

海水养殖容量评估方法及在养殖管理上的应用

张继红, 蔺凡, 方建光

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东青岛 266071)

摘要: 随着海水养殖规模的增大, 超负荷养殖使得养殖水环境遭到严重破坏, 病害加剧, 危及养殖产业的可持续发展。亟待加强养殖容量研究, 建立科学的适应性管理对策。本文综述了国内外有关海水网箱、贝类、藻类等养殖容量研究进展、存在的问题。指出了容量评估的关键技术, 主要包括: 生态容量评估的指标体系、养殖生物个体生长数值模型、水动力过程与生态模型的耦合。分析了养殖容量研究在指导养殖密度调整、优化养殖布局、拓展养殖空间以及构建新型养殖模式中的作用。对于未来开展养殖容量研究提出了三点建议: 建立养殖水域的容量评估制度、设立近海养殖结构与养殖容量评估的长期监测实验站、设立养殖容量研究和布局与结构调整专项, 以建立生态系统水平的养殖管理策略。

关键词: 海水养殖; 容量; 管理; 模型

中图分类号: S967 **文献标识码:** A

Carrying Capacity Assessment and Its Application in Mariculture Management

Zhang Jihong, Lin Fan, Fang Jianguang

(Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: With the growing scale of the mariculture industry, the problem of storage overcapacity in aquaculture has caused serious damage to the aquatic environment and the aggravated the dangers of disease, which have hurt the sustainable development of this industry in the long term. So it is urgent to strengthen the research on carrying capacity and to set up the scientific and adaptive management strategies. This paper reviews the progress of research and existing problems relating to the mariculture industry's carrying capacity for cage, shellfish, macroalgae, etc; it also points out the key technologies behind capacity evaluation, including the index system of ecological capacity assessment, the numerical model of individual growth of cultured organisms, the coupling of hydrodynamic processes and ecological models; Furthermore, this article analyzes the role of carrying capacity in determining the current population density of maricultural farms and optimizing the layout of the mariculture operations, expanding the maricultural farming space and building a new mode of maricultural farming. And then, this paper advanced three suggestions for developing a capacity evaluation system in aquaculture waters, including establishing the long-term monitoring experimental station of the offshore aquaculture structure, culture capacity assessment, setting up research initiatives for aquaculture capacity research, and identifying the layout and structural adjustment for establishing an ecosystem management strategy.

Key words: mariculture; carrying capacity; management; model

收稿日期: 2016-04-20; 修回日期: 2016-05-16

作者简介: 张继红, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 研究员, 研究方向为海洋健康养殖模式与技术研究; E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

基金项目: 中国工程院重点咨询项目“现代海水养殖新技术、新方式和新空间发展战略研究”(2015-XZ-30)

本刊网址: www.ensci.cn

一、前言

2014年我国海水养殖产量达 1.81265×10^7 t, 产值达2 815.47亿元, 在保障我国蛋白食物供给以及经济发展中做出了巨大的贡献(中国渔业统计年鉴, 2015)。但是, 随着海水养殖规模的增大, 超负荷养殖, 使得养殖自身污染严重, 生态环境受到破坏, 养殖生物病害加剧, 危及养殖产业的可持续发展。亟待加强养殖容量研究, 建立科学的、适应性管理对策, 以保障养殖产业的高效、可持续发展。

容量的概念: 该概念来自于种群生态学的Logistic方程, $dN/dt=r \times N \times (K-N)/K$, 其中, N 代表种群大小; t 为时间; r 为种群的瞬时增长率, 表示该物种的潜在增殖能力; K 为环境容量。种群密度与增长率之间存在反馈机制, 即密度制约作用。当 $N=K$ 时, 增长率(dN/dt)为零, 种群数量保持稳定, 达到环境容量。可见, 在特定的环境条件下, 种群的数量不能无限制地增加。养殖容量的概念, 从最初的关注最大养殖产量向最大可持续产量转变, 从关注经济效益向生态效益转变^[1-3], 养殖容量的基本内涵: 特定水域单位水体养殖生物在不危害生态环境、能够保持生态系统相对稳定、符合可持续产出的最大产量。

二、我国海水养殖容量研究进展

不同养殖种类养殖容量的限制因子不同, 容量评估的切入点就会不同。按照投饵情况, 可以分为投饵型(如网箱养殖)和非投饵型(滤食性贝类、大型藻类等)两大类。投饵型养殖因污染物排放量较大, 主要将与污染物密切相关的环境指标作为容量评估的限制因子, 非投饵型养殖以天然饵料及营养物质为主, 主要考虑食物或者营养限制。

(一) 海水网箱养殖容量研究

网箱养殖产生的残饵、鱼类排泄、代谢产生的颗粒和溶解态物质, 会对养殖区域水质和底质环境产生压力, 因此, 网箱养殖容量评估主要将环境对养殖产生负荷的承载情况作为限制因子, 也称为环境容量。网箱鱼类养殖容量方法有实地调查估算法^[4], 颗粒有机碳沉积通量估算法^[5], 数值模型估

算法^[6]。限制性指标有底质硫化物含量^[4], 水体中无机氮浓度^[6], 水体中氮、磷浓度^[7]。

(二) 海水滤食性贝类养殖容量研究

方建光等^[8]在20世纪90年代率先开展了滤食性贝类养殖容量研究。滤食性贝类以浮游植物等颗粒有机物为饵料, 养殖容量与生态系统的功能如初级生产力、浮游植物现存量及悬浮颗粒有机物的浓度等密切相关。食物通常为贝类养殖容量的限制指标。养殖容量评估方法包括营养动态模型、能量/饵料收支模型、食物限制因子指标法、生态数值模型法等。研究的种类有筏式养殖的栉孔扇贝, 长牡蛎, 马氏珠母贝, 滩涂及底播养殖的菲律宾蛤仔、文蛤、虾夷扇贝。研究的海域有山东的桑沟湾、胶州湾、乳山口湾, 辽宁獐子岛, 江苏如东, 厦门大嶝岛海域及同安湾等^[9-12]。关于生态容量的研究甚少, 处于起步阶段^[13]。

(三) 大型藻类养殖容量研究

关于大型藻类养殖容量的研究较少^[8,14,15], 评估方法主要有两种: 一种是以氮、磷为限制指标的营养物质供需平衡法; 另一种是耦合水动力模型的生态动力模型法。

(四) 综合养殖系统的养殖容量评估研究进展

Ge等^[16]以浮游植物为指标, 采用数值模型的方法评估了桑沟湾筏式贝类(栉孔扇贝、长牡蛎)与海带的综合养殖容量, 给出了贝藻适宜的养殖比例。徐姗楠等^[17]利用ECOPATH软件, 构建了滩涂红树林种植-养殖耦合系统的生态通道模型, 分析了耦合系统的能量流动和系统特征, 并估算了该系统的养殖容量。

三、国外海水养殖容量研究进展

Inglis等^[18]对贝类养殖的容量进行了划分, 分为自然容量、养殖容量、生态容量和社会容量。建立了评估生态容量DEPOMOD模型^[19]和基于生物量平衡原理的ECOPATH模型^[20]。目前已建立多种评估养殖容量的技术方法和模型, 从简单的指标法, 发展到一维、二维的数值模型, 进而发展为包括水动力学的三维模型, 还建立了多营养层次综合养殖

容量评估模型^[21-24]。

挪威建立了基于网箱和贝类养殖容量的管理决策支撑工具 AkvaVis, 有效地限制养殖环境的恶化和病害的发生, 保证了三文鱼、贻贝养殖产业的可持续发展。AkvaVis 开辟了在水产养殖决策支持系统中应用虚拟技术的新方法。它可以帮助管理者、决策者非常直观地综合利用地理信息系统、鉴别任务, 制定决策。既可以考虑养殖场的养殖容量、养殖活动对环境的压力, 又可以考虑养殖场的最优布局, 同时, 尽量少地受原始数据、模型模拟等复杂过程的影响。

四、海水养殖容量评估的关键技术

(一) 养殖容量评估的指标体系

在关注养殖产量的同时, 尚需关注养殖对环境的影响以及经济因素, 如规格与价格的关系等。其中, 确定养殖活动对生态系统影响程度和生态系统弹性的确定是养殖容量评估的核心。不仅需要加强养殖与生态环境相互作用机理研究, 从生态系统水平上阐释养殖对生态环境的压力, 而且有必要与生态系统健康评价相结合, 有助于基于生态系统水平的渔业管理模式的建立。

(二) 养殖生物个体生长数值模型

养殖生物是养殖容量评估的主体, 个体生长数值模型是养殖容量评估模型的关键子模型, 决定了容量评估的正确性和准确性。常用的有基于特定生长和动态能量收支原理的个体生长数值模型。

(三) 水动力过程与生态模型的耦合

水流作为养殖过程中代谢原料和产物的载体, 其交换过程对于海域内营养物质的输运和补充有着十分重要的意义。以精细过程观测为基础, 以数值模型为手段, 将物理过程与生物模型进行耦合是养殖容量评估的关键技术。

五、我国海水养殖容量评估存在的问题

(一) 评估方法与技术问题

我国养殖容量研究开展得较晚, 评价方法和理论基础研究都相对薄弱, 尚未形成有自主知识产

权且较为完善的容量评估数值模型, 尤其在与水动力过程的耦合上相对不足。在养殖贝类的生态容量评估指标方面, 存在很大的不确定性和可变性, 缺少科学的量化指标。

(二) 数据的积累不足

因为区域环境的特色, 限制容量的因子往往不同。而且, 养殖容量受环境、社会、经济、文化等多方面的影响, 会因养殖种类、方式、养殖技术以及管理水平的提高而改变。我国海域广阔, 跨越北温带-热带, 受全球气候变化和人类活动多重压力影响, 生态环境复杂多变。另外, 海水养殖面积大, 养殖种类、方式繁多。因此, 不仅需要养殖海域的物理、化学、生物等方面的环境参数的长期调查, 而且需要加强对养殖结构、养殖生产要素以及养殖生物的生理生态指标的系统研究和数据积累。

(三) 养殖产业问题及需求

近年来, 随着养殖规模和养殖强度的不断扩大, 浅海养殖空间有限, 加之沿岸水域的环境污染、病害暴发等危及海水养殖产业的可持续发展。究其原因, 与养殖品种单一, 密度过大, 比例失调, 布局盲目, 以及养殖生产管理不规范、不科学有关。我国养殖种类、方式和模式多样, 并且海域地理环境复杂, 跨越温带、亚热带、热带海域, 所以, 亟需加强海水养殖容量评估体系和制度的研究, 建立科学的管理规范以保障海水养殖高效、可持续发展。

六、容量评估技术在养殖管理上应用的保障措施

海水养殖已成为我国沿海的重要产业, 随着养殖密度和规模的增大, 养殖对于近海及河口生态系统的影响日益增大。在 2016 年的全国渔业渔政工作会议上, 将“加快转方式调结构, 促进渔业转型升级”作为“十三五”全国渔业发展的宗旨, 其中, 尤其强调了以“提质增效、减量增收、绿色发展、富裕渔民”为未来渔业发展的目标。如何调整结构? 根据什么来减量还能增收? 另外, 在近海可利用空间几近饱和的情况下, 拓展深远海空间是未来海水养殖发展的方向。新空间、新模式的拓展迫切需要规划、选址的科学指导。养殖容量评估是制定

现代水产养殖发展规划的基础,也是保证水产养殖可持续发展、保护生态环境免受破坏的前提。以养殖容量为基础,科学安排海域的养殖规模、密度,进行总量控制及成本核算,以及进行确定适宜的放养和采捕规格,形成科学的管理策略。以养殖容量为基础,以高效、可持续产出为核心,科学地控制养殖密度和规模、优化养殖结构和布局,构建经济效益高、生态环境友好的养殖模式^[25]。因此,提出了容量评估技术在养殖管理上应用的保障措施。

(一) 建立养殖容量评估制度

容量评估应纳入政府的公益性和强制性工作范畴,形成制度化。并且以此来确定养殖密度和布局,发放养殖许可证、水域使用证,加强违规处罚措施的力度。建立容量评估制度,需要从以下几个方面入手。

1. 资金保障

容量评估和宏观管理规划是公益性的政府行为。养殖者或者企业缺乏评估技术和资金,难以具体实施,因此容量评估应纳入政府强制性工作范畴,并形成制度化。容量评估的保障资金可以从收缴的养殖水域使用费中安排一定的资金。

2. 技术保障

容量评估是需要多学科交叉的复杂技术工程。对于特定养殖区域,容量不仅与养殖种类、方式有关,而且与养殖系统的物理、化学、生物因子有关,甚至受政治经济文化因素的影响。因此,容量评估需要经过专业培训的、同时了解当地的政治经济文化的专业人员才能胜任。另外,容量评估需要有长期的、全面的理化生物以及养殖活动等方面的数据作为支撑。

建议建立稳定、有能力、有意愿长期坚持从事基础监测事业的科研队伍,针对养殖主产区和主要养殖品种,按照科学、标准的监测方法进行监测、样品采集、分析和数据交汇,建立覆盖我国海域养殖主产区物理水文、水化学、生物学长序列、多点位大数据库,辅以数据挖掘和机制研究,明晰我们主产区主要养殖品种、养殖容量的动态变化特征,为我国养殖海域布局、可持续养殖管理策略的制定提供基础数据支撑。以中国水产科学研究所所属研究所为中心,利用省级研究所和地方研究所的地理

位置优势和基层实践优势,5~10年内形成黄渤海、东海、南海监测中心,建立涵盖筏式养殖、底播增殖、滩涂养殖、网箱养殖等典型养殖方式的长期监测实验站和挂靠省级以上科研院所的省级容量评估中心。各省所辖海域的容量评估工作可以委托省级评估中心来实施,逐步形成以省及自治区为单位的养殖水域容量评估制度。

3. 行政保障

国家行政机关如相应的管理委员会及地方政府以容量评估结果为指导,确定养殖密度和布局,发放养殖许可证,从宏观上控制海水养殖规模,制定相应的违规处罚措施。另外,养殖海域的选址作为发展海水养殖的首要环节,应在容量评估结果的基础上,结合海洋功能区划现状、当地渔业结构、资源状况、航运交通等多种要素进行综合论证。因此,建立养殖水域的容量评估制度,科学地调整养殖许可证和水域使用许可证的发放管理制度,应为制定水产养殖发展规划的重要内容,并建立相应的实施和监督体系,以确保水产养殖业规范化和标准化地发展^[25]。

4. 政策保障

政府加强宏观调控,以生态系统养殖理论为基础,制定养殖管理以及海洋生态系统保护的行动准则,为各级政府和渔业渔政部门建立容量评估制度提供政治决策依据,全面推进水产养殖业执法与监管。

(二) 设立养殖容量研究和布局与结构调整专项

目前,评估容量的方法主要有经验研究法、能量/饵料平衡模型、生态动力学模型法等,各有利弊。缺乏完善的、通用的容量评估技术方法。不同生态系统间差异较大,难以进行比较研究。针对目前我国养殖容量评估存在的基础理论和技术的薄弱环节,以生态系统健康、高效、可持续发展为核心目标,建立耦合动力过程的养殖生态容量、环境容量评估数值模型,将生态容量与生态系统健康评价有机地结合,促进生态容量评估技术、指标和模型的发展,为养殖水域的容量评估制度的科学有效实施提供技术保障^[9]。依据养殖容量评估结果,结合各地资源条件、产业状况和经济水平,按照“主体功能突出、布局结构优化、统筹协调发展”的方针,积极推进现代渔业生产主导区、生态建设区和功能

拓展区建设, 加快海水养殖业发展方式转变、结构调整和区域拓展。

参考文献

- [1] 唐启升. 关于容纳量的研究[J]. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 1-5.
Tang Q S. On the carrying capacity and its study [J]. Mar Fish Res. 1996; 17(2): 1-5.
- [2] 董双林, 李德尚. 论海水养殖的养殖容量[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28 (2): 253-259.
Dong S L, Li D S. On the carrying capacity of mariculture [J]. J Ocean Univ Qingdao. 1998; 28(2): 253-259.
- [3] 杨红生, 张福绥. 浅海筏式养殖系统贝类养殖容量研究进展[J]. 水产学报, 1999, 23 (1): 84-91.
Yang H S, Zhang F S. Advances of studies on carrying capacity of shallow sea for filter-feeding bivalve raft culture [J]. Fish Sci. 1999; 23 (1): 84-91.
- [4] 杜琦, 张皓. 三都湾网箱鱼类养殖容量的估算[J]. 福建水产, 2010, 4: 1-6.
Du Q, Zhang H. Estimation on the cage culture capacity of fishes of Sandu Bay [J]. J Fujian Fish. 2010; 4: 1-6.
- [5] 黄洪辉, 林钦, 贾晓平, 等. 海水鱼类网箱养殖场有机污染季节动态与养殖容量限制关系[J]. 集美大学学报, 2003, 8(2): 101-105.
Huang H H, Lin Q, Jia X P. et al. Relationship between the seasonal dynamic of organic pollution and carrying capacity limit in marine net cage fish farm [J]. J Jimei Univ (Nat Sci). 2003; 8(2): 101-105.
- [6] 姚炜民, 周燕, 沙伟, 等. 应用数值模拟方法计算小尺度海域养殖容量[J]. 海洋通报, 2010, 29(4): 432-438.
Yao W M, Zhou Y, Sha W, et al. Application of numerical value simulation in estimating the carrying capacity of small-scale sea area [J]. Mar Sci Bull. 2010; 29(4): 432-438.
- [7] Cai H W, Sun Y L. Management of marine cage aquaculture—an environmental carrying capacity method based on dry matter conversion rate [J]. Environ Sci Pol Res. 2007; 14(7): 463-469.
- [8] 方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等. 桑沟湾海带养殖容量的研究[J]. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 7-16.
Fang J G, Sun H L, Kuang S H. et al. Assessing the carrying capacity of Sanggou Bay for culture of kelp *Laminaria J Aponica* [J]. Mar Fish Res. 1996; 17(2): 7-16.
- [9] 张继红, 方建光, 王巍. 浅海养殖滤食性贝类生态容量的研究进展[J]. 中国水产科学, 2009, 16(4): 626-632.
Zhang J H, Fang J G, Wang W. Progress in studies on ecological carrying capacity of mariculture for filterfeeding shellfish [J]. J Fish Sci Chin, 2009; 16(4): 626-632.
- [10] 朱春华, 申玉春, 谢恩义, 等. 湛江流沙湾马氏珠母贝的养殖容量[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(3): 76-81.
Zhu C H, Shen Y C, Xie E Y, et al. Aquaculture carrying capacity of *Pinctada martensii* in Liusha Bay of Zhanjiang [J]. J Tro Oceanogra. 2011; 30(3): 76-81.
- [11] 陈辰. 乳山海域长牡蛎养殖环境与养殖容量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学 (硕士学位论文), 2012.
Chen C. Studies on environmental conditions and carrying capacity of Pacific oyster farming sites in Rushan [D]. Qingdao: Ocean University of China (Master's thesis); 2012.
- [12] 刘学海, 王宗灵, 张明亮, 等. 基于生态模型估算胶州湾菲律宾蛤仔养殖容量[J]. 水产科学, 2015, 34(12): 733-740.
Liu X H, Wang Z L, Zhang M L, et al. Carrying capacity of manila clam *Ruditapes philippinarum* in Jiaozhou Bay estimated by an ecosystem model [J]. Fish Sci. 2015; 34(12): 733-740.
- [13] 张继红, 方建光, 王诗欢. 大连獐子岛海域虾夷扇贝养殖容量[J]. 水产学报, 2008, 32(2): 236-241.
Zhang J H, Fang J G, Wang S H. Carrying capacity of *Patinopecten yessoensis* in Zhangzidao Island, China [J]. J Fish Chin. 2008; 32(2): 236-241.
- [14] 卢振彬, 方民杰, 杜琦. 厦门大嶝岛海域紫菜、海带养殖容量研究[J]. 南方水产, 2007, 3(4): 52-59.
Lu Z B, Fang M J, Du Q. Carrying capacity of *Porphyra* and *Laminaria* in Dadeng Island sea area of Xiamen [J]. S Chin Fish Sci. 2007; 3(4): 52-59.
- [15] 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[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 31-43.
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 [J]. Pro Fish Sci. 2010; 31(4): 31-43.
- [16] Ge C Z, Fang J G. Reponse of phytoplankton to multispecies mariculture: a case study on the carrying capacity of shellfish in the Sanggou Bay in China [J]. Acta Oceanologica Sinica. 2008; 27: 102-112.
- [17] 徐姗楠, 陈作志, 郑杏文, 等. 红树林种植-养殖耦合系统的养殖生态容量[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 393-403.
Xu S N, Chen Z Z, Zheng X W, et al. Assessment of ecological carrying capacity of intertidal mangrove planting-aquaculture ecological coupling system [J]. J Fish Sci Chin. 2010; 17(3): 393-403.
- [18] Inglis G J, Hayden B J, Ross A H. An overview of factors affecting the carrying capacity of coastal embayments for mussel culture [R]. NIWA, Christchurch; 2000.
- [19] Henderson A, Gamito S, Karakassis I, et al. Use of hydrodynamic and benthic models for managing environmental impacts of marine aquaculture [J]. J Appl Ichthyol. 2001; (17): 163-172.
- [20] Christensen V, Pauly D. ECOPATH II—a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics [J]. Ecol Model. 1992; 61(3-4): 169-185.
- [21] Duarte P, Meneses R, Hawkins A J S, et al. Mathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters [J]. Ecol Model. 2003; 168: 109-143.
- [22] Nunes J P, Ferreira J G, Gazeau F, et al. A model for sustainable management of shellfish polyculture in coastal bays [J]. Aquaculture. 2003; 219: 257-277.
- [23] Dowd M. A bio-physical coastal ecosystem model for assessing environmental effects of marine bivalve aquaculture [J]. Ecol Model. 2005; 183: 323-346.
- [24] Ren J S, Stenton-Dozey J, Plew D R, et al. An ecosystem model for optimizing production in integrated multitrophic aquaculture systems [J]. Ecol Model. 2012; 246: 34-46.
- [25] 唐启升, 丁晓明, 刘世禄, 等. 我国水产养殖业绿色、可持续发展保障措施与政策建议[J]. 中国渔业经济, 2014, 32(2): 5-11.
Tang Q S, Ding X M, Liu S L, et al. Strategy and task for green and sustainable development of Chinese aquaculture [J]. Chin Fish Econ. 2014; 32(2): 5-11.