

DOI: 10.12264/JFSC2023-0202

基于双重拔靴法拟合拖网网囊选择性的不确定性

杨炳忠^{1,2}, 万荣^{2,3}

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部外海渔业开发重点实验室, 广东 广州 510300;
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
3. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心/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: 研究拖网网囊选择性对于渔业的科学管理和资源的合理利用都有重要意义。拖网网囊选择性的研究一般先开展捕捞实验, 然后使用选择性模型拟合和处理实验数据, 最后得出选择性参数和选择性曲线。主要的选择性参数包括 50%选择体长(L50)和选择范围(SR)。但是, 仅提供选择性参数和曲线是不够的, 还需要拟合它们的不确定性, 并以置信区间的形式展现。双重拔靴法是拟合网囊选择性不确定性的重要方法。本研究在阐述双重拔靴法基本原理的基础上, 选取 2 组实验数据为实例, 用常规方法和双重拔靴法进行拟合, 通过比较拟合结果诠释双重拔靴法的特点和优势。结果表明, 双重拔靴法能够很好地拟合网囊选择性参数 L50、SR 和曲线的不确定性。同时, 本研究还就应用双重拔靴法的重大误区进行了分析和讨论。本研究可为研究人员开展渔具选择性研究提供方法参考。

关键词: 拖网; 网囊选择性; 双重拔靴法; 不确定性

中图分类号: S971

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2023)09–1166–10

拖网是用渔船拖曳作业, 迫使捕捞对象进入网囊的渔具。拖网渔业在我国海洋捕捞产业中占主导地位。2022 年, 拖网产量为 451.33 万 t, 占全国海洋捕捞产量的 47.47%^[1]。然而, 随着气候变化、海洋环境恶化和渔业资源的衰退, 如何科学管理拖网渔业已成为世界渔业国家面临的共同难题。研究发现, 限定拖网网囊的最小网目尺寸是解决该问题的基础^[2]。网囊最小网目尺寸管理制度的科学逻辑在于通过网目尺寸控制网囊对捕捞种类的选择性, 优化捕捞方式, 达到渔业资源的合理利用。目前, 世界很多渔业国家对拖网(特别是底拖)网囊的最小网目尺寸都做出了明确的规定^[2-3]。同样地, 最小网目尺寸制度也是我国拖网渔业管理的重要举措。但是, 制定最小网目尺寸的科学依据在于研究网囊对捕捞种类的选择性;

同时, 最小网目尺寸在实施过程中的有效性和合理性评价, 后期的动态调整也都需要研究网囊的选择性。

拖网网囊选择性是指某一物种进入网囊后被捕获的概率^[4]。网囊选择性的量化需要开展实验和分析拟合数据, 然后估算 50%选择体长(L50)和选择范围(selection range, SR), 并拟合选择性曲线。选择性参数(L50 和 SR)和选择性曲线是网囊选择性的直观表述和量化。但是, 仅仅估算选择性参数和拟合选择性曲线是不够的, 还需要拟合选择性的不确定性。因为拖网网囊选择性不仅与网具规格和捕捞种类的生物特征有关, 还受到很多不确定因素的影响。网囊选择性是对捕捞过程的量化, 其不确定性主要在于: (1) 网次间不可控因素的差异, 比如遭遇的捕捞种群、拖曳速度、

收稿日期: 2023-08-15; **修订日期:** 2023-09-05.

基金项目: 国家重点研发计划专项(2020YFD0901205); 农业农村部财政项目; 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2019CY0303).

作者简介: 杨炳忠(1984–), 男, 副研究员, 博士研究生, 研究方向为渔具渔法及选择性研究. E-mail: yangbingzhong@scsfri.ac.cn

通信作者: 万荣, 教授, 研究方向为设施渔业工程水动力学和渔业资源养护. E-mail: rongwan@shou.edu.cn

时间和水流等的差异性; (2) 网内差异性, 随着拖曳时间的累加渔获物不断聚积, 网囊的可逃逸网目数量和网目张开状态的差异性^[5-6]。另外, 在某些网次中由于捕捞种类的渔获数量大, 无法对其全部进行生物学测量, 需要进行生物学取样。渔获物的取样后, 使用抽取的样本量代表全部渔获, 该做法也会对选择性造成一定的不确定性^[7]。

目前, 拟合选择性不确定性常用的方法为双重拔靴法(double-bootstrapping technique), 其基本原理是以网次数据为单位, 采用计算机对样本进行重取样拟合, 通过估算选择性参数和选择性曲线的置信区间来量化和展示网囊选择性的不确定性。拔靴法(bootstrap)最早由 Efron^[8]提出, 它是一种通过数据本身的重取样进行置信区间估算的方法^[9]。拔靴法最早被 Millar^[6]应用于渔具选择性研究; 之后, Sistiaga 等^[10]和 Herrmann 等^[11]使用双重拔靴法拟合拖网网囊选择性的不确定性。

过去 10 多年, 虽然双重拔靴法已在一些国外渔具选择性研究中被应用, 但是我国相关研究领域对该方法的认识和应用还处于起步阶段。比如, 很多国内学者的选择性研究还仅仅停留在拟合选择性参数和选择性曲线的初级阶段, 拟合选择性不确定性的研究较少。专门分析双重拔靴法在网囊选择性不确定性拟合的相关报道或研究还处于空白状态。另外, 由于双重拔靴法有一定的理论性、复杂性和专业性, 使得研究人员难以领悟和理解。为了填补该研究空白, 帮助研究人员理解和领悟双重拔靴法的原理和应用, 本研究在阐述其基本原理的基础上, 通过两组实验数据解析该方法的应用过程, 以期为提升我国渔具选择性研究的水平提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

为了展示双重拔靴法在选择性不确定性拟合中的应用, 本研究选取了 2 组拖网网囊选择性实验数据进行拟合、比较和分析。其中, 实验一时间为 2019 年, 渔船为“桂北渔 96899”(主机功率 280 kW, 船长 38 m), 作业拖网主尺度为 38.70 m×32.90 m, 网囊网目尺寸为 35 mm, 目标种类为

宽突赤虾(*Metapenaeopsis palmensis*)^[12]。实验二时间为 2016 年, 渔船为“粤阳东渔 19363”(主机功率 290 kW, 船长 35.18 m), 拖网主尺度为 136.80 m×67.36 m, 网囊网目尺寸为 45 mm, 目标种类为蓝圆鲷(*Decapterus maruadsi*)^[13]。两次实验海域均为南海区(图 1)。

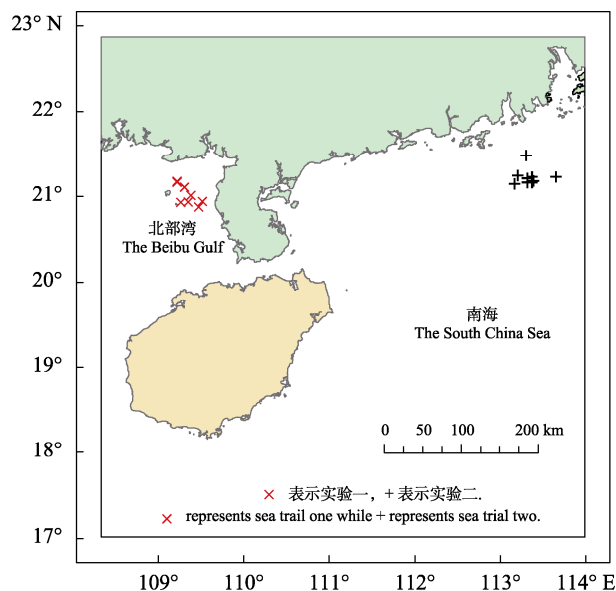


图1 实验区域

Fig. 1 Map of sea trials

两次实验均采用“套网法”进行, 套网的结构参数和安装按照 Wileman 等^[4]推荐的技术规范。实验一由于目标种类渔获数量较大, 进行了渔获取样生物学测量; 实验二对所有目标种类的渔获物进行了生物学测量。以网次为单位, 整理和统计网囊、套网的渔获数量和长度。按照长度排序统计数量: 宽突赤虾 5 mm 为 1 个体长组; 蓝圆鲷则 10 mm 为 1 个叉长组。

1.2 选择性模型以及拟合方法

由于两次实验均采用套网法进行, 可将实验数据分别视为二项分布: 对于某一尾进入实验网囊的种类(宽突赤虾或蓝圆鲷), 最终要么被网囊捕获, 要么逃逸到套网。假设某一体长(或叉长)为 l 的个体渔获在第 j 网次中, 网囊的数量为 nR_{jl} , 套网的数量为 nE_{jl} , 那么实验网囊对该个体的渔获率(选择率)为:

$$r_j(l) = \frac{nR_{jl}}{nE_{jl} + nR_{jl}} \quad (1)$$

式中, l 为某一体长组的中值, 因而其估计的实际选择率属于点估算。但是, 在研究中需要量化目标种类所有体长范围个体的选择性。为了将点估算拟合为线估算, 需要引入数学模型, 常用的有: Logit、Probit、Gompertz 和 Richards^[4]。已有研究表明, 同一网囊的不同实验网次中 $r_j(l)$ 存在一定的差异^[5]。为了兼顾该差异性, 需拟合一个平均选择率, 可用 $r_{av}(l, v)$ 表示。上式中 v 为待估的选择性参数, 使用极大似然估算法可估算出 v 的值, 公式如下:

$$-\sum_{j=1}^m \sum_l \left\{ \frac{nR_{jl}}{qR_j} \times \ln[r_{av}(l, v)] + \frac{nE_{jl}}{qE_j} \times \ln[1.0 - r_{av}(l, v)] \right\} \quad (2)$$

式中, qR_j 和 qE_j 分别为实验网囊和套网的渔获取样比例。

本研究使用 Logit 模型拟合 $r_{av}(l, v)$, 计算公式如下:

$$r_{av}(l, v) = \frac{\exp\left(\frac{\ln(9.0)}{SR} \times (l - L50)\right)}{1 + \exp\left(\frac{\ln(9.0)}{SR} \times (l - L50)\right)} \quad (3)$$

式中, $L50$ 表示 50% 选择体长, SR 表示选择范围 ($SR=75\%$ 选择体长- 25% 选择体长)。

分别采用下述方法处理数据:

1) 方法一: 忽略选择性的不确定性, 利用公式(2)和公式(3), 在联合网次(pool hauls)的框架下拟合选择性参数和选择性曲线;

2) 方法二: 在方法一的基础上, 增加选择性不确定性的拟合, 详细步骤见 1.3 部分。

1.3 选择性不确定性的拟合方法

双重拔靴法拟合网囊选择性不确定性的方法^[6,8,10,14]如下:

(1) 以网次为单位, 根据有效网次数据(如 $H=h_1, \dots, h_m$) 进行可置换的重采样, 获取一个新的网次数据(命名为 $H^*=h_1^*, \dots, h_m^*$); 该重采样可模拟网囊选择性网次间差异(between-haul variation)的不确定性; 该步骤也称为外拔。

(2) 针对上述有效网次数据中的每个网次, 分别对网囊和套网中的个体体长数据进行可置换的重采样; 该重采样可模拟网囊选择性网次内差异(within-haul variation)的不确定性; 该步骤也称为内拔。

(3) 利用公式(2)和公式(3)来处理步骤(1)和(2)获取的数据, 得到相应的选择性曲线和选择性参数。

(4) 重复步骤 1~3 的操作 1000 次, 即可获取 1000 组重采样模拟下的选择性曲线和选择性参数, 然后进行累加和处理即可估算其 95% 置信区间, 选择性的不确定性以置信区间展现。

为进行选择性及其不确定性拟合结果的分析 and 比较, 本研究引用 2 个目标种类的最小开捕规格: 宽突赤虾体长为 7.0 cm、蓝圆鲂叉长为 15.0 cm^[12-13]。

上述数据处理均使用选择性软件 SELNET^[11] 进行。值得一提的是, SELNET 软件具有强大的选择性数据处理功能, 拥有进行方法一和方法二数据处理的独立程序和应用操作。

2 结果与分析

2.1 实验基本概况

实验一共完成了 8 个有效网次作业, 渔船的平均拖曳时长 138 min (范围: 122~154 min), 渔场的平均水深 15.5 m (范围: 12.0~17.0 m); 测量宽突赤虾共 544 尾, 其中网囊 256 尾、套网 288 尾, 网囊的取样比例为 0.5 或 1.0、套网的取样比例为 0.33、0.5 或 1.0。

实验二共完成了 9 个有效网次作业, 渔船的拖曳时长 4 h, 渔场的平均水深 54.0 m (范围: 44.1~58.7 m); 实验对所有蓝圆鲂进行了生物学测量, 共 740 尾, 其中, 网囊 486 尾、套网 254 尾。

2.2 目标种类的体长分布

宽突赤虾的体长范围 3.5~10.0 cm, 大部分个体体长小于开捕规格(7.0 cm); 合计体长峰值 5.5~6.0 cm, 套网的体长峰值为 5.5 cm, 网囊的体长峰值为 6.0 cm (图 2)。蓝圆鲂的叉长范围 8.5~25.5 cm, 绝大部分个体叉长大于开捕规格(15.0 cm), 峰值叉长点均为 17.5 cm (图 3)。

2.3 网囊选择性参数及不确定性

在两个实验中, 2 种方法的拟合度都较好, 因为 P 值均显著大于 0.05: 宽突赤虾为 0.6058, 蓝圆鲂为 0.9554。拟合出的平均选择性参数 $L50$ 和 SR 数值相同: 宽突赤虾的 $L50$ 和 SR 分别为 6.22 和 1.88 cm, 蓝圆鲂的 $L50$ 和 SR 分别为 16.69 和 2.12 cm。

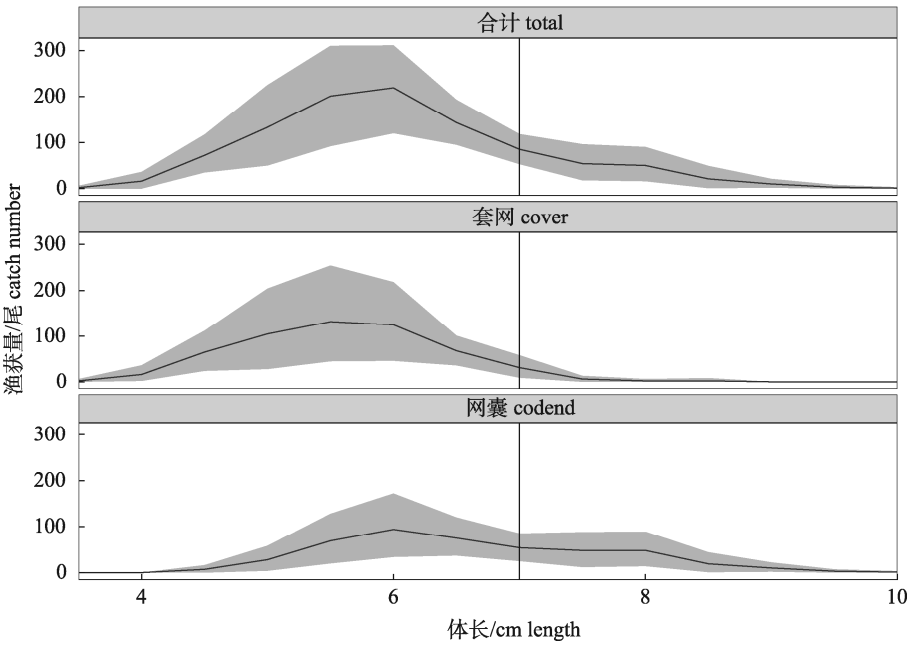


图 2 目标种类宽突赤虾的体长分布曲线
垂直直线表示宽突赤虾的开捕规格(7.0 cm).

Fig. 2 Length distribution of the target species *Metapenaeopsis palmensis*
The vertical line represents the minimum landing size of *Metapenaeopsis palmensis* (7.0 cm).

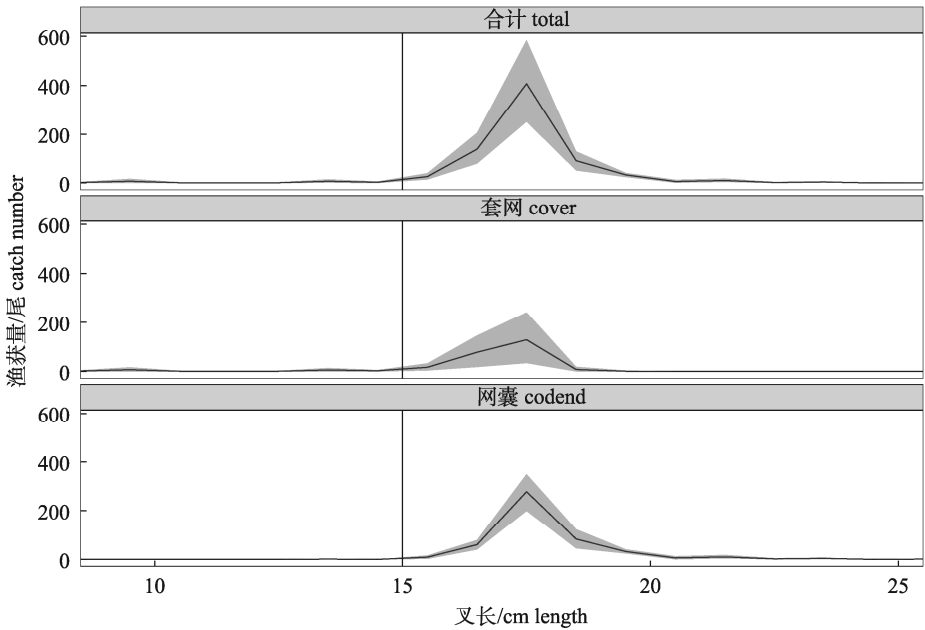


图 3 目标种类蓝圆鲹的叉长分布曲线
垂直直线表示蓝圆鲹的开捕规格(15.0 cm).

Fig. 3 Length distribution of the target species *Decapterus maruadsi*
The vertical line represents the minimum landing size of *Decapterus maruadsi* (15.0 cm).

方法二拟合的选择性不确定性以置信区间的形式展现: 宽突赤虾 L50 和 SR 的置信区间分别为 (5.06~6.94)和(1.26~3.12) cm, 蓝圆鲹的置信区间

为(15.11~17.23)和(1.54~3.27) cm (表 1)。
2 种拟合方法获取的选择性曲线见图 4 和图 5: 方法一仅拟合了实际选择率(实心点)和单一选

表 1 拖网网囊选择性参数的拟合
Tab. 1 Estimation of selectivity parameters of trawl codends for the two species

种类 species	选择性参数 selectivity parameters	方法一 method one	方法二 method two
宽突赤虾 <i>Metapenaeopsis palmensis</i>	50%选择体长/cm L50	6.22	6.22 (5.06–6.94)
	选择范围/cm SR	1.88	1.88 (1.26–3.12)
	拟合度 <i>P</i> -value	0.6058	0.6058
	残差 deviance	10.12	10.12
	自由度 <i>df</i>	12	12
蓝圆鲷 <i>Decapterus maruadsi</i>	50%选择叉长/cm L50 cm	16.69	16.69 (15.11–17.23)
	选择范围 SR/cm cm	2.12	2.12 (1.54–3.27)
	拟合度 <i>p</i> -value	0.9554	0.9554
	残差 deviance	7.08	7.08
	自由度 <i>df</i>	15	15

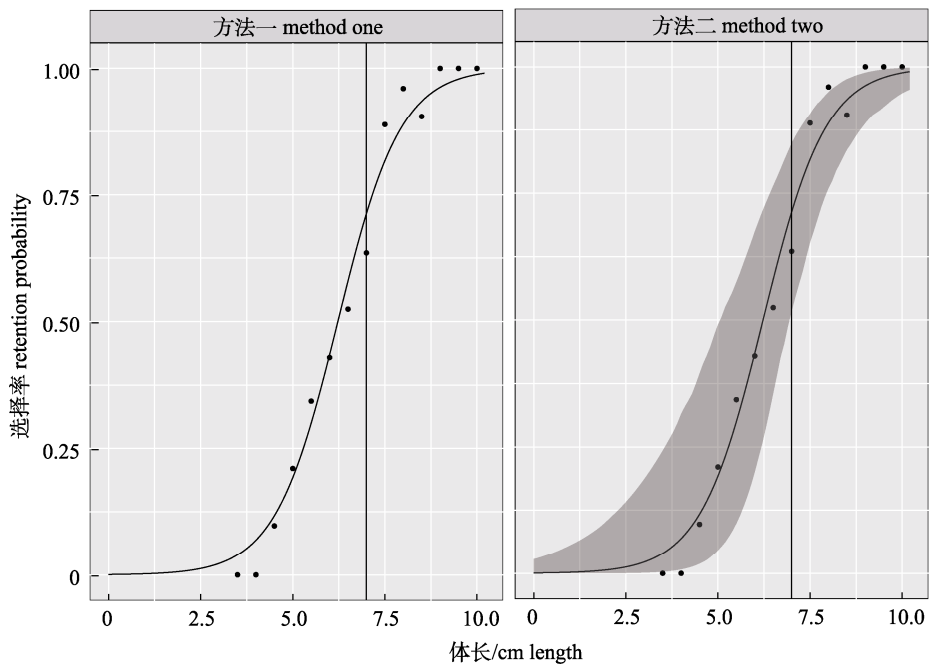


图 4 拖网网囊对宽突赤虾的选择性曲线
垂直直线表示宽突赤虾的开捕规格(7.0 cm).

Fig. 4 Selectivity curves of trawl codend for *Metapenaeopsis palmensis*
The vertical line represents the minimum landing size of *Metapenaeopsis palmensis* (7.0 cm).

择曲线,方法二增加了选择性曲线的不确定性(阴影区域)。以 2 个目标种类最小可捕规格个体的选择率为例,方法二拟合的结果表明:网囊对体长为 7.0 cm 的宽突赤虾个体选择率均值为 71.28%、置信区间为(51.81%~84.80%);网囊对叉长为 15.0 cm 的蓝圆鲷个体选择率均值为 14.75%、置信区间为(4.50%~47.90%)。

3 讨论

在科学研究中,数据处理和演绎方法直接影响研究结论的科学性和完整性。量化目标参数的均值及其不确定性(置信区间)是数据统计和分析的核心^[9]。同样的,在拖网网囊选择性的研究中,选择性参数和曲线不确定性的拟合也很重要。为了

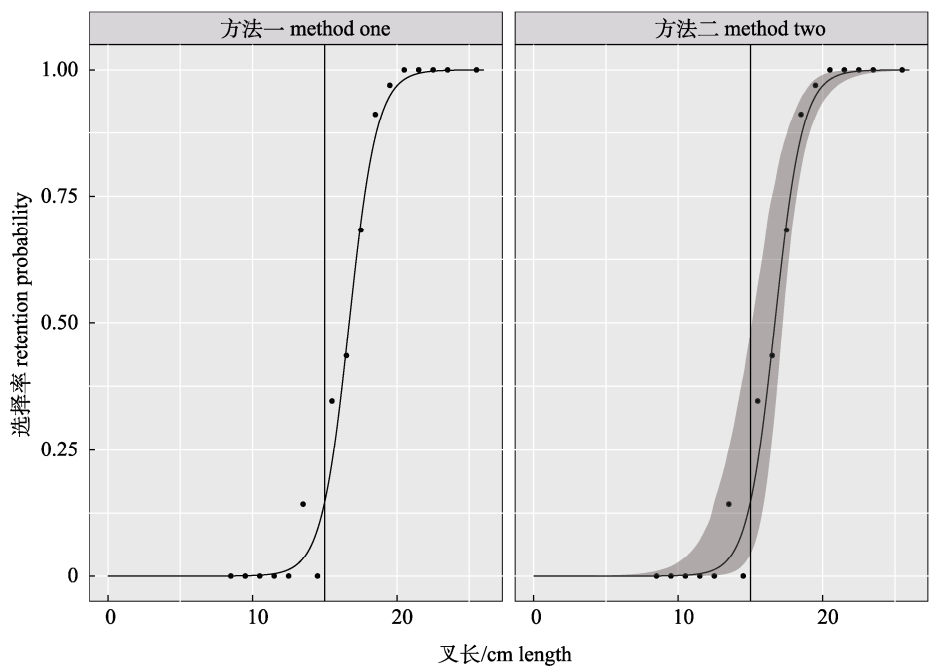


图 5 拖网网囊对蓝圆鲹的选择性曲线
垂直直线表示蓝圆鲹的开捕规格(15.0 cm).
Fig. 5 Selectivity curves of trawl codend for *Decapterus maruadsi*
The vertical line represents the minimum landing size of *Decapterus maruadsi* (15.0 cm).

展现选择性不确定性拟合的原理、过程和结果, 本研究在阐述双重拔靴法原理的基础上, 选取 2 组网囊选择性实验数据作为实例, 利用 SELNET 软件应用 2 种方法进行数据处理和拟合, 通过比较拟合结果展现双重拔靴法的特点和优势。基于同一数据处理软件, 比较 2 种方法拟合的结果。虽然从选择性参数均值看, 2 种拟合方法得到的值一致, 但是方法二拟合的置信区间展现了选择性的不确定性。首先, 如果仅仅提供选择性参数 (L50 和 SR) 的均值, 其在渔具管理和资源利用方面的参考价值是有限的。只有拟合了不确定性, 明确其均值的上限和下限值, 才能真正把握选择性及其变化, 找出网囊选择性优化的最佳方案。第二, 选择性曲线的拟合结果更加直观反映了双重拔靴法的强大优势。方法一拟合的理论选择率 (曲线) 和实际选择率 (小圆点) 有一定的偏差, 方法二则通过置信区间使得理论选择率和实际选择率有较好的契合 (图 4 和图 5)。第三, 网囊选择性的不确定性还体现在目标种类可捕规格个体的选择率。比如, 根据方法二拟合的结果, 实验网囊对叉长为 15.0 cm 的蓝圆鲹个体选择率均值为

14.75% (4.50%~47.90%), 说明该叉长个体被捕获的最低概率为 4.50%、最高为 47.90%, 方法一拟合的结果则无法提供这些信息。

双重拔靴法是以网次数据为单位进行重复抽样和拟合。因此, 应用该方法的最大误区在于先将所有网次数据整合为 1 再重抽样拟合。过去, 在不考虑选择性不确定性的前提下, 很多选择性研究会将所有实验网次数据整合, 再拟合选择性参考和曲线。但是, 此操作不可应用于双重拔靴法。原因在于: 如果先把所有数据进行了叠加处理成一个网次, 双重拔靴重采样时所有的外拔和内拔数据只有一个网次, 网次间和网次内选择性的差异无法通过双重拔靴进行模拟。因此, 先把所有网次数据整合为 1 再做拔靴的做法不科学, 得出的结论也无法反映选择性捕捞的过程。为了便于理解, 笔者对本研究中的两组实验数据进行了先整合网次数据再拔靴处理 (方法三), 其结果表明: 该方法拟合的选择性参数和选择性曲线置信区间显著变窄。应用方法三情况下, 实验网囊对宽突赤虾的 L50 和 SR 值分别为 6.22 (6.10~6.35) cm 和 1.88 (1.63~2.14) cm, 实验网囊对蓝圆鲹的 L50 和

SR 值分别为 16.69 (16.44~16.89) cm 和 2.12 (1.70~2.71) cm。上述选择性参数的置信区间比方法二拟合的结果要窄。同时, 获取的选择性曲线置信区间也明显变窄(图 6 和图 7)。因此, 笔者认为将所

有网次数据整合为一个网次, 然后再双重拔靴处理的做法不科学, 是数据处理的误区, 应该避免。

值得注意的是, 虽然双重拔靴法在国外的渔具选择性研究已得到广泛的应用, 但是国内很多

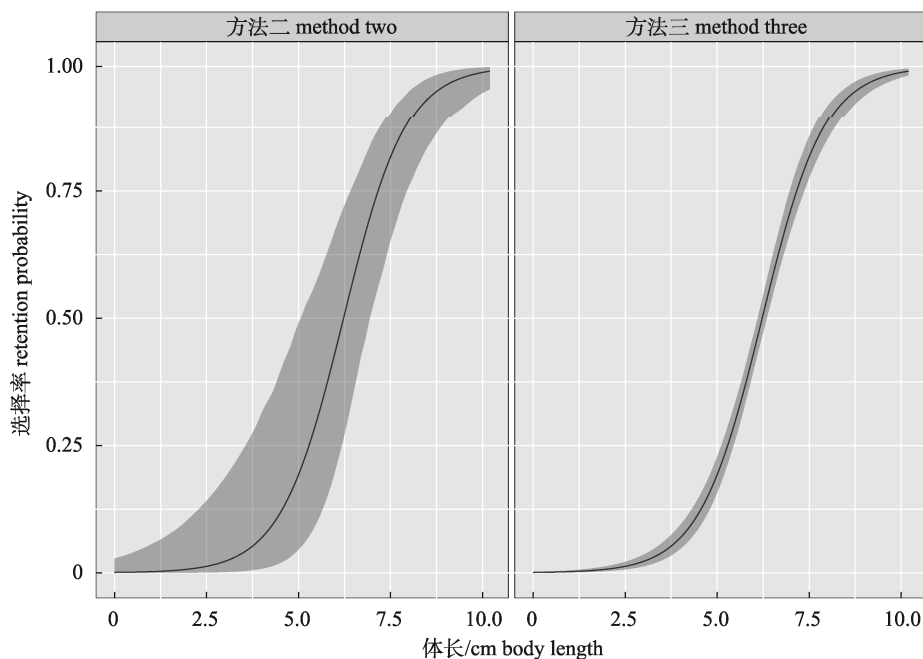


图 6 两种双重拔靴拟合方式下拖网网囊对宽突赤虾的选择性曲线

Fig. 6 Selectivity curves of trawl codend for *Metapenaeopsis palmensis* in two different double-bootstrapping procedures

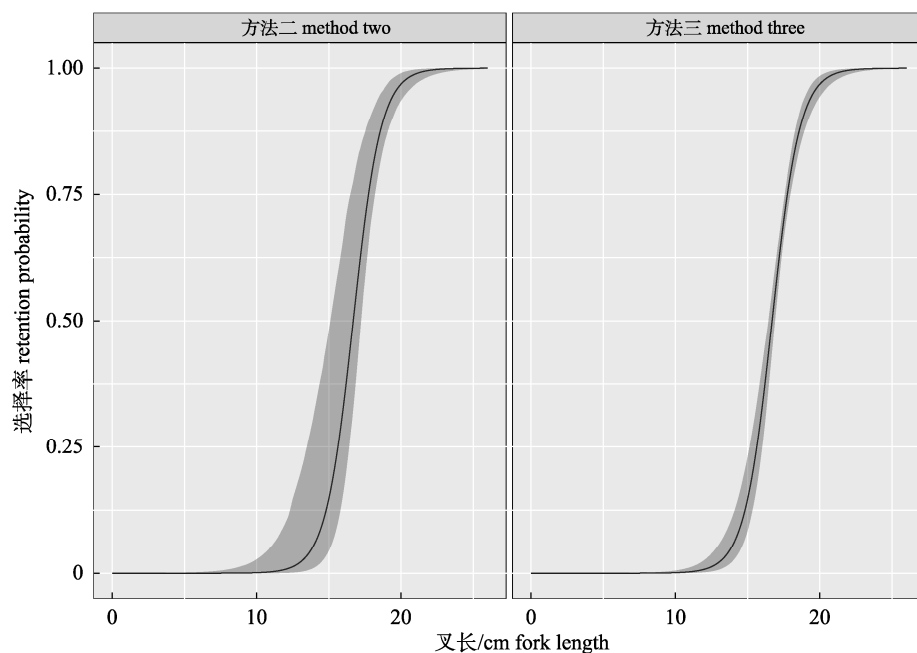


图 7 两种双重拔靴拟合方式下拖网网囊对蓝圆鲹的选择性曲线

Fig. 7 Selectivity curves of trawl codend for *Decapterus maruadsi* in two different double-bootstrapping procedures

拖网网囊选择性研究仍然未拟合不确定性。主要原因有: (1) 相关研究工作开展不够深入; (2) 研究人员对选择性的认识和理解水平还有待提高。目前, 国内常用的选择性拟合方法仍主要参考 20 世纪 90 年代 Wileman 等^[4]创立的规范。该规范的基本框架是利用一些虚拟初始参数(比如 a 和 b) 来代替 L50 和 SR 值, 通过极大似然估算法进行求解, 最终得到相应的选择性参数和曲线。实现该拟合求解过程的一个重要手段是利用 MS-Excel 的“规划求解”功能^[15]。该方法操作简单, 对计算机的软件和硬件要求不高, 至今仍被应用于很多拖网网囊选择性研究。但是, 该方法最大的缺陷在于忽略了选择性的差异性。因为实验网次之间存在明显的时空差异, 渔船的渔法操作、渔场的资源动态、环境因子等都会对网囊的选择性产生影响。所以, 假设网囊的选择性在所有条件下保持一致是不切合实际的。因此, 选择性的拟合必须考虑由于时空和理化因子造成的不确定性。本研究所展现的双重拔靴法则很好地解决了这个技术问题, 通过计算机的随机重取样进行拟合, 获取选择性参数和曲线的同时通过置信区间很好地展示了选择性的不确定性。

双重拔靴法的最大优势在于数据的采集简单, 其基本原理是基于网囊和套网的渔获量数据进行外拔和内拔以拟合选择性的差异性。如果选择性实验的最终目标是拟合网囊对目标种类的平均选择性, 双重拔靴法无疑是最佳的拟合手段。但是, 如果需要明确和量化选择性差异的影响因素, 双重拔靴法则有一定的局限性。这时需要考虑采用 Fryer 模型^[5]。但是, Fryer 模型需要采集更多的参数, 比如: 网囊的网目尺寸、网囊周径、网线粗细、渔获物重量、作业的季节等; 同时, Fryer 模型的拟合过程也较复杂, 先要以网次为单位拟合选择性参数 L50 和 SR, 然后将各个影响因素与选择性参数建立方程, 通过线性拟合得出影响选择性差异的因素^[16-17]。另外, Fryer 模型拟合需要有比较多的网次和影响因素数据, 这样拟合出来的结果才比较准确和科学。目前, 使用双重拔靴法和 Fryer 模型拟合的结果是否存在显著的差异尚无文献报道, 是今后需要开展的研究方向。

本研究表明将所有网次数据进行联合拟合(方法一)会忽略网囊选择性的差异性, 但是该方法拟合的平均选择性参数(L50 和 SR)与双重拔靴法拟合的均值一致。双重拔靴法的框架在于以方法一为基础, 借助计算机的重取样拟合网囊选择性的网次间和网内差异。这样, 两种方法拟合的选择性参数均值相同。因此, 如果仅仅需要知道选择性参数的均值, 方法一则为最便捷的途径。目前, 很多选择性研究通过方法一拟合的赤池信息值(Akaike's information criterion, AIC)来比较不同模型对实验数据的拟合度。比如, 通过方法一拟合的 AIC 值比较 4 组模型 Logit、Probit、Gompertz 和 Richards 对实验数据的拟合度, AIC 值最小的模型被认为拟合度最佳, 然后再将最佳拟合模型应用于双重拔靴法中拟合选择性的不确定性^[18-20]。

由于双重拔靴法是以实验的网次数据进行重取样, 不需要考虑实验数据本身是否属于某种数学分布(比如, 正态分布等)。虽然本研究中的 2 个实验均为网囊网目选择性, 实际上双重拔靴法可应用于其他方面的选择性, 比如: 安装于网囊内部分离装置的选择性研究^[10,14,19]。同时, 该方法不仅适用于以套网法实验下的选择性不确定性拟合, 还适用于配对渔具法^[21]和交替作业法的选择性拟合^[19,22]。双重拔靴法在其他种类渔具选择性中也适用, 比如张网^[23]、刺网^[24]、钓具^[25]和笼壶^[26]。此外, 双重拔靴法还可应用于拟合生物多样性指数(比如多样性指数、均匀度指数和丰富度指数)和渔获种类的组成等及其不确定性^[27]。

参考文献:

- [1] Administrative Department for Fisheries, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension center, China Society of Fisheries. Chinese Fishery Yearbook 2023[R]. Beijing: China Agriculture Press, 2023: 1-159. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2023 中国渔业统计年鉴[R]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 1-159.]
- [2] Kennelly S J, Broadhurst M K. A review of bycatch reduction in demersal fish trawls[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2021, 31: 289-318.
- [3] He P, Chopin F, Suuronen P, et al. Classification and illustrated definition of fishing gears[R]. FAO Fisheries and

- Aquaculture Technical Paper, 2021, 672: 1-94.
- [4] Wileman D, Ferro R S T, Fonteyne R, et al. Manual of methods of measuring the selectivity of Towed Fishing Gear [R]. ICES Cooperative Research Report, 1996, 215: 1-126.
- [5] Fryer R J. A model of between-haul variation in selectivity [J]. ICES Journal of Marine Science, 1991, 48(3): 281-290.
- [6] Millar R B. Incorporation of between-haul variation using bootstrapping and nonparametric estimation of selection curves[J]. Fishery Bulletin, 1993, 91: 564-572.
- [7] Herrmann B, Sistiaga M, Santos J, et al. How Many Fish Need to be measured to effectively evaluate trawl selectivity[J]. PLoS ONE, 2016, 11(8): e0161512.
- [8] Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife[J]. The Annals of Statistics, 1979, 7: 1-26.
- [9] Chernick M R. Bootstrap Methods: A Guide for Practitioners and Researchers[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007: 1-369.
- [10] Sistiaga M, Herrmann B, Grimaldo E, et al. Assessment of dual selection in grid based selectivity systems[J]. Fisheries Research, 2010, 105(3): 187-199.
- [11] Herrmann B, Sistiaga M, Nielsen K N, et al. Understanding the size selectivity of redfish (*Sebastes* spp.) in north Atlantic trawl codends[J]. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science, 2012, 44: 1-13.
- [12] Yang B Z, Herrmann B, Yan L, et al. Comparing size selectivity and exploitation pattern of diamond-mesh codends for southern velvet shrimp (*Metapenaeopsis palmensis*) in shrimp trawl fishery of the South China Sea[J]. PeerJ, 2021, 9: e12436.
- [13] Li Y, Yang B Z, Zhang P, et al. Size selectivity of codend mesh size of trawl for *Decapterus maruadsi* in northern part of South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(3): 170-176. [李亚男, 杨炳忠, 张鹏, 等. 南海北部拖网对蓝圆鲹的选择性研究[J]. 南方水产科学, 2022, 18(3): 170-176.]
- [14] Bak-Jensen Z, Herrmann B, Santos J, et al. Fixed mesh shape reduces variability in codend size[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, 2022, 79: 1820-1829.
- [15] Tokai T. Maximum likelihood parameter estimates of a mesh selectivity logistic model through SOLVER on MS-Excel[J]. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, 1997, 61(3): 288-298. [東海正. MS-Excel のソルバーによる曳網の網目選択性 Logistic 式パラメータの最尤推定[J]. 水産海洋研究, 1997, 61(3): 288-298.]
- [16] Fryer R J, O'Neill F G, Edridge A. A meta-analysis of haddock size-selection data[J]. Fish and Fisheries, 2016, 17(2): 358-374.
- [17] O'Neill F G, Fryer R J, Frandsen R P, et al. A meta-analysis of plaice size-selection data in otter trawl codends[J]. Fisheries Research, 2020, 227: 105558.
- [18] Herrmann B, Krag L A, Krafft B A. Size selection of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in a commercial codend and trawl body[J]. Fisheries Research, 2018, 207: 49-54.
- [19] Herrmann B, Sistiaga M, Larsen R B, et al. Effect of three different codend designs on the size selectivity of juvenile cod in the Barents Sea shrimp trawl fishery[J]. Fisheries Research, 2019, 219: 1-8.
- [20] Yang B Z, Herrmann B. Effect of codend mesh sizes on the size selectivity of cocktail shrimp (*Trachypenaeus curvirostris*) in shrimp trawl fishery of the South China Sea[J]. Frontier in Marine Science, 2022, 9: 928906.
- [21] Yang B Z, Herrmann B, Cheng Z H. Reducing catch efficiency of rabbitfish (*Siganus oramin*) in a shrimp beam trawl fishery of the South China Sea[J]. Regional Studies in Marine Science, 2021, 47: 101917.
- [22] Larsen R B, Herrmann B, Sistiaga M, et al. New approach for modelling size selectivity in shrimp trawl fisheries[J]. ICES Journal of Marine Science, 2018, 75(1): 351-360.
- [23] Yu M, Herrmann B, Liu C, et al. Effect of codend design and mesh size on the size selectivity and exploitation pattern of three commercial fish in stow Net fishery of the Yellow Sea, China[J]. Sustainability, 2023, 15: 6583.
- [24] Grimaldo E, Herrmann B, Vollstad J, et al. Fishing efficiency of biodegradable PBSAT gillnets and conventional nylon gillnets used in Norwegian cod (*Gadus morhua*) and saithe (*Pollachius virens*) fisheries[J]. ICES Journal of Marine Science, 2018, 75: 2245-2256.
- [25] Herrmann B, Sistiaga M, Rindahl L, et al. Estimation of the effect of gear design changes on catch efficiency: Methodology and a case study for a Spanish longline fishery targeting hake (*Merluccius merluccius*)[J]. Fisheries Research, 2017, 185: 153-160.
- [26] Cerbule K, Herrmann B, Grimaldo E, et al. The effect of white and green LED-lights on the catch efficiency of the Barents Sea snow crab (*Chionoecetes opilio*) pot fishery[J]. PLoS ONE, 2021, 16 (10): e0258272.
- [27] Herrmann B, Cerbule K, Brčić J, et al. Accounting for uncertainties in biodiversity estimations a new methodology and its application to the mesopelagic sound scattering layer of the high Arctic[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 1-13.

Estimation uncertainties of the size selectivity of trawl codends based on the double-bootstrapping technique

YANG Bingzhong^{1,2}, WAN Rong^{2,3}

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China;
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries/Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China

Abstract: Codend size selectivity is the keystone for management of trawling fisheries and sustainable exploitation of fisheries resources. In order to assess the size selectivity of trawl codends, experimental sea trials are often conducted and fishing data is manipulated using some mathematical models to obtain selectivity parameters, such as 50% retention length (L50) and selection range (SR), and selectivity curves. Providing the values of this information, however, is highly inadequate. It needs to account for the uncertainties in size selectivity and represent them in confidence intervals. To do this, the double-bootstrapping technique is intensively applied in fishing gear selectivity studies. In this study, the basic principle of the double-bootstrapping technique was firstly introduced, then two set of fishing data involved two different fishing species were used as case studies to show and compare how this technique was used to estimate the uncertainties of codend size selectivity. Our results demonstrated that the uncertainties of codend size selectivity could be easily estimated applying the double-bootstrapping technique. Additionally, the most commonly wrong practice of using the double-bootstrapping technique was discussed. Our study will provide a guideline for conducting trawl codend selectivity studies, improve the level of selectivity researches, and contribute to the sustainable development of marine fisheries in China.

Key words: trawl; codend selectivity; double-bootstrapping technique; uncertainties

Corresponding author: WAN Rong. E-mail: rongwan@shou.edu.cn