F, et al. An estimation of population parameters for five major fish species in the Haizhou Bay, Yellow Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(1): 125-133. [刘元文, 薛莹, 魏邦福, 等. 海州湾5种主要鱼类种群参数估算[J]. 中国水产科学, 2014, 21(1): 125-133.]
- [78] Liu J D, Lu H S, Zhu L X, et al. The difference of growth, mortality and group composition Between female and male *Saurida tumbil* in the Beibu Gulf[J]. Marine Fisheries, 2009, 31(3): 243-253. [刘金殿, 卢伙胜, 朱立新, 等. 北部湾多齿蛇鲷雌雄群体组成、生长、死亡特征的差异[J]. 海洋渔业, 2009, 31(3): 243-253.]
- [79] Shu L M, Qiu Y S. Biology analysis of *Saurida tumbil* in northern South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(2): 154-158. [舒黎明, 邱永松, 南海北部多齿蛇鲷生物学分析[J]. 中国水产科学, 2004, 11(2): 154-158.]
- [80] Liu Y, Cheng J H, Li S F. Utilization status of *Setipinna taty* in the East China Sea and its rational exploitation[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(3): 485-491. [刘勇, 程家骅, 李圣法. 东海区黄鲫资源的利用现状及合理利用探讨[J]. 中国水产科学, 2006, 13(3): 485-491.]
- [81] Lu Z B, Chen X. The parameters and their changes of the growth and mortality of Engraulidae and Clupeidae in Fujian coastal waters[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2008, 47(2): 279-285. [卢振彬, 陈骁. 福建沿海几种鲱、鳀科鱼类生长与死亡参数及其变化[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(2): 279-285.]
- [82] Chen G B, Qiu Y S. Study on growth, mortality and reasonable utilization of *Decapterus maruadsi* in northern continental shelf waters of South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22(4): 457-464. [陈国宝, 邱永松. 南海北部陆架区蓝圆鲹的生长、死亡及合理利用研究[J]. 台湾海峡, 2003, 22(4): 457-464.]
- [83] Zheng J, Wang Y B, Li R X, et al. Stock assessment of Jack *Scomber japonicus* and *Decapterus maruadsi* in coastal waters of Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2012, 31(4): 309-315. [郑基, 王迎宾, 李仁星, 等. 浙江海域鲐鲷鱼资源量评估[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2012, 31(4): 309-315.]
- [84] Costello C, Ovando D, Hilborn R, et al. Status and Solutions for the World's Unassessed Fisheries[J]. Science, 2012, 338(6106): 517-520.
- [85] Chen Y. Quality of fisheries data and uncertainty in stock assessment[J]. Scientia Marina, 2003, 67(S1): 75-87.

Assessment of natural mortality coefficients in fish stocks: a review

GENG Ping^{1,2}, ZHANG Kui¹, XU Shannan¹, CHEN Zuozhi¹

1. Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture; Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Natural mortality coefficient (M) is a key parameter in fisheries stock assessment. Its accuracy directly determines the reliability of assessment results and also influences the establishment of fisheries management. Most mathematical models of fish stock dynamics incorporate M , either directly or indirectly. Fishery scientists have explored accurate estimates of M for a long time, in order to develop a more precise understanding of fish populations and to establish a more scientific basis for managing fisheries resources and sustainable development. The present study introduces and evaluates the most common models for estimating natural mortality coefficients for fish populations from three aspects, namely life-history parameters, tag-return, and age-structure. The first approach to estimate the instantaneous rate of natural mortality in fish stocks is based on the observation that M is strongly correlated with life history parameters, such as maximum observed age, age at reproductive maturity, asymptotic fish length, and growth rate. The Pauly empirical equation, Gislason empirical equation, and Tanaka's maximum observed age's method are among the most commonly used methods for assessing inshore fisheries in China. By classifying tagging data, based on catch per unit effort, size at release, and the probability of tag loss, Chapman, Hampton, and Treble have each constructed their own models, and some scholars have combined these methods to develop a model that is superior to any of the individual models. The assessment results of using tag-return methods would have a high reliability, but the huge costs of investigation, lower credibility of recapture, and prior model assumptions contribute to poor generality. Considering that age is the potentially most important factor affecting estimates of M , virtual population analysis (VPA) and cohort analysis (CA) are established using catch-at-age data. These methods could be used to reliably estimate fish stocks with long-term catch data. However, considering the incomplete and inaccurate statues of historical catch data in Chinese coastal fishes, the practicality of the VPA or CA models is relatively low. Meanwhile, taking *Paralichthys dentatus* and some coastal fish stocks as examples, this study compared estimation results through different methods and found that Pauly empirical equation is more reasonable to calculate M . Then, this paper introduced the misapplications of Pauly empirical equation in inshore fisheries of China. The main misapplications were equation error, unit error and calculation mistake. According to the limited data and fishery exploitation status, we suggest that Pauly empirical equation has a positive meaning to assess the M for major economic fish stocks in China.

Key words: natural mortality coefficient; assessment method; Pauly empirical equation; fish stock

Corresponding author: CHEN Zuozhi. E-mail: zzchen2000@163.com