

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190820002

http://www.yykxjz.cn/

董世鹏, 蔺凡, 姜妮妮, 杜美荣, 高亚平, 李凤雪, 侯兴, 蒋增杰. 基于叶绿素 *a* 时空分布的胶州湾菲律宾蛤仔养殖容量评估. 渔业科学进展, 2020, 41(6): 100–107

Dong SP, Lin F, Jiang WW, Du MR, Gao YP, Li FX, Hou X, Jiang ZJ. Estimation of carrying capacity of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in Jiaozhou Bay based on spatial and temporal distribution of chlorophyll *a*. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(6): 100–107

## 基于叶绿素 *a* 时空分布的胶州湾 菲律宾蛤仔养殖容量评估\*

董世鹏<sup>1,2</sup> 蔺凡<sup>1</sup> 姜妮妮<sup>1</sup> 杜美荣<sup>1</sup> 高亚平<sup>1</sup>  
李凤雪<sup>1</sup> 侯兴<sup>1,2</sup> 蒋增杰<sup>1,3①</sup>

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛 266071;

2. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室

海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071)

**摘要** 2017年7月~2019年4月期间,本研究采用大面观测、现场模拟实验与生长情况跟踪相结合的手段,基于 Dame 指标和 Herman 模型估算了胶州湾菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)的养殖容量。结果显示,调查期间,胶州湾水体的叶绿素 *a* 浓度为 2.09~4.28 mg/m<sup>3</sup>,均值为 3.07 mg/m<sup>3</sup>;不同规格(壳长 2.29~3.59 cm)的菲律宾蛤仔单位个体的平均滤水率为 0.45 L/(h·ind.),单位重量菲律宾蛤仔的平均滤水率为 2.52 L/(g·h);菲律宾蛤仔 1 龄、2 龄和 3 龄的平均干重分别为 0.18、0.30 和 0.42 g;胶州湾的水团停留时间为 52 d,初级生产时间为 1.58 d,贝类滤水时间为 2.09 d;1 龄、2 龄和 3 龄蛤仔的养殖容量分别为 637、378 和 272 ind./m<sup>2</sup>。目前,菲律宾蛤仔养殖量已超过养殖容量,建议若以 2 龄蛤为采捕对象,适宜的播苗密度为 582 ind./m<sup>2</sup>;若以 3 龄蛤为采捕对象,适宜的播苗密度为 789 ind./m<sup>2</sup>。本研究结果可为保障胶州湾菲律宾蛤仔养殖产业的绿色高质量发展提供理论依据和数据支撑。

**关键词** 菲律宾蛤仔; Dame 指标; Herman 模型; 养殖容量; 胶州湾

**中图分类号** S932.6 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)06-0100-08

我国是海水养殖大国,海水养殖产量世界第一,类是我国海水养殖的主要种类,占海水养殖总产量的统计,2018年海水养殖产量达到 2031.22 万 t,贝 70%以上,其中,滤食性贝类产量占贝类产量的 90%

\* 科技部政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0118300)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41761134052)、山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0502)、青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室渔业科技青年人才计划项目(2018-MFS-T13)和国家贝类产业技术体系养殖容量评估与管理岗位(CARS-49)共同资助 [This work was supported by Key Program for International Cooperation on Scientific and Technological Innovation, Ministry of Science and Technology (2017YFE0118300), International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (41761134052), Marine S&T Fund of Shandong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018SDKJ0502), Youth Talent Program Supported by Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018-MFS-T13), and Modern Agro-Industry Technology Research System (CARS-49)]. 董世鹏, E-mail: 742119697@qq.com

① 通讯作者: 蒋增杰, 研究员, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2019-08-20, 收修改稿日期: 2019-09-16

以上(中国渔业统计年鉴, 2019)。滤食性贝类通过滤水、摄食等一系列的生命活动, 在提高水体透明度(Ismail *et al*, 2015)、减缓水体富营养化(Officer *et al*, 1982)、积极应对 CO<sub>2</sub> 升高导致的气候变化(邵桂兰等, 2019)、调节营养盐循环(Gergs *et al*, 2009)等方面发挥了非常重要的生态服务功能, 但一些区域高密度、无序、粗放式的养殖活动对生态系统也造成一些负面影响(Dame *et al*, 1985; Hatcher *et al*, 1994; 印丽云等, 2012)。

为了推进水产养殖业绿色发展, 农业农村部、生态环境部等 10 部门联合印发了《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》。养殖容量是有效保障水产养殖业绿色可持续发展的重要依据。我国养殖容量的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代, 目前, 已经开展了包括桑沟湾(威海)、同安湾(厦门)、象山港(宁波)、乳山湾(烟台)和胶州湾(青岛)等 20 余个海湾的养殖容量评估工作(方建光等, 1996; 杜琦等, 2000; 蔡惠文等, 2004; 尹晖等, 2007; 刘学海等, 2015)。养殖容量的研究方法主要分为 2 种: 一种是静态方法, 主要考虑几个关键性的生理生态参数, 数据来源多为月际尺度、季节性尺度或年际尺度等, 忽略生态系统内部过程的动态变化及级联响应, 主要包括经验研究法、瞬时生长率法、能量收支法、营养动力学方法等; 另一种是动态方法, 基于生态系统动力学方法动态研究和模拟重要生源要素的关键生物地球化学过程。通过改变参数的计算方法, 静态和动态方法可以相互转化。静态方法具有操作简单、所需数据易获取、普适性好等优点, 但评估结果存在一定的误差; 动态方法是目前国际上广泛采用的主流方法, 虽然能够动态地模拟和预测生态系统的响应情况, 准确性较高, 但涉及到的参数非常多, 对使用者的数理知识、专业知识等学术理论层面的要求较高, 普适性相对较差。Dame 指标法是 Dame 等(1998)根据食物限制要素建立的养殖容量评估的静态方法, 虽然对生态系统过程的刻画线条较粗, 但考虑的关键参数比较全面, 具有一定的准确性, 应用范围较广(Gibbs, 2007; 张继红等, 2008)。

胶州湾是规模化养殖菲律宾蛤仔的重要海湾, 蛤仔年产量高达 32.5 万 t, 占胶州湾海水养殖总产量的 90%以上(张明亮, 2008)。胶州湾的菲律宾蛤仔播种规格为 2000~3000 粒/kg, 播种密度为 750~1000 kg/亩, 播苗时间为每年的 4~5 月, 经 7~8 个月养殖, 陆续开始采收, 繁殖期每年 2 次, 分别为 5 月中下旬与 9 月中旬至 10 月上旬。近些年来, 菲律宾蛤仔养殖产业发展迅速, 但存在无序放苗、超容量养殖、养殖结构不合理等问题。在“绿水青山就是金山银山”绿色发展理念的引领下, 亟需以养殖容量理论来指导产业发

展。目前, 已有学者通过能量收支法、三维浮游生态动力学模型法及依据饵料收支平衡的生态模型法等方法评估了胶州湾菲律宾蛤仔的养殖容量(陈丽梅, 2007; 张明亮, 2008; 刘学海等, 2015), 但现有的评估方法或侧重于静态方法, 考虑的核心参数不够全面, 或侧重于动态方法, 学术性较强, 难以供管理者 and 养殖户使用。

本研究根据 2017 年 7 月~2019 年 4 月的大面观测、现场实验、生长跟踪等数据, 采用 Dame 指标与 Herman 模型相结合的方法, 聚焦水团停留时间、初级生产时间和贝类滤水时间 3 个关键指标, 进行胶州湾菲律宾蛤仔养殖容量评估, 为养殖户和管理者等提供决策支持, 为生态系统水平的海水养殖管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 Dame 指标法

Dame 指标法是用来检验贝类养殖是否会对生态系统构成压力的评估方法, 主要包含水团停留时间、初级生产时间和贝类滤水时间 3 个指标(Dame *et al*, 1998)。海域中浮游植物的供给是限制贝类生长和养殖容量的主要因素(Carver *et al*, 1990), 其主要补充和消耗有 3 个, 一是海域内浮游植物通过光合作用而生长繁殖的增加量, 用初级生产时间表征; 二是通过与外部海域的水交换导致养殖区域的浮游植物增加量或减少量, 用水团停留时间表征; 三是养殖贝类对浮游植物的消耗量, 用贝类滤水时间表征。Dame 指标已被证明可以有效评估环境功能、行为以及养殖的发展潜力(Dame *et al*, 1998; Callens *et al*, 1999; 张继红等, 2008)。

**1.1.1 水团停留时间** 水团停留时间(Water mass residence time, RT)是指该海域内所有水体的体积或质量被海域外的水体替换所需要的理论时间, 可以通过经验计算(例如潮汐)或者通过构建该海域的水动力模型得到。本研究采用刘哲(2004)构建的胶州湾水动力模型所得到的水团停留时间。

**1.1.2 初级生产时间** 初级生产时间(Primary production time, PPT)是指海域内浮游植物初级生产取代海域内浮游植物常规生物量所需要的时间, 其值是海域浮游植物生物总量(*B*)与海域浮游植物年初级生产力(*P*)的比值。

**1.1.3 贝类滤水时间** 贝类滤水时间(Bivalve clearance time, CT)是指贝类将海域内所有水体过滤一遍所需要的时间, 其值为海域的海水总体积与贝类

群体滤水能力的比值。

## 1.2 Herman 模型

Herman(1993)模型是通过模拟物理环境、初级生产和贝类摄食之间的关系,对滤食性贝类养殖容量进行估算。Herman 模型中计算每立方米浮游植物变化率的公式为:

$$\frac{dP}{dt} = P(\mu - m) - P(Cl_{ff})(B_{ff}) - \frac{P}{RT} + \frac{P_e}{RT}$$

式中,  $P$  为海域内浮游植物量( $g/m^3$ );  $\mu$  为海域内浮游植物的生长速率( $d^{-1}$ );  $m$  为海域内浮游植物的死亡率(除了贝类摄食的原因外的死亡率);  $Cl_{ff}$  为贝类的滤水率 [ $m^3/(g \cdot d)$ ];  $B_{ff}$  为贝类养殖量 ( $g/m^3$ );  $RT$  为水停留时间;  $P_e$  为海域水交换中浮游植物的量 ( $g/m^3$ )。

模型公式可以转换为:

$$B_{ff} = \frac{(\mu - m)}{Cl_{ff}} + \frac{P_e - P}{P \times Cl_{ff}} \times \frac{1}{RT}$$

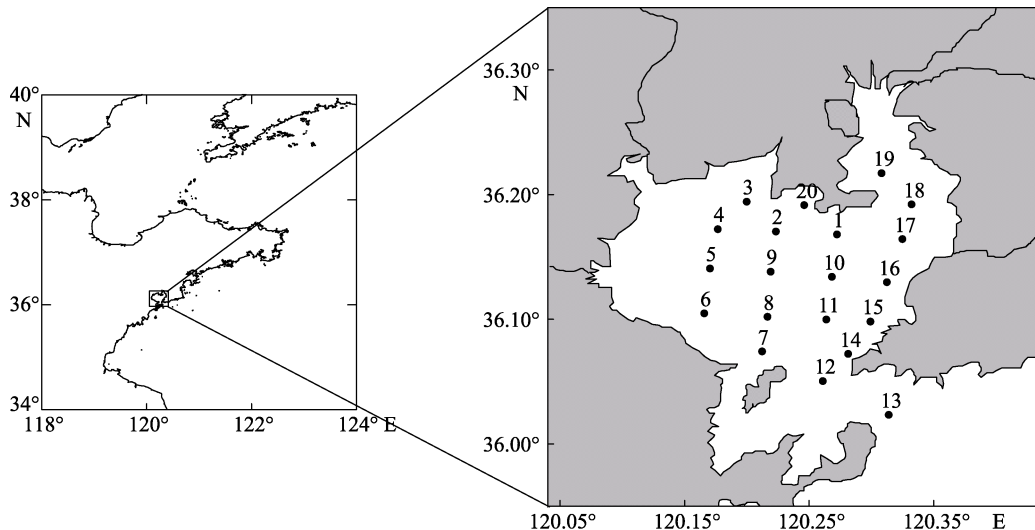


图1 胶州湾海域调查站位  
Fig.1 Investigation stations in Jiaozhou Bay

其中,  $P_s$  根据表层水中叶绿素  $a$  的含量计算:

$$P_s = C_a \cdot Q$$

式中,  $C_a$  为表层叶绿素  $a$  含量 ( $mg/m^3$ ),  $Q$  为同化系数 [ $mg/(mg \cdot h)$ ]. 真光层  $E$  的深度取透明度的 3 倍, 同化系数采用 3.7(王俊等, 2002)。

浮游植物生物量用过  $C : Chl-a$  得到。浮游植物的生物总量 = 叶绿素  $a$  的年平均值  $\times$  海域总体积  $\times (C : Chl-a)$ , 胶州湾以硅藻为优势藻种,  $C : Chl-a$  取值 33(张武昌等, 2001)。

**1.3.3 模拟现场流水法测定不同温度下不同规格菲律宾蛤仔的滤水率** 流水系统装置和流水槽参照

在特定海域内,  $\mu$ 、 $m$  为常量或变化不大, 则贝类养殖容量由海域初级生产力、水团停留时间以及养殖贝类的滤水率来决定。

## 1.3 参数的调查和检测

**1.3.1 叶绿素  $a$**  于 2017 年 7 月、11 月和 2018 年 1 月、4 月开展了 20 个站位 4 个航次的胶州湾海域大面调查(图 1)。每个站位准确量取水样 800 ml, 0.45  $\mu m$  的醋酸纤维膜过滤, 用于测定各站位浮游植物  $Chl-a$  浓度。 $Chl-a$  浓度采用分光光度法测定, 具体操作参照《海洋调查规范》(GB17378.7-2007)。

**1.3.2 初级生产力和浮游植物生物总量** 初级生产力通过叶绿素  $a$  法测定。按照 Cadée(1975)提出的简化公式计算:

$$C_{chla} = P_s \cdot E \cdot D / 2$$

式中,  $C_{chla}$  为初级生产力 [ $mg/(m^2 \cdot d)$ ],  $P_s$  为表层水中浮游植物的潜在生产力 [ $mg/(m^3 \cdot d)$ ],  $E$  为真光层的深度 ( $m$ ),  $D$  为白昼时间的长短 ( $h$ )。

文献(Jiang *et al*, 2017)进行设计。用水泵将海水(离岸 50 m 左右)抽取到缓冲槽内( $80 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ), 再通过分流软管分别流入流水槽( $20 \text{ cm} \times 9 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ )。每个分流软管的头部安装一个水阀, 用于控制流水槽流速。流水槽进水孔位于槽底上方 4 cm 处, 出水孔位于另一端的槽顶下方 4 cm 处。

挑选大(壳长为 3.5~3.7 cm)、中(壳长为 2.9~3.1 cm)、小(壳长为 2.3~2.5 cm) 3 种规格的菲律宾蛤仔, 暂养于室内流水系统 7 d 后开始实验。将暂养的 3 种规格蛤仔各取出 9 个放入流水槽(长 $\times$ 宽 $\times$ 高 =  $20 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 11 \text{ cm}$ )内作为实验组, 另设 3 个没有蛤

仔的流水槽作为对照组。调整流水槽水流速度为 150 ml/min 左右, 驯化 1 h。驯化结束后, 每隔 1 h 测定各个流水槽流速, 并用聚乙烯小瓶取 100 ml 的海水样品, 使用便携式颗粒计数器 PAMAS(型号 S4031GO, 德国)测定水样瓶中颗粒物数量(测定粒径范围为 2~50  $\mu\text{m}$ ), 共进行 3 次重复取样, PAMAS 测定的样品连续测量 3 次。滤水率的计算公式(Hildreth *et al.*, 1976)如下:

$$CR = V \times (C_0 - C_t) / C_0$$

式中,  $V$  为流水槽的流速(L/h);  $C_0$  和  $C_t$  分别为空白组和实验组颗粒物数量(ind./L)。

**1.3.4 菲律宾蛤仔个体生长数据调查** 于 2018 年 4 月~2019 年 4 月逐月在规模化养殖区定点(36°11'14.0"N, 120°15'2.9"E)采集 1 龄、2 龄和 3 龄的菲律宾蛤仔各 50 个, 用游标卡尺测定壳长、壳宽和壳高(精确到 0.01 cm), 分离软组织, 用电子天平测量软组织湿重、

软组织干重(60°C 烘干至恒重, 精确到 0.01 g)。

## 2 结果

### 2.1 胶州湾水体叶绿素 *a* 的时空分布特征

调查海域表层叶绿素 *a* 的时空分布特征见图 3。从季节变化来看, 胶州湾海域表、底层叶绿素 *a* 浓度的年变化范围分别为 2.09~4.28 和 2.10~4.02  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 均值分别为 3.33 和 2.81  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 总叶绿素 *a* 的均值为 3.07  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 季节差异极显著( $P < 0.01$ )。从平面分布来看, 春季浮游植物主要分布于胶州湾北部近岸; 夏季高值区在胶州湾核心区域, 海湾南部浓度较低; 秋季高值区出现在胶州湾东部偏南海域; 冬季高值区在胶州湾西部和北部偏东近岸。从垂直分布来看, 冬季表层浮游植物浓度高于底层, 差异显著( $P < 0.05$ ); 春季、夏季和秋季表、底层 Chl-*a* 浓度相近。

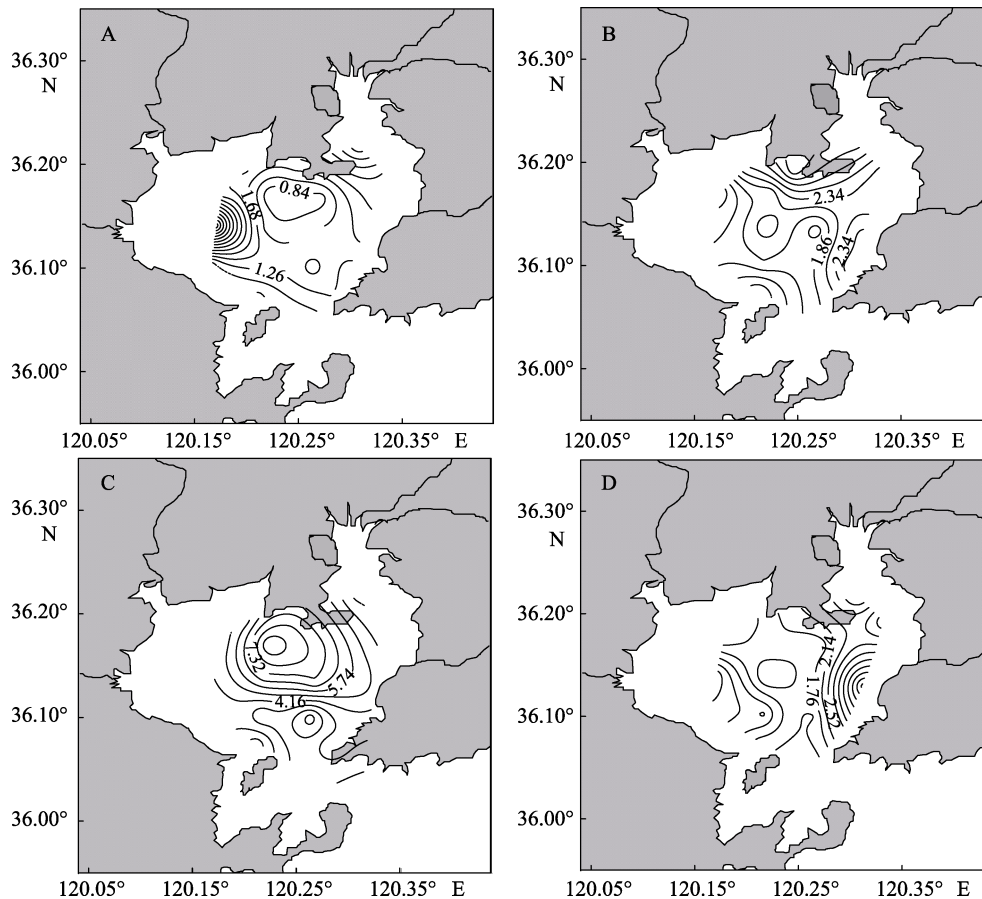


图 2 胶州湾海域表层浮游植物 Chl-*a* 的时空分布特征

Fig.2 Seasonal and spatial variations of phytoplankton Chl-*a* in the surface layer of Jiaozhou Bay

A: 春季; B: 夏季; C: 秋季; D: 冬季  
A: Spring; B: Summer; C: Autumn; D: Winter

根据叶绿素 *a* 浓度估算的不同季节初级生产力和浮游植物生物量见表 1, 胶州湾海域年平均初级生

产力为 450.28  $\text{mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 海域浮游植物生物总量为  $2.48 \times 10^9 \text{ g C}$ 。

表1 胶州湾海域各季节的叶绿素 *a* 含量和初级生产力  
Tab.1 Seasonal variation of chlorophyll *a* and primary production in Jiaozhou Bay

月份 Month	湾内叶绿素 <i>a</i> (表层)	湾内叶绿素 <i>a</i> (底层)	湾外 叶绿素 <i>a</i>	初级生产力 Primary production [mg C/(m <sup>2</sup> ·d)]
	Chl- <i>a</i> inside the Bay (surface) (mg/m <sup>3</sup> )	Chl- <i>a</i> inside the Bay (bottom) (mg/m <sup>3</sup> )	Chl- <i>a</i> outside the Bay (mg/m <sup>3</sup> )	
1	4.28	2.99	0.99	521.64
4	2.09	2.13	1.21	510.84
7	4.72	4.02	2.41	364.65
11	2.23	2.10	1.13	403.97

## 2.2 菲律宾蛤仔滤水率

通过现场流水模拟实验测定 3 种规格菲律宾蛤

表2 菲律宾蛤仔生物学参数及滤水率  
Tab.2 Biological parameters and clearance rate of *R. philippinarum*

规格 Size	壳长 Shell length (cm)	壳宽 Shell width (cm)	壳高 Shell height (cm)	软体部湿重 Tissue wet weight (g)	软体部干重 Tissue dry weight (g)	滤水率 Clearance rate [L/(h·ind.)]	滤水率 Clearance rate [L/(g·h)]
小 Large	2.29±0.04	1.66±0.05	1.08±0.13	0.69±0.13	0.10±0.02	0.36±0.08	3.60±0.82
中 Medium	2.97±0.04	2.07±0.1	1.53±0.08	1.46±0.13	0.19±0.03	0.42±0.12	2.19±0.61
大 Small	3.59±0.15	2.53±0.06	1.75±0.06	2.75±0.44	0.34±0.06	0.57±0.15	1.77±0.45

表3 胶州湾海域 Dame 指标的估算结果  
Tab.3 Evaluation results of Dame indicators for Jiaozhou Bay

指标 Indicator	数值 Value
水团停留时间 RT(d)	52
初级生产时间 PPT(d)	1.58
贝类滤水时间 CT(d)	2.09

## 2.4 Herman 模型估算胶州湾菲律宾蛤仔养殖容量

胶州湾大面调查结果显示,胶州湾湾内年浮游植物量  $P$  为  $3.07 \text{ mg/m}^3$ ,湾口交换处年浮游植物量  $P_e$  为  $1.44 \text{ mg/m}^3$ 。现场流水实验法测得菲律宾蛤仔的平均滤水率为  $0.06 \text{ m}^3/\text{g}$ 。浮游植物生长率  $\mu$  取  $0.99 \text{ d}^{-1}$ ,死亡率  $m$  取  $0.001 \text{ d}^{-1}$ (谭书杰, 2009)。根据以上数据和 Herman 模型,得到菲律宾蛤仔养殖容量  $B_{\text{H}}$  为  $16.31 \text{ g/m}^3$ 。菲律宾蛤仔个体生长逐月调查数据显示,1龄、2龄和3龄的蛤仔平均软体干重分别为 0.18、0.30 和 0.42 g,得到1龄、2龄和3龄的平均养殖容量分别为 637、378 和 272 ind./m<sup>2</sup>。

## 3 分析与讨论

叶绿素 *a* 是浮游植物光合作用最主要的色素,其

仔的滤水率(表2),菲律宾蛤仔个体滤水率为大规格>中规格>小规格,单位重量滤水率为大规格<中规格<小规格。3种规格的菲律宾蛤仔个体平均滤水率为  $0.45 \text{ L}/(\text{h}\cdot\text{ind.})$ ,单位重量平均滤水率为  $2.52 \text{ L}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。

## 2.3 Dame 指标法评估胶州湾菲律宾蛤仔养殖情况

胶州湾菲律宾蛤仔年产量高达 32.5 万 t(张明亮, 2008),商品蛤(壳长>3.0 cm)的平均体重为 6 g,则年收获  $5.42 \times 10^{10}$  粒,养殖周期 2 年,推算胶州湾菲律宾蛤仔现存量 1.08×10<sup>11</sup> 粒。胶州湾面积为 349 km<sup>2</sup>,平均水深为 7 m,体积为  $2.44 \times 10^9 \text{ m}^3$ (张志恒, 2009)。更新该海域水团停留时间(RT)为 52 d(刘哲, 2004)。根据以上文献数据和调查结果得到 Dame 指标的结果见表 3。

分布是浮游植物生物量重要的指标(Culver *et al.*, 1989),是评估胶州湾养殖容量的关键因子。潘友联等(1995)的调查显示,1983~1985年胶州湾表层海水叶绿素 *a* 的含量为  $1.02 \sim 15.62 \text{ mg/m}^3$ ,平均含量为  $3.05 \text{ mg/m}^3$ ;吴玉霖等(2004)研究得出,1991年5月~2002年11月胶州湾叶绿素 *a* 的含量为  $2.09 \sim 5.70 \text{ mg/m}^3$ ,平均为  $3.47 \text{ mg/m}^3$ ;王玉珏等(2015)研究表明,2010年6月~2011年5月的叶绿素 *a* 含量为  $1.02 \sim 3.88 \text{ mg/m}^3$ ,平均为  $2.85 \text{ mg/m}^3$ ,不同年份之间存在一定的波动范围。本研究结果表明,叶绿素 *a* 含量在  $2.09 \sim 4.28 \text{ mg/m}^3$  之间,均值为  $3.07 \text{ mg/m}^3$ ,从年际变化来看,胶州湾叶绿素 *a* 浓度变化不明显,没有出现显著上升或者下降的趋势。

滤水率表示单位时间内滤食性贝类所滤过水体的体积,是评估养殖容量的核心指标之一。本研究测定菲律宾蛤仔滤水率采用现场模拟流水法,相对于传统的静水法,此方法更能真实反映蛤仔在自然海区中的生活状态,其测定值更加可靠。测定滤食性贝类滤水率的方法通常有抽膜法(林少君等, 2005)和颗粒计数器测定法(杜美荣等, 2012),传统的抽膜法易受过滤水的体积定量、滤膜破碎等人为影响,工作强度很大,但获得的数据数量及质量均存在局限性;台式颗

粒计数器(如库尔特等), 较适宜室内实验, 但受仪器价格昂贵、运输不便、对运行条件要求严格等因素制约, 难以在野外实验中广泛使用; 本研究采用的基于便携式颗粒计数器的滤水率测定方法是近些年来国际上普遍认可的滤食性贝类摄食生理研究方法, 该方法具有可严格按照既定程序连续运行、不受人为影响、操作简单和同一样品可多次重复测定等优点, 可以有效保证数据质量。本研究建立的模拟现场流水实验法与便携式颗粒计数器测定技术的联合运用, 将有效提升滤食性贝类滤水率测定方法的客观性和准确性, 进而保障基于滤水率估算的养殖容量评估结果的准确性。

本研究尝试将 Dame 指标法和 Herman 模型结合起来评估胶州湾菲律宾蛤仔的养殖容量, Herman 模型包括了水团停留时间、初级生产时间和贝类滤水时间 3 个主要周转时间要素, 是适合估算贝类养殖容量的生态系统模型(Dame *et al.*, 1998)。在特定的海域内,  $\mu$ 、 $m$  和  $Cl_{ff}$  为常量或变化不大, 初级生产力和水团交换时间决定贝类生物量(李长松等, 2007)。Dame 等(1998)指出, 水团停留时间相对较短(<40 d)和初级生产时间短(<4 d)的海域, 可以维持较高的双壳贝类生物量。胶州湾菲律宾蛤仔滤水时间为 2.09 d, 初级生产时间为 1.58 d, 而水团停留时间为 52 d。可见, 较高水平的初级生产力维持着该海域的蛤仔养殖。

在进行胶州湾菲律宾蛤仔生长状况跟踪时发现, 近年来, 胶州湾的菲律宾蛤仔出现死贝多、肥满度降低、蛤仔偏瘦、生长周期延长等现象。除了受天气等环境影响外, 最主要原因是胶州湾现有的菲律宾蛤仔养殖密度已超过其养殖容量。有数据表明, 胶州湾蛤仔的平均播种密度约为 2500 ind./m<sup>2</sup>, 平均存活密度约为 450 ind./m<sup>2</sup>(张明亮, 2008), 2 龄和 3 龄的养殖容量分别为 378 和 272 ind./m<sup>2</sup>, 实际养殖密度高于养殖容量, 这是造成菲律宾蛤仔质量下降的重要原因之一。利用 Dame 指标和 Herman 模型评估养殖容量时主要考虑食物限制下的养殖容量, 而养殖容量要受多种因素影响, 以本评估为例, 菲律宾蛤仔排泄活动会改变海域底质环境, 降低水中溶氧, 较长的水团停留时间(52 d)使水体不能及时更新, 不利于蛤仔的生存, 养殖容量减小。在估算胶州湾菲律宾蛤仔养殖容量时, 与菲律宾蛤仔有相同食物来源的野生滤食性种群被忽略, 对估算结果造成一定的误差。为提高蛤仔品质和产量, 生产过程中需有效控制养殖密度。胶州湾菲律宾蛤仔 1~2 龄和 2~3 龄的自然死亡率分别为 35% 和 47%(任一平等, 2006), 结合养殖容量, 若以 2 龄蛤为采捕对象, 则适宜的播种密度为 582 ind./m<sup>2</sup>; 若以 3 龄蛤为采捕对象, 则 789 ind./m<sup>2</sup> 为适宜。本研究

中, 养殖容量的估算模型通过较少的参数就可以满足要求, 后期将对这一模型进行优化, 充分考虑浮游植物的动态变化、滤水率的动态变化以及水团停留时间的空间异质性等, 将复杂的计算过程进行后台计算, 尝试开发人机交互的软件, 提升养殖容量评估方法的准确性和普适性。

## 参 考 文 献

- Cadée GC. Primary production off the Guyana coast. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1975, 9(1): 128-143
- Cai HW, Sun YL, Zhang XQ. Environmental impact of cage aquaculture and the aquaculture environmental capacity in Xiangshan Harbor. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(11): 71-76 [蔡惠文, 孙英兰, 张学庆. 象山港网箱养殖对海域环境的影响及其养殖环境容量研究. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 7(11): 71-76]
- Callens I, Tyteca D. Towards indicators of sustainable development for firms: A productive efficiency perspective. *Ecological Economics*, 1999, 28(1): 41-53
- Carver CEA, Mallet AL. Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture. *Aquaculture*, 1990, 88(1): 39-53
- Chen LM. The clearance rate and carrying capacity of transplant enhanced Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in Jiaozhou Bay. Master's Thesis of Ocean University of China, 2007 [陈丽梅. 胶州湾移植底播菲律宾蛤仔滤水率及养殖容量的初步研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2007]
- Culver ME, Smith WO. Effects of environmental variation on sinking rates of marine phytoplankton. *Journal of Phycology*, 1989, 25(2): 262-270
- Dame RF, Prins TC. Bivalve carrying capacity in coastal ecosystems. *Aquatic Ecology*, 1998, 31(4): 409-421
- Dame RF, Wolaver TG, Libes SM. The summer uptake and release of nitrogen by an intertidal oyster reef. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1985, 19(3-4): 265-268
- Bureau of Fishery and Fishery Administration, Ministry of Agriculture and Rural Areas, National Aquatic Technology Promotion Station, China Fisheries Society. 2019 China fisheries statistics yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2019 [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. 2019 年中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2019]
- Du MR, Fang JG, Mao YZ, *et al.* Diurnal rhythm of filtration rate of Zhikong scallop *Chlamys farreri* veliger and spat. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(5): 73-77 [杜美荣, 方建光, 毛玉泽, 等. 栉孔扇贝面盘幼虫和稚贝的滤水率昼夜节律. *渔业科学进展*, 2012, 33(5): 73-77]
- Du Q, Lu ZB, Dai QS, *et al.* The carrying capacity of Tong'an



- Bay for the culture of shellfish. Journal of Shanghai Fisheries University, 2000, 9(1): 21–26 [杜琦, 卢振彬, 戴泉水, 等. 同安湾贝类的养殖容量. 上海水产大学学报, 2000, 9(1): 21–26]
- Fang JG, Kuang SH, Sun HL, *et al.* Study on the carrying capacity of Sanggou Bay for the culture of scallop. Marine Fisheries Research, 1996, 17(2): 18–31 [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, 1996, 17(2): 18–31]
- Gergs R, Rinke K, Rothhaupt KO. Zebra mussels mediate benthic-pelagic coupling by biodeposition and changing detrital stoichiometry. Freshwater Biology, 2009, 54(7): 1379–1391
- Gibbs MT. Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities. Ecological Indicators, 2007, 7(1): 94–107
- Hatcher A, Grant J, Schofield B. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay. Marine Ecology Progress, 1994, 115(3): 219–235
- Herman PMJ. A set of models to investigate the role of benthic suspension feeders in estuarine ecosystems. Heidelberg: Springer-Verlag Press, 1993
- Hildreth, Crisp DIDJ. A corrected formula for calculation of filtration rate of bivalve molluscs in an experimental flowing system. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1976, 56(1): 111–120
- Ismail NS, Dodd H, Sassoubre LM, *et al.* Improvement of urban lake water quality by removal of *Escherichia coli* through the action of the bivalve *Anodonta californiensis*. Environmental Science and Technology, 2015, 49(3): 1664–1672
- Jiang ZJ, Du MR, Fang JG, *et al.* Size fraction of phytoplankton and the contribution of natural plankton to the carbon source of Zhikong scallop *Chlamys farreri* in mariculture ecosystem of the Sanggou Bay. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(10): 97–105
- Li CS, Fang B, Wang H, *et al.* Review of carrying capacity of shellfish aquaculture. Journal of Shanghai Fisheries University, 2007, 16(5): 478–482 [李长松, 房斌, 王慧, 等. 贝类养殖容量研究进展. 上海水产大学学报, 2007, 16(5): 478–482]
- Lin SJ, He LJ, Huang PS, *et al.* Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll *a* in phytoplankton. Ecologic Science, 2005, 24(1): 9–11 [林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 *a* 提取方法的比较与改进. 生态科学, 2005, 24(1): 9–11]
- Liu XH, Wang ZL, Zhang ML, *et al.* Carrying capacity of Manila clam *Ruditapes philippinarum* in Jiaozhou Bay estimated by an ecosystem model. Fisheries Science, 2015, 34(12): 733–740 [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. 水产科学, 2015, 34(12): 733–740]
- Liu Z. Research on modelling water exchange and nutrient budget in Jiaozhou Bay. Master's Thesis of Ocean University of China, 2004 [刘哲. 胶州湾水体交换与营养盐收支过程数值模型研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2004]
- Officer CB, Smayda TJ, Mann R. Benthic filter feeding: A natural eutrophication control. Marine Ecology Progress Series, 1982, 9(2): 203–210
- Pan YL, Guo YJ, Zeng CK. Vertical and seasonal variations of chlorophyll concentrations in the inlet of Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(1): 21–27 [潘友联, 郭玉洁, 曾呈奎. 胶州湾口内海水中叶绿素 *a* 浓度的周年变化和垂直分布. 海洋与湖沼, 1995, 26(1): 21–27]
- Ren YP, Xu BD, Guo YL, *et al.* Growth and mortality of the transplant enhanced Manila clam *Ruditapes philippinarum* in the Jiaozhou Bay. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(4): 642–649 [任一平, 徐宾铎, 郭永禄, 等. 胶州湾移植底播菲律宾蛤仔的生长和死亡特性. 中国水产科学, 2006, 13(4): 642–649]
- Shao GL, Liu B, Li C. Evaluation of carbon dioxide capacity and the effects of decomposition and spatiotemporal differentiation of seawater in China's main sea area based on panel data from 9 coastal provinces in China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2614–2625 [邵桂兰, 刘冰, 李晨. 我国主要海域海水养殖碳汇能力评估及其影响效应——基于我国 9 个沿海省份面板数据. 生态学报, 2019, 39(7): 2614–2625]
- Tan SJ. Preliminary studies on cascade grazing of mesozooplankton on phytoplankton and microzooplankton community in the Jiaozhou Bay. Master's Thesis of Ocean University of China, 2009 [谭书杰. 胶州湾中型浮游动物对浮游植物和微型浮游动物级联式摄食的初步研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2009]
- Wang J, Li HZ. Study on chlorophyll and primary production in inshore waters of the Bohai Sea. Marine Fisheries Research, 2002, 23(1): 23–28 [王俊, 李洪志. 渤海近岸叶绿素和初级生产力研究. 海洋水产研究, 2002, 23(1): 23–28]
- Wang YJ, Liu Z, Zhang Y, *et al.* Temporal and spatial variations of chlorophyll *a* and environmental factors in Jiaozhou Bay in 2010–2011. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(4): 103–116 [王玉珏, 刘哲, 张永, 等. 2010–2011 年胶州湾叶绿素 *a* 与环境因子的时空变化特征. 海洋学报, 2015, 37(4): 103–116]
- Wu YL, Sun S, Zhang YS, *et al.* Quantitative study on long-term variation of phytoplankton in Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(6): 518–523 [吴玉霖, 孙松, 张永山, 等. 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 518–523]
- Yin H, Sun Y, Xu LM, *et al.* Estimation of carrying capacity for shellfish in Rushan Bay. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(5): 669–674 [尹晖, 孙耀, 徐林梅, 等. 乳山湾滩涂贝类养殖容量的估算. 水产学报, 2007, 31(5): 669–674]

- Yin LY, Yang ZC, Yu ZN, *et al.* Shellfish aquaculture problems and countermeasures. *Fisheries Science*, 2012, 31(5): 302–305 [印丽云, 杨振才, 喻子牛, 等. 海水贝类养殖中的问题及对策. *水产科学*, 2012, 31(5): 302–305]
- Zhang JH, Fang JG, Wang SH. Carrying capacity for *Patinopecten yessoensis* in Zhangzidao Island, China. *Journal of Fisheries of China*, 2008, 32(2): 236–241 [张继红, 方建光, 王诗欢. 大连獐子岛海域虾夷扇贝养殖容量. *水产学报*, 2008, 32(2): 236–241]
- Zhang ML. Study and analysis of shellfish carrying capacity in Jiaozhou Bay. Master's Thesis of the First Institute of Oceanography, SOA, 2008 [张明亮. 胶州湾贝类养殖容量研究与分析. 国家海洋局第一海洋研究所硕士研究生学位论文, 2008]
- Zhang WC, Zhang F, Wang K. The ratio of the phytoplankton carbon and chlorophyll in the sea. *Marine Sciences*, 2001, 25(3): 28–29 [张武昌, 张芳, 王克. 自然海水中浮游植物生物量和叶绿素的比值. *海洋科学*, 2001, 25(3): 28–29]
- Zhang ZH. Utilization status and assessment of coastal zone in Jiaozhou Bay. Master's Thesis of Ocean University of China, 2009 [张志恒. 胶州湾海岸带利用现状与评价. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2009]

(编辑 冯小花)

## Estimation of Carrying Capacity of Manila Clam (*Ruditapes philippinarum*) in Jiaozhou Bay Based on Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll *a*

DONG Shipeng<sup>1,2</sup>, LIN Fan<sup>1</sup>, JIANG Weiwei<sup>1</sup>, DU Meirong<sup>1</sup>, GAO Yaping<sup>1</sup>,  
LI Fengxue<sup>1</sup>, HOU Xing<sup>1,2</sup>, JIANG Zengjie<sup>1,3①</sup>

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266071; 2. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071)

**Abstract** Based on Dame indices and Herman model, the carrying capacity of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in Jiaozhou Bay is estimated with the comprehensive fishery survey data, field simulation experiment, and growth tracking data between July 2017 and April 2019. The results showed that the average chlorophyll *a* concentration was in the range of 2.09~4.28 mg/m<sup>3</sup>, with an average value of 3.07 mg/m<sup>3</sup>. The average clearance rate was 0.45 L/(h·ind.) and converted to a unit-mass based value was 2.52 L/(g·h). The average dry weight of Manila clams at 1, 2, and 3 ages were 0.18, 0.30, and 0.42 g, respectively. The water mass residence time was 52 days, the primary production time was 1.58 days, and the bivalve clearance time was 2.09 days in Jiaozhou Bay. The corresponding carrying capacity of Manila clam were estimated to be 637, 378, and 272 ind./m<sup>2</sup> for 1-year, 2-year and 3-year old clams, respectively. Currently, the cultured quantity of Manila clams has exceeded the carrying capacity. It is recommended that the stocking density to be 582 ind./m<sup>2</sup> if 2-year clams are considered as the target object, and the stocking density to be 789 ind./m<sup>2</sup> if 3-year clams are considered as the target object. The results provide theoretical basis and necessary data for the development of the clam aquaculture in Jiaozhou Bay.

**Key words** *Ruditapes philippinarum*; Dame indices; Herman model; Carrying capacity; Jiaozhou Bay

① Corresponding author: JIANG Zengjie, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn