

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20170420001

http://www.yykxjz.cn/

刘慧, 蔡碧莹. 水产养殖容量研究进展及应用. 渔业科学进展, 2018, 39(3): 158-166

Liu H, Cai BY. Advance in research and application on aquaculture carrying capacity. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(3): 158-166

# 水产养殖容量研究进展及应用\*

刘 慧<sup>1①</sup> 蔡碧莹<sup>1,2</sup>

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071; 2. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306)

**摘要** 近 30 年来, 全球水产养殖产量以接近 9% 的年增长率持续增长。快速发展的水产养殖业在保障世界粮食供应的同时, 也带来环境污染和生物多样性下降等一系列生态环境问题, 引起国际社会的广泛关注。水产养殖的资源和环境承载力, 即养殖容量与生态容量问题, 已成为水产养殖业可持续发展中迫切需要解决的问题。本文概述了水产养殖容量和环境容量概念的起源及其发展, 列举了养殖容量研究的代表性成果, 分析了养殖容量的估算方法及养殖容量模型的发展历程, 并探讨了其存在问题以及在水产养殖管理中的应用前景, 以期推动以养殖容量评估为基础的水产养殖区规划。水产养殖容量的科学评估与综合应用, 可在一定程度上解决制约水产养殖业可持续发展的生态环境问题, 并为建立基于生态系统的水产养殖管理与空间规划提供科学依据。

**关键词** 养殖容量; 环境容纳量; 水产养殖; 养殖区规划

**中图分类号** S9-0 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2018)03-0158-09

根据联合国粮农组织最新渔业统计数据(FAO, 2014), 在 1980~2012 年间, 全球水产养殖总产量年增长 8.6%。水产养殖业为社会经济的发展和满足人类对优质蛋白的需求做出了重要贡献。但是, 产业发展中也面临许多严峻的挑战。一些地区水产养殖业的发展由于缺乏科学的规划和管理, 生态和经济问题较为突出, 如病害肆虐、超负荷养殖、污染严重和养殖企业亏损等(董双林等, 1998)。为保障产品质量, 促进养殖业健康和稳定发展, 同时高效低耗地开展水产养殖活动, 以养殖容纳量为基础的空间规划与管理极为重要。水产养殖容纳量不仅作为水产养殖生态学研究的一个基本问题备受关注, 也成为海洋生物资源可持续利用中的关键问题(唐启升, 1996)。本文对养殖容量及环境容量概念的发展、国内外养殖容量评估方法以及应用较为广泛的养殖容量模型等进行梳理和

归纳, 并对相关研究工作的应用前景进行阐述, 以期强化水产养殖的科学管理提供一些思路。

## 1 养殖容量定义

一般认为养殖容量(Aquaculture carrying capacity)的概念源自生态学中的一个术语, 即容纳量(Carrying capacity)。容纳量也称负载量、承载力等, 指在一个时期内, 在特定的环境条件下, 生态系统所能支持的一个特定生物种群的有限大小。它也是表达种群生产力大小的一个重要指标(唐启升, 1996), 其概念来源于种群生态学的 Logistic 方程, 即:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \cdot \frac{(K - N)}{K}$$

该方程是一种具有密度效应的种群连续增长模型,  $r$  和  $k$  两个参数有着重要的生物学意义。式中,

\* 科技部国际创新合作专项“基于生态系统的水产养殖空间规划研究”(2016YFE0112600)资助 [This work was supported by the Key Programme for International Cooperation on Scientific and Technological Innovation, Ministry of Science and Technology (2016YFE0112600)]

① 通讯作者: 刘 慧, 研究员, E-mail: liuhui@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2017-04-20, 收修改稿日期: 2017-05-16

$N$  为种群个体数量,  $r$  为种群的瞬时增长率,  $K$  为环境允许的最大种群值。种群 Logistic 方程产生于 1838 年, 并完善于 20 世纪 20 年代, 但直到 1934 年 Errington 才首次使用容纳量这一术语(Kashiwai, 1995)。

根据容纳量的概念, Caver 等(1990)将贝类养殖容量定义为: 对生产率不产生负面影响并获得最大产量的放养密度。杨红生等(1999)提出, 养殖海区对养殖贝类的负荷力是在充分利用该海区的供饵力和自净能力的基础上, 贝类养殖群体所能维持的最大现存量。这一概念把浅海贝类养殖业的经济、生态效益统一了起来, 使养殖容量的概念进一步发展。李德尚等(1989)认为, 水库中投饵网箱养鱼的养殖容量是在保持水质基本正常(符合养鱼水质标准)的前提下, 单位水面(亩)所能负载的最大投饵网箱养鱼量(网箱养鱼的鱼产量或标准产量的投饵网箱面积)。该定义在国内首次考虑了水域的理化环境因素的影响, 对于容纳量概念的发展具有积极意义, 但概念中并未考虑沉积

物等造成的生态影响, 有一定局限性。董双林等(1998)把养殖容量定义为: 单位水体内在保护环境、节约资源和保证应有效益的各方面都符合可持续发展要求的最大养殖量。该定义增加了经济方面的考虑, 并第一次在养殖容量中引入可持续发展的概念。刘剑昭等(2000)考虑到养殖水体的不同, 将养殖容量定义为: 单位水体养殖对象在不危害环境, 保持生态系统相对稳定、保证经济效益最大, 并且符合可持续发展要求条件的最大产量; 这个概念中进一步增加了对“生态系统稳定”的关注, 初步将养殖容量与生态系统结构与功能联系起来。对于一些封闭性养殖、排污较少的水体应以取得养殖的最大可持续效益为主; 而对于一些开放性水域, 则侧重考虑养殖的生态影响, 以养殖的可持续性为标准。

Inglis 等(2000)将贝类的养殖容纳量划分为四种类型, 包括物理容量、养殖容量、生态容量和社会容量(表 1)。

表 1 养殖容量的分类

Tab.1 Classification of aquaculture carrying capacity (Inglis *et al*, 2000; McKindsey *et al*, 2006)

类型	概念	关键影响因素
物理容量	在适于养殖的物理空间所能容纳的最大生物数量	取决于满足生物生长、生存所必需的自然条件(如底质、水文、温度、盐度、溶氧等)
养殖容量	产量最大时的养殖密度	取决于物理养殖容量和养殖技术, 而容量估算与初级生产力及有机悬浮颗粒物浓度等密切相关
生态容量	对生态系统无显著影响的最大养殖密度	取决于生态系统功能, 要考虑整个生态系统和养殖活动的全过程(包括苗种的采集、生长、收获及加工过程)
社会容量	包含以上 3 个层次的基础上, 兼顾社会经济因素, 对人类生活无显著负面影响的养殖密度	取决于社会对养殖活动的认知和接受度

随着养殖容量研究的不断深入, 逐步认识到养殖容量是一个包含环境、生态、资源、经济和社会等多种因素的综合概念。目前, 对于养殖容量概念的讨论主要针对养殖模式、养殖条件和养殖品种等方面, 不仅如此, 生态资源容量、养殖技术和经验、市场需求等几方面因素对养殖容量都有一定影响, 并通过其各自的规范及标准对如何定义养殖容量提出了更加全面的要求(王振丽等, 2003)。近年来, 养殖水域的污染不断加重, 赤潮灾害频发, 养殖产品的质量安全受到越来越多的威胁。考虑到多方面的因素, 作者将养殖容量的定义为: 在充分利用水域的供饵能力、自净能力, 同时确保养殖产品符合食品安全标准的前提下, 能维持水域生态系统相对稳定的最大养殖量。这个定义兼顾水产养殖的经济、社会和生态效益, 强调了养殖活动的可持续发展和养殖产品质量安全。

从养殖容量概念的发展可以看出, 学者们所关心的主要是养殖生态系统的承载力, 同时又追求最大的

经济效益, 即最大的养殖产量或放养密度。李德尚等(1994)对水库投饵网箱养鱼的负荷力研究(表 2), 方建光等(1996a、b)对桑沟湾海带和栉孔扇贝养殖容量的研究(表 2), 取得了突破性成果; 但这些研究中没有考虑生态系统的容量, 只是以最大养殖量或养殖水质为研究对象, 而缺乏养殖活动对整个生态系统影响的研究, 存在一定的局限性。随着全球水产养殖业的发展, 许多养殖海区已由自然生态系统转化为人工或半人工的生态系统, 养殖产生的污染越来越严重, 野生水生生物基本消失。这些问题促使我们愈加关注养殖活动对生态系统的影响, 有必要从生态保护角度重新定义养殖容量, 使其更加符合可持续发展的理念和要求。

## 2 环境容量定义

环境容量(辞海, 1979)是“自然环境或环境要素(如水、空气、土壤和生物等)对污染物质的承受量或

负荷量。环境中污染物浓度低于这一数值,人类和生物能耐受适应,不致发生病害;污染物浓度高于这一数值,人类和生物就不能适应,并将发生病害”。

联合国海洋污染专家小组(GESAMP)在1986年对海洋环境容量的概念进行了正式的定义:环境容量是环境的特性,在不造成环境不可承受的的前提下,环境所能容纳某物质的能力。这个概念包含了三层含义:

(1) 在海洋环境中存在的污染物只要不超过一定的限量就不会对海洋环境造成影响;

(2) 在不影响生态系统特定功能的前提下,任何环境对于污染物都有有限的容纳量;

(3) 环境容量可以量化。

董双林等(1998)指出,环境容量与特定区域或污染物的类别相关联,如海洋环境容量,即某一特定海域所能容纳的污染物的最大负荷量。在Inglis等(2000)所划分的四个层级的贝类养殖容量中(表1),生态容量与环境容量的概念最为接近。

从生态学角度理解,水产养殖(环境)容量不可能是常数,而是随着养殖技术、养殖品种和养殖方式及时间或自然条件等诸多因素不断变化的函数。因此,应该平衡海域的物理、化学、生物等生态环境的负载能力,建立一种科学确定养殖环境容量的方法。要确定水产养殖环境容量,首先需要考虑海域环境以及养殖生产本身的可持续性,根据特定水域的水动力条件,从生态保护的角度综合考虑该海域的物理、化学、生物特征要素,计算海域的可利用环境容量(蔡惠文等,2009)。

在市场经济条件下,养殖生产还需要考虑经济效益这一层面,同时还需考虑经济和环境协调发展等多方面的问题。为了综合分析养殖环境影响和经济效益,不仅要考虑养殖代谢废物对海洋生态系统的影响,也要考虑到其对养殖业经济效益等其他社会因素的影响,例如,Rabassó等(2015)建立了Bioeconomic模型等。

目前,我国海洋经济快速发展、各种海洋产业在沿海集聚(中国科学院,2014)。考虑到这一实际情况,某一海域的养殖环境容量并不是一个孤立的概念,而是与其他海洋产业(如港口航运、临海工业、海洋旅游业等)密切相关,存在着与使用同一片海域的产业之间的协调和优化问题。从这个层面上来讲,养殖环境容量的确定应该纳入海岸带综合管理,在海洋功能区划确定的养殖区内,养殖区环境容量需要依据海域的环境标准和养殖生物生态特征共同确定(蔡惠文等,2009)。

### 3 养殖容纳量研究及其评估模型的发展

#### 3.1 估算养殖容量的方法

**3.1.1 经验研究法** 根据历年的养殖面积、放养密度、产量以及环境因子的监测数据等推算出养殖容量。Verhagen(1986)通过对历年来法国 Oosterschelde 河口同年龄组贻贝(*Mytilus edulis*)的产量统计,研究了该水域的贝类养殖容量。此外,Grizzle等(1989)以浮游生物水平分布和海区底部沉积物的特性,估算硬壳蛤(*Mercenaria mercenaria*)养殖容量。徐汉祥等(2005)根据对舟山海区27处深水网箱拟养区域的环境调查,估算了深水网箱的养殖容量。这种利用历年产量间的关系或环境条件对养殖容量进行估算的方法,得出的结果往往是一个经验数值;而且由于水质、环境因子及可能的生物过程的计算欠缺,导致养殖容量的计算结果存在很大的偏差。

**3.1.2 瞬时增长率法** 根据Logistic生长方程对种群增长与容量的关系进行估算。当瞬时增长率 $r=0$ 时,环境容量 $K$ 出现最大值。早在1981年,Hepher等(1981)就采用了此方法估算了养殖最大载鱼量。Officer等(1982)建立了浮游植物在底栖贝类摄食压力下的瞬时生长模型,用于估算贝类的养殖容量。这种方法只考虑生物个体生长,忽略了理化环境、生态条件等因素,估算的养殖容量不够准确,存在一定缺陷。

**3.1.3 能量收支法** 动态能量收支(DEB)模型已广泛应用于双壳贝类养殖区的养殖容量评估(Bourlès et al, 2009),它主要通过测定单个生物体在生长过程中所需能量,并在此基础上估算养殖实验区的初级生产力或供饵力所能提供给养殖生物生长的总能量,建立养殖生物的养殖容量模型。Caver等(1990)在加拿大的怀特海芬(Whitehaven)港通过对颗粒有机物的能量收支研究求得贻贝的养殖容量;方建光等(1996b)采用无机氮作为关键因子,通过无机氮的供需平衡估算桑沟湾海带的养殖容量,同年通过栉孔扇贝对有机碳的需求量估算桑沟湾的扇贝养殖容量,得出经验公式(表2)。这种能量收支方法只考虑环境对养殖生物的影响,忽视了在养殖活动中养殖生物自身产生的污染对环境的影响(杨红生等,1999),以及养殖废物在养殖系统中的再循环,所估算的养殖容量不够准确。

**3.1.4 营养动力学方法** 全球海洋生态系统动力学(GLOBEC)是海洋生态系统研究历史上的飞跃,为探索全球海洋生物资源可持续开发利用的依据,在Polorina生态通道模型基础上,对生态通道II及相应的计算机软件进行深入开发,综合100多个营养模型建立了全球模型,以此估算全球海洋承载力。生态通

道 II 模型以营养动力学为理论依据,从物质平衡角度估算不同营养层次的生物量,即从初级生产者逐次向顶级捕食者估算容纳量(唐启升, 1996)。以这种方法建立的养殖容量模型即为营养动态模型。Parsons 等(1973)运用营养动态模型估算生态系统中不同营养层次的生物量,模型表达为:

$$P=B \times E^n$$

式中,  $P$  为估算对象生物量,  $B$  为浮游植物生产力,  $E$  为生态效率,  $n$  为估算对象的营养级。

营养动力学方法的一个特例是水产养殖系统生态通道模型(Aquaculture Ecopath Model)。它可以以快照(Snapshot)的方式反映某一特定养殖生态系统在某一时期的实时状态、特征及营养关系;以此为基础,假设要提高某一功能群(水产养殖种类)的生物量,就需要调整其他参数使系统重新平衡,在反复迭代运算的过程中来确定养殖种类的养殖容量(Byron *et al.*, 2011)。生态动力学模型立足于环境、生态的宏观角度,以维持生态环境平衡为前提,估算海区的某种养殖品种的养殖容量及该海区的总养殖容量,具有较高的可行性和可信度(贾后磊等, 2002)。

**3.1.5 生态系统动力学方法** Dame 等(1998)认为,决定贝类(养殖)生态容量的要素是代表海区生态特征的 3 个时间,即水团停留时间(即水交换周期)、初级生产时间和贝类滤清时间;前 2 个时间越短,则贝类养殖容量越高。以这 3 个时间为重要变量的 Herman 模型(Herman, 1993)通过模拟物理环境、生产者和消费者之间的关系,对以滤食性贝类为优势种的海区养殖容量进行评估,并且认为水交换是决定单位面积贝类产量的主要因素。Heip 等(1995)通过对个体、区域和生态系统水平的营养动力学研究发现,物理过程决定了区域或者养殖场规模的(野生及养殖)贝类的养殖容量,而初级生产力则决定其生态系统水平的容量(表 2)。Ibarra 等(2014)综合贝类个体生长模型、浮游生物生长模型和海区生态系统模型(ROMS)建立了一个生态系统模型,可用于研究贝类养殖的环境影

响及养殖容量。

### 3.2 养殖容量模型的发展

准确估算海区的养殖容量,对于指导水产养殖生产,保证最大养殖产出和养殖业的可持续发展有着非常重要的意义。通过数值模型这一研究手段对海区养殖容量进行评估,可以将复杂的生态系统中的各个变量及过程联系起来,从而在养殖规划及管理过程中发挥重要的作用。

在养殖容量模型研究初期,大多数模型是基于单个养殖物种的个体生长情况,考虑物质和能量收支平衡而建立的。在中国,方建光等(1996b)首次采用了无机氮的供需平衡对桑沟湾的海带养殖容量进行了调查研究,其概念模型如图 1 所示。后期,卢振彬等(2007)又采用无机磷供需平衡法估算海带养殖容量。滤食性贝类养殖容量通常也采用能量收支方法评估。因贝类摄食生长主要靠天然饵料,滤食性贝类养殖容量与初级生产力及有机悬浮颗粒物的浓度等密切相关(Carver *et al.*, 1990; Bacher *et al.*, 1997、2003)。悬浮式养殖的贝类可以从周围的水体中摄取颗粒物作为食物,同时也受水体中颗粒食物浓度的制约,因此,颗粒食物的消耗与再生的平衡就是悬浮式贝类养殖容量模型建立的基础(Grant, 1996; Wildish *et al.*, 1997)。底播养殖与筏式养殖的根本区别是水交换不同,使养殖生物产生的代谢废物等一些污染物对贝类产生影响更为显著,进而影响底播的养殖容量。例如, Dame 等(1998)利用食物限制性指标对开放式水域底播贝类的养殖容量进行了评估。

随着数值模型的发展,容量评估模型加入了物理和生物子模块,其中,物理模块用来计算颗粒物和溶解态营养盐的输运,生物模块用来模拟贝类的摄食和生长。不同模型虽然采用的变量不同,算法上也有差异,但基本上是利用箱式模型,把整个生态系统看作是垂直方向上均匀分布,研究区域划分成若干个箱,计算相邻箱子之间颗粒物和溶解态物质的输运(史洁

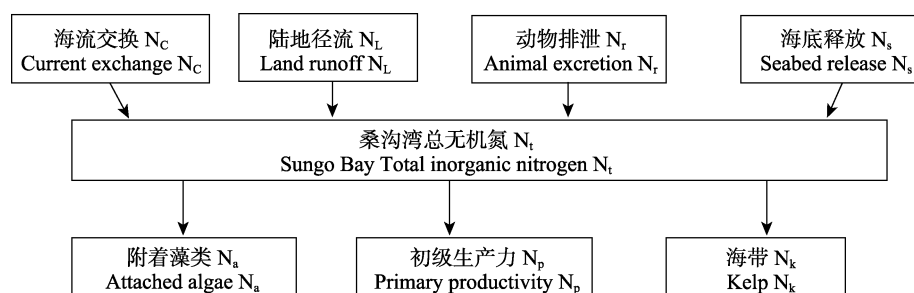


图 1 桑沟湾海带养殖容量的概念模型(方建光等, 1996b)

Fig.1 The conceptual model of kelp carrying capacity in Sungo Bay (Fang *et al.*, 1996b)

等, 2009)。Raillard 等(1994)采用箱式模型估算了牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 获得最大产出时的播苗密度, 强调了物理过程作为一个关键要素影响养殖容量。

随着对养殖生态系统环境要素的了解也逐步加深, 养殖容量在算法上逐渐将养殖物种和养殖区的物理、生物和化学环境耦合起来, 不仅考虑养殖生物受到的物理环境影响, 而且愈加重视养殖生物的反馈机制以及不同养殖生物之间的关系, 以此估算多元养殖和多营养层次综合养殖的容量。Nunes 等(2003)建立的零维贝藻混养生态系统模型, 结合了海湾生态模型与扇贝和牡蛎个体生长模型。这一模型结合贝类个体和种群生长特征, 通过模拟不同播苗密度下相应的贝类产量, 以及不同混养方式对海区生态系统的影响来确定养殖容量。

水动力是影响海区营养盐供应的重要因素, 养殖设施阻力等因素也会通过影响水动力进而限制养殖区营养盐的补充。史洁等(2010)在建立了桑沟湾的水动力 POM 模型(Princeton Ocean Model)基础上加入了

养殖活动的影响, 将海表养殖设施及水体中海带的阻力分别进行参数化, 模拟不同养殖密度条件下养殖区水动力情况, 通过改变三维模型中的密度参数, 确定了最高的养殖产量, 对于海区养殖布局和规划有着实际的参考意义。

在长期的养殖过程中, 养殖生物产生的生物性沉积物及残饵会聚积在海底, 可在一定程度上对底质环境及底栖生物产生负面影响(张继红等, 2011)。Ervik 等(1997)为监测网箱周围的沉积环境状况提出的 MOM 模型(Monitoring Ongrowing Fish Farms Modelling)和 Henderson 等(2001)建立的 DEPOMOD 模型均属于底质污染评估类模型。DEPOMOD 模型(图 2)根据颗粒物沉降轨迹依赖于水动力学特性, 模拟贝类养殖区有机物沉降过程, 定量描述沉降通量与底栖群落的反馈关系, 预测不同密度养殖贝类对底栖生物群落结构的影响, 能够在一定程度上对养殖容量进行量化描述。模型适用于贝类筏式养殖系统, 但不适用于底播养殖的贝类养殖容量评估。

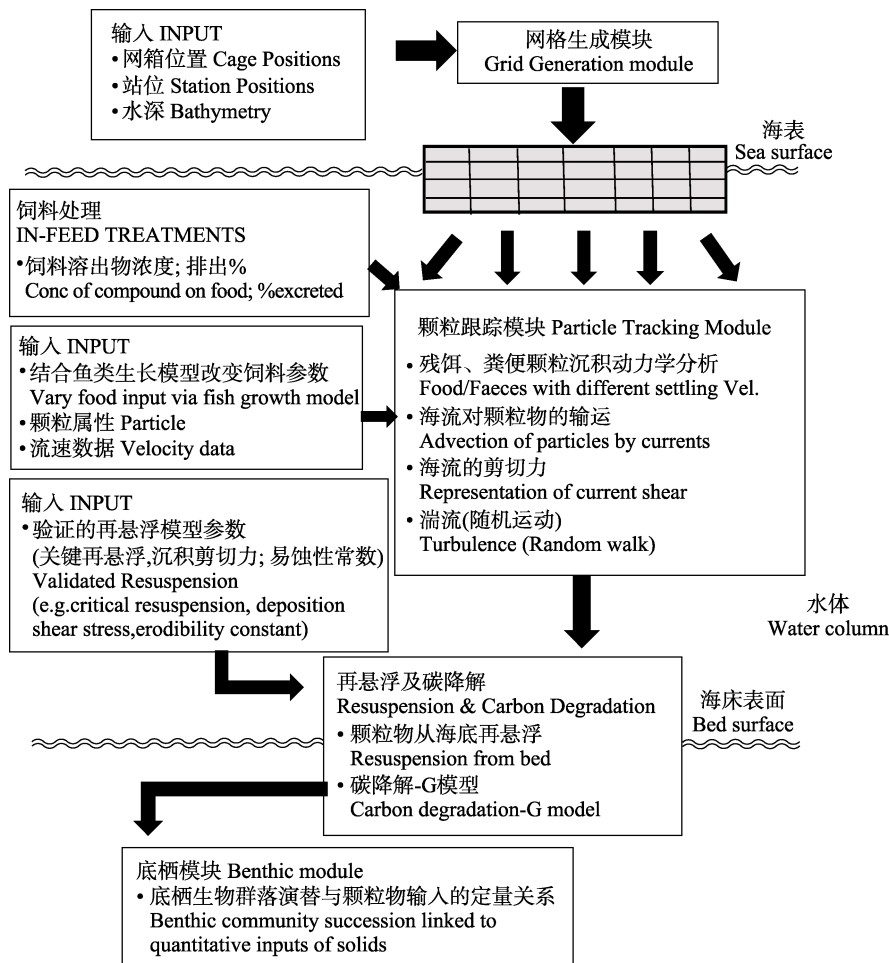


图 2 DEPOMOD 模型简要示意图

Fig.2 A brief schematic map of DEPOMOD model

目前, 国际上的发展趋势是应用水产养殖容量评估技术解决水产养殖管理问题, 即将水产养殖容量模型与地理信息系统相结合, 对水产养殖区的适宜性或者对现有养殖布局的合理性进行评价, 并以此作为发展水产养殖业和颁发养殖许可证的依据。一些国家已建立了一些基于单机版或者网络的养殖规划软件和养殖容量评估软件, 包括挪威的 AKvaVis (Ervik *et al.*, 2008) 和德国的 CBA(Cost Benefit Analysis) 工作平台 (Gimpel *et al.*, 2015)。这些软件既考虑到养殖场的养殖容量、养殖活动对环境的压力, 又考虑到各种水域使用冲突情况, 可以辅助养殖场选址和优化布局, 已经在养殖容量评估中得到初步应用。FARM 模型 (Ferreira *et al.*, 2008) 是养殖容量评估工具中开发较早的 (图 3), 已成功应用于水产养殖资源管理和多种不同类型的养殖场的评估 (Ferreira *et al.*, 2007; Cubillo *et al.*, 2016), 具有操作简单、所需数据易获取的优点。FARM 模型不仅可以利用简单的参数如水流速度、悬

浮颗粒、营养盐和溶解氧等, 还可以对养殖规模及养殖品种选择等提供建议, 为养殖业者和政府部门管理水产养殖生产提供有效手段。

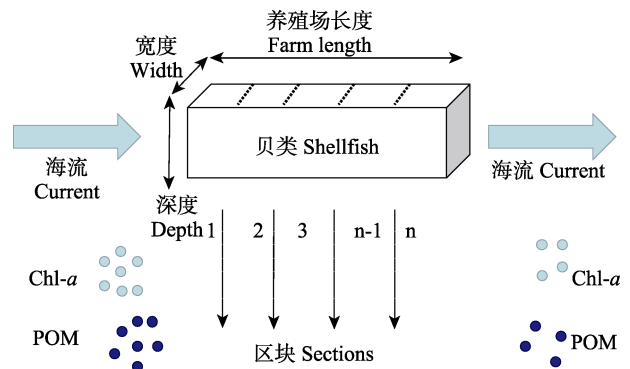


图 3 FARM 生态动力学模型框架

Fig.3 Framework of ecological dynamic model FARM

国内外主要养殖容量模型及估算方法见表 2。

表 2 养殖容量模型及其相关的养殖种类、研究方法及公式  
Tab.2 Main species, methods and equations of aquaculture carrying capacity

种类 Species	养殖区 Area	研究方法 Research method	公式 Equation	参考文献 Reference
栉孔扇贝	山东桑沟湾	能量收支	$CC = \frac{P - k \times \text{Chl-a} \sum_j^M (FR_{Fj} \times B_j)}{k \times \text{Chl-a} \times FR_j}$	方建光等(1996)
栉孔扇贝、 长牡蛎	山东桑沟湾	生态动力学方法	$\frac{dB}{dt} = B [p_{\max} f(I) f(N) - r_b - e_b - m_b - c_s S - c_o O]$	Nunes 等(2003)
牡蛎	厦门同安湾	COD 收支平衡法	$P = B \times E^n$	詹力扬等(2003)
文蛤	江苏启东 吕四海区滩涂	模拟实验法	$S^{2-}$ , COD, DO 几何均值污染指数比较 $M_i = \sqrt{I_{i\max} \cdot I_{i\text{平均}}} \quad I_i = \frac{C_i}{S_i}$	刘绿叶等(2007)
海带	山东桑沟湾	无机氮供需平衡法	$P_T = N_K / K_1$ 流速不同: $\Delta P = \frac{Nc}{k_2 \times s} \times \frac{(v - \bar{v})}{\bar{v}}$	方建光等(1996)
建鲤	山东东周水库	现场围隔实验法	$SI = (Yn \cdot \Delta W \cdot K)^{\frac{1}{3}}$	李德尚等(1994)
滤食性贝类	综合全球 21 个海湾	生态系统方法	$B_{ff} = \frac{(\mu - m)}{Cl_{ff}} + \left( \frac{P_e - P}{P \times Cl_{ff}} \right) \times \frac{1}{RT}$	Dame 等(1998) Heip 等(1995)

#### 4 养殖容量在水产养殖规划中的应用前景

一般而言, 养殖区规划需要综合考虑水域面积、地形地貌、水深分布、水质底质以及潮流、波浪等水文环境, 同时还应考虑养殖管理的便利性、对海区生态环境的影响与其他用海项目的利益关系等多方面因素 (桂福坤等, 2011)。应基于上述要素的综合评判, 结合海区功能、养殖规模等要求, 全面考虑生态因素

和社会经济因素的影响, 综合规划养殖设施的布局与规模。在建立大规模养殖场之前, 必须对水域承载力进行评估, 才能保证养殖生物获得适宜的生长条件、食物供应, 且避免或减少生态影响 (Ferreira *et al.*, 2008)。

养殖容量评估是水产养殖空间规划的核心。国内外专家对于养殖容量的评估主要根据养殖区环境特征、养殖品种和养殖方式等方面进行研究, 已经建立多种生态模型并在养殖海区规划中得到应用。生态模

型的构建有助于阐明养殖生态系统动态变化的过程和机理,对于科学合理地确定合适的苗种投放种类、投放时间、投放密度、营养物质的利用效率等具有重要的指导意义,最终为适应性管理决策提供科学基础(Ren *et al.*, 2012)。依据养殖容量来指导养殖生产和规划工作,将为我国水产养殖区科学规划提供一种新的思路。

目前,养殖规划技术的发展趋势是结合 GIS(地理信息系统)技术,将养殖容量和养殖生态学模型与养殖生物个体生长模型相结合,为养殖规划管理提供对策和建议。

## 5 总结和展望

养殖容量概念发展的趋势是从单一追求“最大效益”,发展到兼顾经济效益和生态效益的养殖容量,和以实现养殖产业可持续发展为目的的养殖容量。这一趋势体现出水产养殖生态学所关注的内容在逐步扩展,从养殖品种本身到水环境、经济和社会效益、乃至整个生态系统。

在过去二三十年间,养殖容纳量的估算方法随着研究内容的充实和数值模型的广泛应用得到不断的改进和提升。随着养殖技术的成熟、多营养层次综合养殖的蓬勃发展,估算方法已经从经验法到瞬时生长率、能量收支到生态动力学、生态系统方法,发展到一维、二维的数值模型,进而到引入水动力计算的动态平衡模型,从单一品种的养殖模型逐步发展为多营养层次综合养殖模型。模型参数逐渐增加,对理化生要素的考量趋于全面。随着对养殖生物生理生态学认识的逐步深入,未来的养殖容量评估方法将更加细化,将融入更多的微观生态要素,而且将更好地量化养殖系统中物质和能量的流转。

养殖容量评估是指导养殖环境管理和养殖生产规划,进行养殖布局优化和结构调整,提高水产养殖综合效益的基本依据。由于养殖产量与水域生态环境变化之间存在相互制约的关系,合理的养殖区规划是关系到水产养殖业能否健康持续发展的战略问题。同时,依据养殖容量科学调整养殖布局,合理利用水域自然生产力,也有助于实现水产养殖结构调整和减量增收的目标。因此,深入开展养殖生态学和养殖容量研究,在我国现阶段具有相当的紧迫性和重要意义。

## 参 考 文 献

Bacher C, Duarte P, Ferreira JG, *et al.* Assessment and comparison of the Marennes-Oléron Bay (France) and

- Carlingford Lough (Ireland) carrying capacity with ecosystem models. *Aquatic Ecology*, 1997, 31(4): 379–394
- Bacher C, Grant J, Fang J, *et al.* Modelling the effect of food depletion on scallop growth in Sungo Bay (China). *Aquatic Living Resources*, 2003, 16(1): 10–24
- Bourles Y, Alunno-Bruscia M, Pouvreau S, *et al.* Modelling growth and reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*: Advances in the oyster-DEB model through application to a coastal pond. *Journal of Sea Research*, 2009, 62(2): 62–71
- Byron C, Link J, Costa-Pierce B, *et al.* Calculating ecological carrying capacity of shellfish aquaculture using mass-balance modeling: Narragansett Bay, Rhode Island. *Ecological Modelling*, 2011, 222(10): 1743–1755
- Cai HW, Ren YH, Sun YL, *et al.* Advances on aquaculture environmental carrying capacity research. *Marine Science Bulletin*, 2009(2): 109–115 [蔡惠文, 任永华, 孙英兰, 等. 海水养殖环境容量研究进展. *海洋通报*, 2009(2): 109–115]
- Carver CEA, Mallet AL. Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture. *Aquaculture*, 1990, 88(1): 39–53
- Chinese Academy of Sciences. Scientific issues and policy recommendations on ecosystem safety of ocean and coastal engineering in China. Beijing: Science Press, 2014 [中国科学院. 中国海洋与海岸工程生态安全中若干科学问题及对策建议. 北京: 科学出版社, 2014]
- Cubillo AM, Ferreira JG, Robinson SMC, *et al.* Role of deposit feeders in integrated multi-trophic aquaculture—A model analysis. *Aquaculture*, 2016, 453: 54–66
- Dame RF, Prins TC. Bivalve carrying capacity in coastal ecosystems. *Aquatic Ecology*, 1998, 31(4): 409–421
- Dictionary of editorial board. Cihai (II). Shanghai: Shanghai Lexicographical Press, 1979, 2579 [辞海编委会. 辞海(中). 上海: 上海辞书出版社, 1979, 2579]
- Dong SL, Li DS, Pan KH. On the carrying capacity of mariculture. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1998, 28(2): 253–258 [董双林, 李德尚, 潘克厚. 论海水养殖的养殖容量. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(2): 253–258]
- Ervik A, Agnalt AL, Asplin L, *et al.* AkvaVis-dynamisk GIS-verktøy for lokalisering av oppdrettsanlegg for nye oppdrettsarter: Miljøkrav for nye oppdrettsarter og laks. 2008
- Ervik A, Hansen, PK, Aure J, *et al.* Regulating the local environmental impact of intensive marine fish farming I. The concept of the MOM system (Modelling-Ongrowing fish farms-Monitoring). *Aquaculture*, 1997, 158(1): 85–94
- Fang JG, Kuang SH, Sun HL, *et al.* Study on the carrying capacity of Sanggou Bay for the culture of scallop *Chlamys farreri*. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 17–30 [方建光, 匡世焕, 孙慧玲, 等. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究. *海洋水产研究*, 1996a, 17(2): 17–30]
- Fang JG, Wang XZ, Assessing the carrying capacity of Sanggou Bay for culture of kelp *Laminaria japonica*. *Marine*

- Fisheries Research, 1996, 17(2): 7–17 [方建光, 王兴章. 桑沟湾海带养殖容量的研究. 海洋水产研究, 1996b, 17(2): 7–17]
- FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture. Rome, 2014
- Ferreira JG, Hawkins AJS, Bricker SB. Management of productivity, environmental effects and profitability of shellfish aquaculture—the Farm Aquaculture Resource Management (FARM) model. *Aquaculture*, 2007, 264(1–4): 160–174
- Ferreira JG, Hawkins AJS, Monteiro P, *et al.* Integrated assessment of ecosystem-scale carrying capacity in shellfish growing areas. *Aquaculture*, 2008, 275(1): 138–151
- Gimpel A, Stelzenmüller V, Grote B, *et al.* A GIS modelling framework to evaluate marine spatial planning scenarios: Co-location of offshore wind farms and aquaculture in the German EEZ. *Marine Policy*, 2015, 55: 102–115
- Grant J. The relationship of bioenergetics and the environment to the field growth of cultured bivalves. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1996, 200(1–2): 239–256
- Grizzle RE, Lutz RA. A statistical model relating horizontal seston fluxes and bottom sediment characteristics to growth of *Mercenaria mercenaria*. *Marine Biology*, 1989, 102(1): 95–105
- Gui FK, Wang P, Wu CW. A model for planning culturing sites based on responsible farming concept of nitrogen-phosphorus balance. *South China Fisheries Science*, 2011, 7(4): 69–75 [桂福坤, 王萍, 吴常文. 基于氮和磷平衡的负责任养殖模式下的养殖海区规划. 南方水产科学, 2011, 7(4): 69–75]
- Heip CHR, Goosen NK, Herman PMJ, *et al.* Production and consumption of biological particles in temperate tidal estuaries. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1995, 33: 1–149
- Henderson A, Gamito S, Karakassis I, *et al.* Use of hydrodynamic and benthic models for managing environmental impacts of marine aquaculture. *Journal of Applied Ichthyology*, 2001, 17(4): 163–172
- Hepher B, Pruginin Y. Commercial fish farming: With special reference to fish culture in Israel. New York: Wiley, 1981, 261
- Herman PMJ. A set of models to investigate the role of benthic suspension feeders in estuarine ecosystems//Bivalve Filter Feeders. Springer Berlin Heidelberg, 1993: 421–454
- Ibarra DA, Fennel K, Cullen JJ. Coupling 3-D Eulerian biophysics (ROMS) with individual-based shellfish ecophysiology (SHELL-E): A hybrid model for carrying capacity and environmental impacts of bivalve aquaculture. *Ecological Modelling*, 2014, 273(2): 63–78
- Inglis GJ, Hayden BJ, Ross AH. An overview of factors affecting the carrying capacity of coastal embayment for mussel culture. Ministry for the Environment, 2000
- Jia HL, Shu TF, Wen YM. Studies of aquacultural carrying capacity and the way of enlarging netcage carrying capacity. *Fisheries Science*, 2002, 21(6): 26–30 [贾后磊, 舒廷飞, 温琰茂. 水产养殖容量的研究及网箱养殖容量的扩大途径. 水产科学, 2002, 21(6): 26–30]
- Kashiwai M. History of carrying capacity concept as an index of ecosystem productivity. *Bulletin of the Hokkaido National Fisheries Research Institute (Japan)*, 1995
- Li DS, Xiong BX, Li Q, *et al.* Carrying capacity of reservoirs for feeding cage-culture of fish. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1994, 18(3): 223–229 [李德尚, 熊邦喜, 李琪, 等. 水库对投饵网箱养鱼的负荷力. 水生生物学报, 1994, 18(3): 223–229]
- Li DS, Xiong BX, Li Q, *et al.* Reservoir on the bait cage carrying capacity. *Reservoir Fisheries*, 1989(4): 8–11 [李德尚, 熊邦喜, 李琪, 等. 水库对投饵网箱养鱼负荷力问题的初步探讨. 水利渔业, 1989(4): 8–11]
- Liu JZ, Li DS, Dong SL. An experimental study on carrying capacity of closed semi-extensive polyculture shrimp ponds. *Marine Sciences*, 2000, 24(7): 6–10 [刘剑昭, 李德尚, 董双林. 养虾池半精养封闭式综合养殖的养殖容量实验研究. 海洋科学, 2000, 24(7): 6–10]
- Liu LY, Liu PY, Tang JH, *et al.* Study on the relationship of the *Meretrix meretrix* culture density and Sulfuret, COD, DO in laboratory. *Journal of Aquaculture*, 2007(5): 8–11 [刘绿叶, 刘培廷, 汤建华, 等. 文蛤养殖密度对主要环境因子影响的模拟研究. 水产养殖, 2007(5): 8–11]
- Lu ZB, Fang MJ, Du Q. Carrying capacity of *Porphyr*a and *Laminaria* in Dadeng Island sea area of Xiamen. *South China Fisheries Science*, 2007(4): 52–59 [卢振彬, 方民杰, 杜琦. 厦门大嶼岛海域紫菜、海带养殖容量研究. 南方水产, 2007(4): 52–59]
- McKindsey CW, Thetmeyer H, Landry T, *et al.* Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management. *Aquaculture*, 2006, 261(2): 451–462
- Nunes JP, Ferreira JG, Gazeau F, *et al.* A model for sustainable management of shellfish polyculture in coastal bays. *Aquaculture*, 2003, 219(1): 257–277
- Officer CB, Smayda TJ, Mann R. Benthic filter feeding: A natural eutrophication control. *Marine Ecology Progress Series*, 1982, 9(2): 203–210
- Parsons TR, Takahashi M. Biological oceanographic processes. New York: Pergamon Press, 1973, 186
- Rabassó M, Hernández JM. Bioeconomic analysis of the environmental impact of a marine fish farm. *Journal of Environmental Management*, 2015, 158: 24–35
- Raillard O, Ménesguen A. An ecosystem box model for estimating the carrying capacity of a macrotidal shellfish system. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 115(1–2): 117–130
- Ren JS, Stenton-Dozey J, Plew DR, *et al.* An ecosystem model for optimising production in integrated multitrophic aquaculture systems. *Ecological Modelling*, 2012, 246(1747): 34–46
- Shi J, Wei H, Zhao L, *et al.* Study on ecosystem model of multi-species culture in Sanggou Bay: III Numerical study on the kelp culture carrying capacity. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 43–52 [史洁, 魏皓, 赵亮, 等. 桑沟



- 湾多元养殖生态模型研究: III 海带养殖容量的数值研究. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 43–52]
- Shi J. Numerical study on the influences of physical processes on the aquaculture carrying capacity in a semi-enclosed bay. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2009, 16–17 [史洁. 物理过程对半封闭海湾养殖容量影响的数值研究. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2009, 16–17]
- Tang QS. On the carrying capacity and its study. Marine Fisheries Research, 1996, 17(2): 1–6 [唐启升. 关于容纳量及其研究. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 1–6]
- Verhagen JHG. Tidal motion, and the seston supply to the benthic macrofauna in the Oosterschelde. Deltares (WL), 1986
- Wang ZL, Shan HY. Thinking on the carrying capacity. Chinese Fisheries Economics, 2003(4): 42–43 [王振丽, 单红云. 关于水产养殖容量的思考. 中国渔业经济, 2003(4): 42–43]
- Wildish D, Kristmanson D. Benthic suspension feeders and flow. Cambridge University Press, New York, 1997
- Xu HX, Wang WD, Liu SZ, *et al.* Ecological environment background and carrying capacity of deep sea-cage planed-culture areas in Zhoushan. Journal of Modern Fisheries Information, 2005(1): 8–11 [徐汉祥, 王伟定, 刘士忠, 等. 舟山深水网箱拟养海区环境本底状况及养殖容量. 现代渔业信息, 2005(1): 8–11]
- Yang HS, Zhang FS. Advances of studies on carrying capacity of shallow sea for filter-feeding bivalve raft culture. Journal of Fisheries of China, 1999, 23(1): 84–90 [杨红生, 张福绥. 浅海筏式养殖系统贝类养殖容量研究进展. 水产学报, 1999, 23(1): 84–90]
- Zhan LY, Zheng AR, Chen ZF. Estimation of carrying capacity of the oyster in Xiamen Tongan Bay. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2003(5): 644–647 [詹力扬, 郑爱榕, 陈祖峰. 厦门同安湾牡蛎养殖容量的估算. 厦门大学学报(自然科学版), 2003(5): 644–647]
- Zhang JH, Ren LH, Wu T, *et al.* Assessment of the local environmental impact of abalone suspended longline culture-Application of the MOM system in Sungo Bay. Fishery Modernization, 2011, 38(1): 1–6 [张继红, 任黎华, 吴桃, 等. 筏式养鲍对沉积环境压力的评价 MOM-B 监测系统模型在桑沟湾的应用. 渔业现代化, 2011, 38(1): 1–6]

(编辑 冯小花)

## Advance in Research and Application on Aquaculture Carrying Capacity

LIU Hui<sup>1</sup>①, CAI Biying<sup>1,2</sup>

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071;

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

**Abstract** In the past thirty years, global aquaculture production continues to grow at an annual rate of nearly 9%. The rapid development of global aquaculture not only helps maintaining world food supply, but also brings environmental pollution, biodiversity decline and a series of ecological problems, causing widespread concern in the international community. The issue of aquaculture carrying capacity, that is, the carrying capacity of resource and environment for aquaculture, has become a worldwide concern and a key scientific question for sustainable aquaculture development. In this paper, evolvement of the concept of aquaculture carrying capacity and environmental carrying capacity are elucidated briefly, exemplary work on aquaculture carrying capacity are introduced, the development of assessment methods and modeling of aquaculture carrying capacity are analyzed, and its related issues and prospective application in aquaculture governance are discussed in order to promote carrying capacity-based aquaculture spatial planning. Scientific evaluation and comprehensive application of aquaculture carrying capacity may solve the environmental problems constraining the sustainable development of mariculture to a certain degree, and may provide scientific basis for ecosystem-based aquaculture spatial planning and governance.

**Key words** Carrying capacity; Aquaculture environmental carrying capacity; Aquaculture; Aquaculture spatial planning

① Corresponding author: LIU Hui, E-mail: liuhui@ysfri.ac.cn