

文章编号: 1000-0615(2018)05-0808-09

DOI: 10.11964/jfc.20170410786

· 综述 ·

## 南极磷虾生物量估算方法

许柳雄<sup>1,2,3</sup>, 王 腾<sup>1</sup>, 朱国平<sup>1,2,3</sup>, 童剑锋<sup>1,2,3\*</sup>

(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, 上海海洋大学, 上海 201306;

3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 201306)

**摘要:** 南极磷虾是南大洋生态系统食物网中的关键种, 在南大洋中上层生态系统中起着至关重要的连接作用, 其资源的养护和持续利用受到国际社会日益关注。磷虾研究已有90多年的历史, 其生物量及其分布一直是研究的重点。生物量评估方法也在不断发展, 从早期的浮游动物干重法、生产量与生物量比例系数转换法, 到网具采样法以及现在流行的声学法, 评估手段也变得更为高效。本文通过系统梳理磷虾生物量的主要评估方法, 分析其优缺点, 并着重从磷虾目标强度模型(TS)参数的海上实测、声学数据中磷虾信号的提取, 磷虾单位平方海里声学反射系数(NASC)的计算, 基于渔船声学数据修正磷虾渔业单位捕捞努力量渔获量(CPUE), 基于渔船声学数据的磷虾集群、洄游和渔场形成机制研究等5个方面对现行生物量声学评估法提出改进建议, 提高资源评估的精度, 以期对磷虾生物资源的开发与管理提供科学依据。

**关键词:** 南极磷虾; 生物量评估; 声学

**中图分类号:** S 931.1

**文献标志码:** A

南极磷虾(*Euphausia superba*, 下以简称磷虾)是南大洋高营养级物种的主要摄食对象<sup>[1-2]</sup>, 也是浮游生物重要的捕食者<sup>[3-4]</sup>, 在南大洋中上层生态系统中起着关键的作用。磷虾的研究已有90多年的历史, 因受技术与方法的限制, 早期研究主要集中在磷虾的生物学属性, 对其生物量的评估涉及较少<sup>[5-7]</sup>。至20世纪70年代, 磷虾开始成为南极渔业重要的经济目标种, 磷虾资源成为南极海洋生物资源养护委员会(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)的重要管理对象, 磷虾生物量成为研究重点, 评估方法不断发展。从早期的浮游动物干重法<sup>[8]</sup>、生产量(production)与生物量(biomass)比例系数转换法(捕食者消费量法<sup>[9]</sup>、初级生产力法<sup>[10]</sup>、幼体丰度法<sup>[11]</sup>), 至随后的网具采样法<sup>[12]</sup>以及现行的声学法。不同的

评估方法得出的南大洋磷虾生物量各不相同, 精度也不一致, 但声学方法以其分辨率高、采样时空范围广及评估结果精度高, 且不会对资源造成伤害等优点成为现行磷虾生物量评估的常用方法, 被CCAMLR认可并推荐。本研究通过系统梳理南极磷虾生物量的主要评估方法, 分析其优缺点, 并着重从磷虾目标强度模型(target strength, TS)参数的海上实测、声学数据中磷虾信号的提取, 磷虾单位平方海里声学反射系数(nautical area scattering coefficient, NASC)的计算, 基于渔船声学数据修正磷虾单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE), 基于渔船声学数据的磷虾集群、洄游和渔场形成机制研究等5个方面对现行声学生物量评估法提出改进建议, 以期对磷虾生物资源的评估、开发与管理提供科学依据。

收稿日期: 2017-04-13 修回日期: 2017-05-25

资助项目: 国家自然科学基金(41606210, 41776185); 农业部南极海洋生物资源开发利用(D8002-16-8007-2); 国家科技支撑计划(2013BAD13B03); 上海海洋大学科技发展专项基金(A2020300100215)

通信作者: 童剑锋, E-mail: jftong@shou.edu.cn

## 1 浮游动物干重法

浮游动物干重法的评估原理是根据浮游动物干重与湿重间的转换系数评估磷虾的总生物量。本方法包含两个重要参数: 浮游动物干湿重量百分比, 磷虾在浮游动物总生物量中所占比例。浮游动物处理得出的干湿重之比和海上浮游动物采样的样本组成比例的准确性是影响评估精度的主要因素。Gullard<sup>[8]</sup>根据本方法在1970年初步评估了磷虾的总生物量, 先假设浮游动物90%的质量为水分, 并据此将采样计算得出的浮游动物干重转换为相应的湿重质量。同时, 该研究认为在浮游动物群落中, 磷虾生物量约占50%, 据此得出磷虾的生物量。本方法包括海上的浮游动物采样和样本的实验室处理, 工作量小, 可操作性强。但这2个参数的细小变化就可能会导致生物量评估结果巨大的改变, 表明该方法的稳定性较差, 只能用于定性描述磷虾资源量, 不能作为渔业管理的科学依据。因此, 浮游动物干重法未得到推广应用。

## 2 生产量/生物量法(P/B法)

P/B法的原理是根据磷虾种群的生产量(P)和生产量与生物量之比(P/B), 换算出磷虾的生物量。本方法包含2个影响评估精度的重要参数: 磷虾种群的生产量, 磷虾P/B值。与干重法相比, P/B法的优点是限制因素较少, 且生产量的计算方法较多, 如通过捕食者<sup>[9]</sup>、饵料<sup>[10]</sup>及磷虾幼体<sup>[11]</sup>等, 得出的磷虾生物量精度也相对较高。缺点是工作量较大, 可操作性弱, 养殖磷虾的存活时长直接影响P/B值, 生产量的评估也需要海上的大量采样与实验室的分析处理。Allen<sup>[13]</sup>在1971年根据养殖磷虾的存活时间, 提出磷虾的生活史为3年, 且生长方程为线性, 在忽略冬季不生长或生长速度较慢的时间后, 计算得出磷虾的生产量/生物量(P/B)为1.8。

### 2.1 根据捕食者消费量评估

捕食者法估算磷虾最小生产量的原理是累加各种捕食者对磷虾的消费量, 将总消费量视为磷虾种群的最小生产量。Laws<sup>[9]</sup>于1985年计算出每年被鲸类、海鸟、海豹、头足类和鱼类消费的磷虾生物量约有4.70亿t, 磷虾被捕食者消费的生物量视为磷虾种群的最小生产量, 再通过P/B系数, 得出磷虾的生物量约为8.46亿t。这种方法受较多因素的影响, 首先, 捕食者的种群

规模数量存在不确定性, 如海豹、鲸鱼和鸟类等, 运动能力较强, 难于采样; 另一些捕食者, 如鱿鱼, 对网具有较强的躲避能力, 采样准确性无法保证。当这些物种采样较少的时候, 误差较大, 会严重影响生物量评估的准确性。其次, 所有捕食者的饵料组成与质量比例难以准确测定或评估, 因为饵料存在季节性的变化特征, 采样季节的选择会影响生产量的确定, 会间接影响评估结果。最后, 磷虾种群每年被捕食的量在不同海域分布不均衡, 种群被捕食的资源量也不一致, 只有每个海域被捕食的磷虾资源量都能确定, 整个南极海域磷虾资源评估的结果才会准确。

### 2.2 应用磷虾消耗的饵料评估

饵料法估算生产量的原理是根据浮游动物消耗浮游植物的比例, 将年浮游植物消耗量分配到磷虾种群, 再计算得出磷虾种群的年生产量。Clark<sup>[10]</sup>于1985年通过此方法计算得出磷虾种群的年生产量为1.00~5.00亿t, 结合P/B因子, 得出磷虾的生物量为1.80~9.00亿t。使用浮游植物估算浮游动物生产量的优点包括: 首先浮游植物游泳能力较弱且不是集群分布, 海上采样操作简单、准确度较高、具有一定的代表性; 此外, 初级生产力的计算方法较为成熟, 适宜推广。然而, 可能影响生产量评估精度的因素如下: 首先, 冰缘浮游植物的暴发与冰区藻类对总初级生产力的贡献被严重忽视。有研究表明, 对冰缘浮游植物暴发现象的忽视, 使得南大洋的初级生产力被低估了60%<sup>[14]</sup>。此外, 浮游植物的主要捕食者中, 樽海鞘与磷虾间的相对比例存在争议。2个物种均为集群分布, 但磷虾集群运动距离较长<sup>[15]</sup>, 樽海鞘的集群有一定的时空分布特点, 集群出现与消失的时间短暂, 采样比较困难, 难以确定它们对初级生产力消耗的准确比例。此外, 小型浮游动物也会消耗部分浮游植物, 这些小型浮游动物不会被浮游动物采样网获取<sup>[16]</sup>, 增大了生物量评估的误差。

### 2.3 根据磷虾幼体生产量进行评估

幼体丰度法的原理是假设当年的磷虾幼体全部补充到磷虾种群, 根据幼体的丰度估算种群的生产量。Brinton等<sup>[11]</sup>于1984年最早使用斯科舍海的磷虾幼体丰度评估磷虾种群的生产量。使用磷虾幼体计算生产量的优点是磷虾幼体不会如成体那样躲避网具<sup>[17]</sup>, 采样网得到的磷虾密

度更为准确。本实验假设3月中旬的磷虾幼体代表当年的生产量,此时的带叉幼体不会躲避网具,同时设定磷虾带叉幼体至2龄次成体的存活率为10%,2龄至3龄及以上的成活率为60%。根据每个体长段2龄至3龄磷虾个体的平均增重计算种群生产量。然而,磷虾的真实存活率数据并不确定,其随外界环境的变化而变化。此外,这种假设是基于斯科舍海的磷虾群体,其磷虾生物量占南极海域磷虾种群总生物量约20%。但不同海域的初级生产力资源不同,磷虾的生长情况也可能并不相同,不宜使用单一的生长数据代表磷虾整体的生长情况。

### 3 利用网具滤水体积法进行评估

Allen<sup>[13]</sup>关于P/B系数的研究基于一个重要假设,即磷虾的生活史为3 a。但1982年澳大利亚研究人员开始利用磷虾体表的色素鉴定磷虾的年龄<sup>[18]</sup>,并发现磷虾的生活史为6~7 a,而不是之前的3 a。若磷虾需要用7 a而不是之前认为的4 a才能长到最大体长65 mm,那么其生产与繁殖的速率会明显改变,相应的P/B值也会显著下降,P/B法评估得出的磷虾生物量的误差会变大,不能作为资源管理的科学依据。随后的科学调查和磷虾商业渔业开始使用网具滤水体积法评估磷虾的生物量<sup>[12, 19-20]</sup>,滤水体积法的原理是:计算浮游动物网或商业性拖网的滤水体积中的磷虾丰富度,除以网具滤水体积,得出对应网次的磷虾密度,推算磷虾的生物量。网具采样包含2种网具,科学调查所用的浮游生物采样网和商业磷虾所用的拖网。滤水体积是影响网具法评估精度的主要因素,因为浮游动物网以向上的方式对磷虾集群进行采样,包括垂直向上和倾斜向上。垂直向上的采样水体中磷虾丰富度与网具穿过的虾群的厚度直接相关。倾斜向上的采样水体中的磷虾丰富度还与采样的角度有关。2种方式下,计算的网具滤水体积是指网具采样过程中所过滤的水的总体积,包括网具通过磷虾集群水层与无磷虾分布水层。也就是说,使用浮游生物采样网时,采样深度范围的选择会影响磷虾生物量的评估结果。商业性磷虾拖网作业一般是在磷虾集群比较密集的特定水层范围进行,捕捞产量只能代表磷虾集群的水层,不能用于估算整个深度范围内的磷虾生物量,因为它会对磷虾的生物量造成偏高的评

估。尽管2种网具都存在不足,但与之前的间接转化法相比,网具采样法的可操作性高,工作量大,是当时磷虾生物量评估比较准确的方法。

### 4 应用声学法进行评估

磷虾的声学探测是利用磷虾与海水介质物理特性的不同来实现。鱼探仪换能器发射的声波在水中传播,遇到磷虾有机体,由于磷虾各部位声阻抗率与海水介质的声阻抗率不同,磷虾对入射声波产生散射作用,一部分反向散射回换能器,形成了回波信号。回波信号在传输过程中会有衰减,采用适当的补偿措施,使得回波信号能客观反映磷虾的散射能力,磷虾的定量研究成为可能。影响评估精度的主要因素有:声学设备的稳定性、目标强度模型的准确性、磷虾信号的提取、体长—体质量的转换等。相比网具法,声学法的分辨率高、采样时空范围广、评估结果精度高,且不会对资源造成伤害,对磷虾的分布能提供准确的信息,但工作量大,可操作性复杂。CCAMLR最早于1981年在斯科舍海域进行了FIBEX(first international BIOMASS experiments)调查活动<sup>[21]</sup>。该调查项目是第一次针对南极海洋生物资源的多国多船的联合调查活动。对于南极磷虾的调查采用了当时最先进的声学方法,获得了斯科舍海部分海域南极磷虾的分布和资源总量情况。在FIBEX调查项目之后,随着技术的发展与目标强度(TS)模型的改进,声学方法评估生物量的精度也越来越高。在2000年,CCAMLR在南极半岛附近海域(48区)组织了1次多国多船的南极磷虾资源评估调查<sup>[22]</sup>。该项目应用多频科学鱼探仪对同一水体进行采样,采用声学方法来评估南极磷虾的生物量。由于科学调查船的成本较大,现在的磷虾声学研究除了传统的科学调查船,商业磷虾渔船断面调查的声学数据也被用于生物量评估。

#### 4.1 磷虾目标强度(TS)模型

科学鱼探仪可以记录用于定量分析的磷虾回波积分值,再使用适当的TS模型确定磷虾的目标强度,随后可以计算出磷虾的丰度信息。TS的测定方法主要有3种:自然状态下的现场测定法、实验状态下的水槽或水池测定法、模型法。Greene等<sup>[23]</sup>于1991年在实验室条件下研究了磷虾体长分布与回声之间的关系,提出了经典

的磷虾TS线性模型:

$$TS = -127.45 + 34.85 \log L \quad (2)$$

式中,  $L$ 为磷虾标准体长, 由眼缘前端到最后尾节后端。随后的一些TS测量<sup>[24-26]</sup>表明, Greene经典线性模型的适用频率为120 kHz, 主要针对磷虾成体, 不能覆盖磷虾的全体长范围。此外, Greene模型可能过高估计磷虾的目标强度<sup>[25]</sup>, 说明除了体长之外, 影响磷虾声学目标强度的因素还有其他一些条件。

Demer等<sup>[27-28]</sup>发现影响磷虾目标强度的因素主要是磷虾体型、相对于水平方向的磷虾倾角、磷虾物理属性(磷虾与海水间的密度比, 声速比)等, 而Greene线性模型均未考虑这些因素。为了弥补经典线性模型的缺陷, Chu等<sup>[29]</sup>于1993年将磷虾体形等效为规则弯曲的圆柱体, 并建立了磷虾目标强度的畸变波玻恩近似(distorted wave Born approximation, DWBA)物理模型。该模型考虑了声波入射角度、磷虾体长、倾角、外形, 声速比和密度比等因子:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

$$f_{bs} = \int_{r_{pos}} \frac{k_1^2 a}{4k_2} (\gamma_{\kappa} - \gamma_{\rho}) e^{2ik_2 \cdot r_{pos}} \frac{J_1(2k_2 a \cos \beta_{tilt})}{\cos \beta_{tilt}} |dr_{pos}| \quad (4)$$

$$TS = 10 \log \langle |f_{bs}|^2 \rangle \quad (5)$$

式中,  $\lambda$ 为入射波的波长,  $k$ 是入射波波数,  $r_{pos}$ 是磷虾身体轴线的方向向量,  $J_1$ 是一阶的贝塞尔函数,  $a$ 是指等效圆柱体模型的横截面半径,  $\beta_{tilt}$ 是圆柱体与入射波间的夹角。Demer等<sup>[30]</sup>在2003年重新定义并改进了之前的DWBA模型, 考虑了声音的随机散射、噪声, 以及动物体游动时体型的变化, 建立了随机SDWBA模型。之后, 根据De Rosny<sup>[31]</sup>关于水槽中声波在鱼群的多重散射研究结果修正了随机SDWBA模型<sup>[32]</sup>, 提高了模型测量与预测的准确性<sup>[33]</sup>:

$$TS(kL) = A \left[ \frac{\log_{10}(BkL)}{BkL} \right]^c + D(kL)^6 + E(kL)F(kL)^4 + G(kL)^3 + H(kL)^2 + IkL + J + 20 \log_{10} \left( \frac{L}{L_0} \right) \quad (6)$$

## 4.2 磷虾回波信号鉴别方法

声学调查数据中通常包含磷虾以外的鱼类

或浮游动物, 需要对回波积分数据进行分配, 去除磷虾以外的回波信号, 再进行磷虾生物量的评估。声学生物量评估早期, 研究人员通过对声学图像的直接观察, 辅以目标网具取样以确定多个种群混合时的磷虾声学强度<sup>[34]</sup>。随着多频探鱼仪的使用, 声学目标在不同频率下的回声反射强度不同的特点被用于后期处理软件中进行映像分析和积分值的分配<sup>[35-36]</sup>。早期研究表明, 在120和38 kHz频率下, 磷虾的回声反射强度差值范围为2~12 dB<sup>[37]</sup>。2000年, CCAMLR在多国合作的磷虾资源调查对此进行了修正, 将范围扩大为2~16 dB<sup>[38]</sup>。频差技术的出现提高了磷虾鉴别的精度, 生物量评估的准确性也有了很大提高。

## 4.3 体长—体质量关系

资源密度和资源量计算时用到的体长和体质量, 由现场取样测定。由于磷虾个体较小, 现场测定的重量误差较大, 可使用磷虾的体长—体质量关系来转化。根据网具采样得到的磷虾体长频率分布, 结合磷虾体长与体质量关系, 得出磷虾的质量频率分布, 最后得出单位体积磷虾生物量。准确的体长—体质量关系是将磷虾密度转换成磷虾质量的关键, 也是精确评估磷虾资源生物量的重要条件。但由于磷虾各季节生长频率不一致, 南半球夏季生长速率较快, 冬季磷虾生长速率较慢, 甚至出现负生长。因此, 更为详细的体长—体质量关系需精确到月, 即每月磷虾体长—体质量的关系不同<sup>[20]</sup>。关于磷虾生长及体长—体质量关系可参见Siegel<sup>[39]</sup>及朱国平<sup>[40]</sup>的研究。

## 5 小结

浮游动物干重法虽然采样要求简单, 可以在自然条件下进行, 但误差较高。P/B法在评估精度上有了提升, 但限制因素较多, 适于小尺度海域磷虾的生物量评估。网具采样方法理论上可以得到南大洋磷虾的生物量与分布信息, 但商业拖网低估生物量以及浮游动物采样网高估生物量的缺点无法解决, 评估结果达不到科学要求。声学方法可以得到任意时空尺度的磷虾分布与生物量信息, 且分辨率较高, 得出的评估结果也最为准确。南大洋生态系统食物网结构简单, 抵抗力脆弱, 易遭受破坏。为了保

护南大洋生态系统, CCAMLR对南极生物资源开发与利用制定了严格的管理措施。尤其对于磷虾, CCAMLR按照海区及亚区制定磷虾捕捞限额, 同时每隔一段时间就会进行一次大范围的磷虾生物量调查, 以掌握磷虾资源的现状, 研究资源变动趋势, 制定新的捕捞限额。本文从以下5个方面阐述对声学资源评估的改进建议, 提高声学数据的利用率。

### 5.1 磷虾目标强度模型(TS)参数的海上实测

CCAMLR声学工作组2016年报告中提出, 使用SDWBA模型计算的磷虾TS值来计算判别磷虾的频率分贝差值范围, 以及NASC到磷虾密度的转换因子。因此, 该模型参数的准确性对于磷虾生物量评估至关重要。在该模型参数中, 个体相对于背景海水间的声速比( $h$ )和密度比( $g$ )采用Foote的研究结果<sup>[24]</sup>。该研究是基于斯科舍海养殖磷虾的实验观察数据得出, 考虑到磷虾生物学特性存在着显著的季节性和区域性差异, 建议开展多季节、多海区的密度比与声速比实验。这2个参数微小的误差有可能造成生物量或丰度评估一个量级的误差, 且已有研究也主要基于实验室环境开展<sup>[26-27]</sup>, 并非现场环境。未来可以进行海上的声速比与密度比的测定, SDWBA模型参数更为准确。

### 5.2 声学数据中磷虾信号的提取

声学调查数据中通常包含磷虾以外的鱼类或浮游动物, 用于评估磷虾生物量前, 需要对回波积分数据进行分配, 去除非磷虾回波信号。现在常用的信号提取方法是用3个频率的频差值(120~38、200~120 kHz)进行磷虾鉴别<sup>[37-38]</sup>。中国磷虾渔船上的声学设备频率多数为38、70及120 kHz, 不能直接使用现有的三频差法提取磷虾信号, 70 kHz下磷虾反射强度的测量值缺少实践, 使用70~38, 120~70 kHz两组频差组合提取磷虾信号需要更多研究予以确认。另外, 对于散射属性与磷虾接近且与磷虾集群混杂在一起的物种, 频差法的鉴定准确性较差, 需要新的方法判别回声数据中的磷虾。未来需要确定可靠的38、70、120 kHz三频频差值的范围, 对我国渔船的声学数据进行有效处理, 提高声学数据中磷虾判别的精度。此外, 需要通过应用统计学方法(分类树法、随机森林法等)对磷虾与其

他散射属性接近物种进行判别, 并将鉴定结果与传统频差法进行比较, 建立新的磷虾信号提取方法, 供CCAMLR选择。

### 5.3 磷虾NASC计算

CCAMLR在2014年制定了磷虾商业渔船换能器参数的设置以及声学数据的采集规范(表1, 其中声学图像展示范围中的0表示与换能器处于同一深度, 即海平面以下6 m)<sup>[41]</sup>。商业磷虾渔船上鱼探仪采集到的声学数据同样可以提供关于磷虾分布与丰度的大量信息。每年在南极海域作业的磷虾商业拖网船较多, 科学鱼探仪的使用也逐渐普及, 因此可以得到大时空尺度的声学数据, 这些数据可以提供丰富的磷虾分布和资源量的时空变化信息。渔船声学数据包括断面调查探捕数据和捕捞期间数据。断面探捕的航线通常预先设计, 系统科学的平行断面, 其声学数据辅助以网具采样的生物学数据常用于磷虾的生物量评估, 准确性较高。捕捞作业由于渔船航线通常为集中于狭小区域的重复断面, 对调查海域的覆盖率较低, 声学数据难以直接进行生物量评估。由于商业渔船追求经济利益, 进行断面调查的时间相较于捕捞活动的时间很短, 大量捕捞期间的声学数据没有得到有效利用。这些数据也可以提供磷虾资源密度、分布的季节性变化的大量信息。由于渔船一般同时装备有水平声纳、垂直探鱼仪以及测深仪等多种声学设备, 这些设备同时使用, 相互干扰, 采集的数据存在很强的干扰信号, 计算的NASC误差较大, 可以通过换能器的被动模

表1 换能器设置规范

Tab. 1 Transducer setting specification

参数 parameters	单位 units	设置 settings		
频率 frequency	kHz	38	70	120
功率 power settings	W	2000	700	250
脉冲长度 pulse duration	ms	1.024	1.024	1.024
脉冲间隔 pulse interval	s	2	2	2
数据收集范围(min. ~max.) data collection range	m	0~1100	0~1100	0~1100
底层检测范围(min. ~max.) bottom detection range	m	5~1100	5~1100	5~1100
图像展示范围(min. ~max.) display range	m	0~1100	0~1100	0~1100

式采集一段时间的数据, 在后处理软件中计算并去掉背景噪声, 提高NASC计算的准确性。此外, 渔船作业期间的声学数据具有一定的时空相关性, 不能根据计算的NASC直接研究磷虾的分布信息, 未来可以通过生物学统计上的一些方法(如基于时间序列的地统计模型和最大似然法等)对渔船声学数据进行标准化处理, 去掉数据间的时空相关性, 得出准确磷虾的分布和丰度信息, 评估捕捞作业海域磷虾的生物量, 提高声学数据的利用率。

#### 5.4 基于渔船声学数据修正磷虾渔业CPUE

早在1987年, 就有科学家研究磷虾渔业CPUE与磷虾资源丰度间的关系<sup>[42]</sup>, 朱国平等<sup>[43]</sup>也讨论了CPUE作为磷虾资源丰度指标的可行性。使用CPUE衡量磷虾资源丰度的优点: 一是CPUE的计算方法较多, 可以选择简单实用的方法; 二是科学调查船在南极进行资源评估的成本较大, 通过商业性磷虾渔业数据开展资源评估工作, 可为评估磷虾资源提供重要的科学支撑, 尤其是在磷虾种群补充量尚存在疑问的前提下, 利用CPUE作为丰度指标也是目前最好的选择。同样也存在一些缺点限制着CPUE指标的推广, 主要体现在两个方面: 一是磷虾渔业的作业时空尺度不同, 即使在同一捕捞海域, 不同空间范围的渔获量也不一致; 从时间尺度上分析, 磷虾渔船通常集中在南半球的夏季月份捕捞作业, 作业时间较为集中。二是磷虾资源大多数情况下呈斑块状、不均匀、不连续分布, 分布模式的不同代表着磷虾集群资源量的不同, 这会影响CPUE计算的准确性。我国目前的磷虾资源评估刚开始, 在现有渔船声学断面调查的基础上, 利用渔业数据CPUE评估磷虾丰度是磷虾资源评估的有效补充方式。同时参考渔船声学数据评估的结果, 也为基于渔业数据的磷虾生物量评估提供了较好的佐证。

#### 5.5 基于渔船声学数据的磷虾集群、洄游和渔场形成机制研究

磷虾渔船在南极海域作业范围广, 作业时间长, 其声学数据包含作业海域磷虾集群大范围的时空分布与变化信息。磷虾集群是磷虾种群的基本组织单元, Fielding等<sup>[36]</sup>通过比较调查海域磷虾总密度与磷虾集群密度, 发现98%的磷虾平均密度来源于磷虾集群。磷虾集群行为会

直接影响捕捞时间以及捕捞产量, 进而影响渔船产量, 通过渔船声学数据研究磷虾集群信息有助于未来提高捕捞效率。同时大范围、长时间的磷虾声学数据也可以用来研究磷虾随海流的运动模式, 同时结合作业海域的环境数据, 研究磷虾渔场的形成机制。

#### 参考文献:

- [1] Laws R M. Seals and whales of the Southern ocean[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1977, 279(963): 81-96.
- [2] Nicol S, Clarke J, Romaine S J, et al. Krill (*Euphausia superba*) abundance and Adélie penguin (*Pygoscelis adeliae*) breeding performance in the waters off the Béchervaise Island colony, East Antarctica in 2 years with contrasting ecological conditions[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, 55(3-4): 540-557.
- [3] Ross R M, Quetin L B, Haberman K L. Interannual and seasonal variability in short-term grazing impact of *Euphausia superba* in nearshore and offshore waters west of the Antarctic Peninsula[J]. Journal of Marine Systems, 1998, 17(1-4): 261-273.
- [4] Bernard K S, Steinberg D K, Schofield O M E. Summer-time grazing impact of the dominant macrozooplankton off the Western Antarctic Peninsula[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2012, 62: 111-122.
- [5] Astheimer H. A length class model of the population dynamics of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana)[J]. Polar Biology, 1986, 6(4): 227-232.
- [6] Ikeda T, Dixon P, Kirkwood J. Laboratory observations of moulting, growth and maturation in Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana)[J]. Polar Biology, 1985, 4(1): 1-8.
- [7] Miller D G M. Variation in body length measurement of *Euphausia superba* Dana[J]. Polar Biology, 1983, 2(1): 17-20.
- [8] Gullard J. The development of the resources of the Antarctic seas[J]. In Antarctic Ecology, 1970(1): 217-223.
- [9] Laws R M. The ecology of the Southern ocean[J]. American Scientist, 1985, 73(1): 26-40.
- [10] Clark A. Energy flow in the Southern Ocean food web[M]//Siegfried W R, Condy P R, Laws R M. Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs. Berlin Heidelberg:

- Springer, 1985: 573-580.
- [11] Brinton E, Townsend A W. Regional relationships between development and growth in larvae of Antarctic krill, *Euphausia superba*, from field samples[J]. Journal of Crustacean Biology, 1984, 4(5): 224-246.
- [12] Voronina N M. Comparative abundance and distribution of major filter-feeders in the Antarctic pelagic zone[J]. Journal of Marine Systems, 1998, 17(1-4): 375-390.
- [13] Allen K R. Relation between production and biomass[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1971, 28(10): 1573-1581.
- [14] Smith W O Jr, Nelson D M. Importance of ice edge phytoplankton production in the Southern ocean[J]. BioScience, 1986, 36(4): 251-257.
- [15] Kanda K, Takagi K, Seki Y. Movement of the larger swarms of Antarctic krill *Euphausia superba* population off Enderby land during 1976-1977 season[J]. Journal of the Tokyo University of Fisheries, 1982, 68: 25-42.
- [16] Hewes C D, Holm-Hansen O, Sakshaug E. Alternate carbon pathways at lower trophic levels in the Antarctic food web[M]//Siegfried W R, Condy P R, Laws R M. Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs. Berlin Heidelberg: Springer, 1985: 277-283.
- [17] Ross R M, Quetin L B. *Euphausia superba*: A critical review of estimates of annual production[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry, 1988, 90(3): 499-505.
- [18] Ettershank G. A new approach to the assessment of longevity in the Antarctic krill *Euphausia superba*[J]. Journal of Crustacean Biology, 1984, 4(5): 295-305.
- [19] Everson I, Bone D G. Effectiveness of the RMT8 system for sampling krill (*Euphausia superba*) swarms[J]. Polar Biology, 1986, 6(2): 83-90.
- [20] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, *et al.* A re-appraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2009, 56(5): 727-740.
- [21] Hampton I. Preliminary report on the FIBEX acoustic work to estimate the abundance of *Euphausia superba*[R]. Memoirs of National Institute of Polar Research, 1983, 27: 165-175.
- [22] Hewitt R P, Watkins J, Naganobu M, *et al.* 2004. Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2004, 51(12-13): 1215-1236.
- [23] Greene C H, Stanton T K, Wiebe P H, *et al.* Acoustic estimates of Antarctic krill[J]. Nature, 1991, 349(6305): 110.
- [24] Foote K G, Everson I, Watkins J L, *et al.* Target strengths of Antarctic krill (*Euphausia superba*) at 38 and 120 kHz[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 87(1): 16-24.
- [25] Hewitt R P, Demer D A. Krill abundance[J]. Nature, 1991, 353(6342): 310.
- [26] Pauly T, Penrose J D. Laboratory target strength measurements of free-swimming Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(6): 3268-3280.
- [27] Demer D A, Soule M A, Hewitt R P. A multiple-frequency method for potentially improving the accuracy and precision of *in situ* target strength measurements[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 105(4): 2359-2376.
- [28] Demer D A, Martin L V. Zooplankton target strength: Volumetric or areal dependence?[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 98(2): 1111-1118.
- [29] Chu D Z, Foote K G, Stanton T K. Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz: Comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(5): 2985-2988.
- [30] Demer D A, Conti S G. Reconciling theoretical versus empirical target strengths of krill: Effects of phase variability on the distorted-wave Born approximation[J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(2): 429-434.
- [31] De Rosny J, Roux P. Multiple scattering in a reflecting cavity: Application to fish counting in a tank[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2001, 109(6): 2587-2597.
- [32] Demer D A, Conti S G. Validation of the stochastic distorted-wave Born approximation model with broad bandwidth total target strength measurements of Antarctic krill[J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(3): 625-635.
- [33] Demer D A, Conti S G, De Rosny J, *et al.* Absolute measurements of total target strength from reverberation

- in a cavity[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(3): 1387-1394.
- [34] Reiss C S, Cossio A M, Loeb V, *et al.* Variations in the biomass of Antarctic krill (*Euphausia superba*) around the South Shetland Islands, 1996-2006[J]. ICES Journal of Marine Science, 2008, 65(4): 497-508.
- [35] McQuinn I H, Dion M, Pierre J F S. The acoustic multi-frequency classification of two sympatric euphausiid species (*Meganyctiphanes norvegica* and *Thysanoessa raschii*), with empirical and SDWBA model validation[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(3): 636-649.
- [36] Fielding S, Watkins J L, Trathan P N, *et al.* Interannual variability in Antarctic krill (*Euphausia superba*) density at South Georgia, Southern Ocean: 1997-2013[J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71(9): 2578-2588.
- [37] Madureira L S P, Ward P, Atkinson A. Differences in backscattering strength determined at 120 and 38 kHz for three species of Antarctic macroplankton[J]. Marine Ecology Progress Series, 1993, 93: 17-24.
- [38] Watkins J L, Brierley A S. Verification of the acoustic techniques used to identify Antarctic krill[J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(6): 1326-1336.
- [39] Siegel V. Review of length-weight relationships for Antarctic krill[R]. Selected Scientific Papers, SC-CAMLR-SSP/9. Germany: CCAMLR, 1992: 145-155.
- [40] 朱国平. 南极磷虾种群生物学研究进展I—年龄、生长与死亡[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5): 862-868.
- Zhu G P. Population biology of Antarctic krill *Euphausia superba*. I-Age, growth and mortality[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(5): 862-868(in Chinese).
- [41] SC-CAMLR. Report of the Thirty-third Meeting of the Scientific Committee[R]. Australia, CCAMLR, 2014: 130. <https://www.ccamlr.org/en/sc-camlr-xxxiii>.
- [42] Fedoulov P P, Murphy E, Shulgovsky K E. Environment-krill relations in the South Georgia marine ecosystem[J]. CCAMLR Science, 1996, 3: 13-30.
- [43] 朱国平, 王芮. 南极磷虾渔业CPUE及其丰度估算适用性[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1072-1079.
- Zhu G P, Wang R. Catch per unit effort of Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery and its suitability to abundance estimation[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1072-1079(in Chinese).



## Methods for biomass estimation of Antarctic krill (*Euphausia superba*): a review

XU Liuxiong<sup>1,2,3</sup>, WANG Teng<sup>1</sup>, ZHU Guoping<sup>1,2,3</sup>, TONG Jianfeng<sup>1,2,3\*</sup>

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

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

3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Antarctic krill (*Euphausia superba*) is a key species in the Antarctic marine food web, which plays an important role in the southern ocean pelagic ecosystem. History of krill research has 90 years, the information of biomass and its distribution has been the focus of krill research, and the study methods have constantly been developed. From the early zooplankton dry weight method, then replaced by the conversion factors of production to biomass method (consumption of predators, primary production, larval abundance of krill), nets sample method, and now widely used acoustic method. This review analyses the advantages and disadvantages of each method, puts forward some suggestions for improvement of the current acoustic biomass assessment method from the five aspects of in-situ measurement of krill target strength model parameters, krill detection from the acoustic data, calculation of the krill nautical area scattering coefficients, correction of the krill fishery CPUE based on fishing vessel acoustic data, study on the krill swarm and fishery ground based on fishing vessel acoustic data which could provide a scientific basis for our country's Antarctic krill biological resources development and management.

**Key words:** *Euphausia superba*; biomass estimation; acoustic

**Corresponding author:** TONG Jianfeng. E-mail: jftong@shou.edu.cn

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (41606210, 41776185); Exploitation and Utilization of Antarctic Marine Resources of the Ministry of Agriculture of China (D8002-16-8007-2); National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2013BAD13B03); Shanghai Ocean University Scientific and Technological Special Fund (A2020300100215)