

刘胜浩, 赵林林, 刘玮, 等. 基于初级生产力的海洋生物资源承载力评估——以日照近岸海域为例[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 121–133, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2019.12.012

Liu Shenghao, Zhao Linlin, Liu Wei, et al. The assessment of carrying capacity of marine biology resources based on primary productivity method—A case study of coastal waters of Rizhao[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(12): 121–133, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2019.12.012

基于初级生产力的海洋生物资源承载力评估 ——以日照近岸海域为例

刘胜浩^{1,2}, 赵林林^{1,2}, 刘玮^{1,2}, 王波^{1,2}, 张朝晖^{1,2*}

(1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋生态研究中心, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 资源环境承载力研究亟待突破承载阈值界定与关键参数率定的技术瓶颈, 并建立一套标准化的定量评价关键技术。本研究基于“资源量-消费量”模型, 通过调查与实验分析获取特定海区的初级生产力、浮游植物有机碳含量、鱼类营养级等关键参数值, 采用营养动态模型和 Tait 沿岸海域能流模型来估算海洋生物资源总量, 然后根据年人均水产品摄入量或年人均蛋白质摄入量来计算该海区海洋生物资源承载力的阈值。根据 2016 年对日照辖区海域的生态环境状况调查, 该海域年平均初级生产力(以 C 计)为 428.22 mg/(m²·d), 浮游植物年生产量为 918.51 万 t, 鱼类、虾蟹类和头足类的平均营养级分别为 3.85、3.92 和 3.90, 利用营养动态模型计算海域渔业资源(鱼类、虾蟹类和头足类)的年生产量为 3.89 万 t; 根据 Tait 沿岸海域能流模型计算日照 10 m 等深线以内浅海的除去壳重的贝类资源量为 5.50 万 t。按照年人均水产品摄入量为 21 kg, 计算出日照辖区海域的海洋生物资源承载力总和为 192.86 万人; 按照年人均摄入蛋白质量为 30 kg, 计算出日照辖区海域的海洋生物资源承载力总和为 16.87 万人。本文建立了一项具有广泛适用性的海洋生物资源承载力定量评价技术, 对科学地开发利用海洋生物资源和建立陆海统筹的资源环境承载力的监测预警机制起到积极的促进作用。

关键词: 海洋生物资源; 资源承载力; 营养级; 营养动态模型; 初级生产力

中图分类号: P745

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2019)12–0121–13

1 引言

承载力原来作为一个力学概念, 是指物体在不产生任何破坏时所能承受的最大负荷, 可通过实验或经验公式方法进行度量。此后, 承载力的概念逐渐被引入生物学研究中, 指某一生境所能支持的某一物种的最大数量^[1–2]。资源环境承载力的前期工作主要集中于陆地承载力研究, 而海洋资源环境承载力的研究起

步较晚。联合国教科文组织在 20 世纪 80 年代中期提出的“一个国家或地区所能持续供养的人口数量”为度量的承载力评价模型为发展资源环境承载力评价技术体系提供了参考依据。根据中国的国情, 国内学者长期致力于研制本土化的资源环境承载力评价方法。前期的水土资源、大气环境、生态环境等承载力研究成果为制定国家的主体功能区划、人口发展规划和灾后重建规划等提供了重要参考意见^[3]。2015

收稿日期: 2018–09–11; 修订日期: 2019–02–01。

基金项目: 国家重点研发计划项目“海洋资源资产负债表编制与海洋资源环境承载力评价技术与应用”(2016YFC0503503); 海洋公益性行业科研专项: 基于海洋健康的资源环境承载能力监测预警关键技术研究与应用(201505008)。

作者简介: 刘胜浩(1980—), 男, 辽宁省鞍山市人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋资源环境承载力研究。E-mail: shliu@fio.org.cn

* **通信作者:** 张朝晖, 研究员, 博士, 主要从事海洋保护地和生态修复研究。E-mail: zhang@fio.org.cn

年,国家发改委启动了“建立资源环境承载能力监测预警机制”工作,这标志着中国资源环境承载力研究正式由分类走向综合、由理论走向实践。

国家“十三五”规划提出要“坚持陆海统筹,发展海洋经济,科学开发海洋资源,保护海洋生态环境,维护海洋权益,建设海洋强国”的发展目标和“拓展蓝色经济空间”的战略部署,使海洋资源和生态环境在经济社会发展中的战略地位日益凸显。海洋是一座资源宝库,其中鱼类、虾蟹类、贝类等作为重要的海洋生物资源,为人类维持生命和健康提供了丰富食物能量。中国作为一个人口和消费大国,粮食安全问题始终是我们关注的焦点。当前我国的海洋正面临资源约束趋紧、生态系统退化和环境污染加剧的严峻形势,难以满足建设海洋强国和可持续发展的要求^[4]。此外,“中国的土地到底能养活多少人口?”观点中,其倚重的土地资源人口承载力、粮食资源供养能力分析已经显得不够完整^[5-6]。因而亟需建立海洋资源环境承载力评价的指标体系、技术方法和监测预警机制。

当前,资源环境承载力研究亟需解决承载阈值界定与关键参数率定的问题,建立一套标准化、模式化、自动化的定量评价与综合评估关键技术^[3]。2016年,国家发改委等13部委联合下发的《资源环境承载力监测预警技术方法(试行)》中对海域承载力评价内容进行了详细阐述^[7-8],即通过岸线、海域开发强度、海洋功能区水质达标率、渔业资源综合承载指数、海洋生态承载指数、无居民海岛开发强度和生态状况7项指标测算海洋资源环境承载力,确定县级海域的承载等级,并开展成因分析^[4]。但是,该海洋资源环境承载力监测预警技术方法是通过现状与过去状况比较,需要3年历史监测数据,在一定程度上限制了海洋资源环境承载力评估和监测预警工作的开展,在实际执行过程中存在一定的困难。

海洋资源按其属性分为海洋生物资源、海底矿产资源、海水资源、海洋能资源和海洋空间资源^[9]。海洋生物资源和海洋空间资源是对人类的发展起到限制性的因素;海底矿产资源(例如矿物质)、海水资源、海洋能资源等一般是非限制性因素。对生物资源承载力进行评估,首要任务是估算海域的生物资源量。资源量是种群(或群体)资源量或种群数量的简称,指的是种群的可捕捞部分,或称捕捞群体的数量,即以数目表示的为“资源尾数”,以重量表示的称为“资源量或生物量”。资源量的测算方法有:利用渔业统计资料进行估算,例如利用Walter和Hilborn提出

的非平衡产量模型估算渔业资源量及其最大可持续产量^[10-12];利用调查资料进行估算,例如依据扫海面积法、鱼卵和仔稚鱼数量法、初级生产力法、增殖放流标记法、水声学方法来估算渔业资源量^[13]。通过梳理现有生物资源量评估方法,我们认为基于初级生产力的营养动态模型方法最适合于海域中鱼、虾蟹和头足类等资源总量的估算。并且,营养动态模型方法已经在国内多个海区开展了生物资源量评估的应用研究^[14-15]。同时,考虑到贝类资源主要分布于近岸海域,可以利用Tait沿岸海域能流分析模型来估算滩涂贝类的资源总量^[16]。两者相结合,可得出待评估海域中海洋生物资源的自然生产总量。

本文研究的海洋生物资源承载力是指特定市或县辖区海域在某一历史阶段,以海洋生物资源的可持续利用与生态环境的不被破坏为原则,在符合现阶段社会文化准则的物质生活水平条件下,当地海洋生物资源所能养活的人口数量。目前,用于海洋生物资源承载力评估的模型略少,主要有根据非平衡产量模型^[10]和渔获量-人口容量模型^[5]。本研究基于“资源量-消费量”模型,通过调查分析获取特定海区的初级生产力、浮游植物有机碳含量、鱼类营养级等参数,采用营养动态模型和Tait沿岸海域能流分析模型来估算海洋生物资源的自然生产总量,然后根据海洋生物蛋白质含量以及年人均蛋白质摄入量来计算海洋生物资源承载力。本研究发展了一项资源承载力的定量评价技术,将对认识区域人口容量与海洋生态环境关系问题、合理地开发利用海洋生物资源提供了新的技术方法。

2 数据和方法

2.1 评估的海域范围

评估的区域为日照市辖区内的海域,面积约为6 000 km²。其中,10 m等深线以内浅海约为200 km²。根据《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)和《海洋监测规范》(GB/T 17378-2007)中的方法,我们在2016年冬季(2月)、春季(5月)、夏季(8月)、秋季(11月),在日照海域设置12个站位,对海水质量、海洋生物、渔业资源情况进行4个季度的调查和数据分析(图1)。

2.2 评估的基本原理

根据海洋生物资源的分布特征,将其划分为两类。第一类是海域中的鱼、虾蟹和头足类;第二类是滩涂的贝类。利用营养动态模型法和Tait沿岸海域生态系能流分析法分别计算上述第一类和第二类生

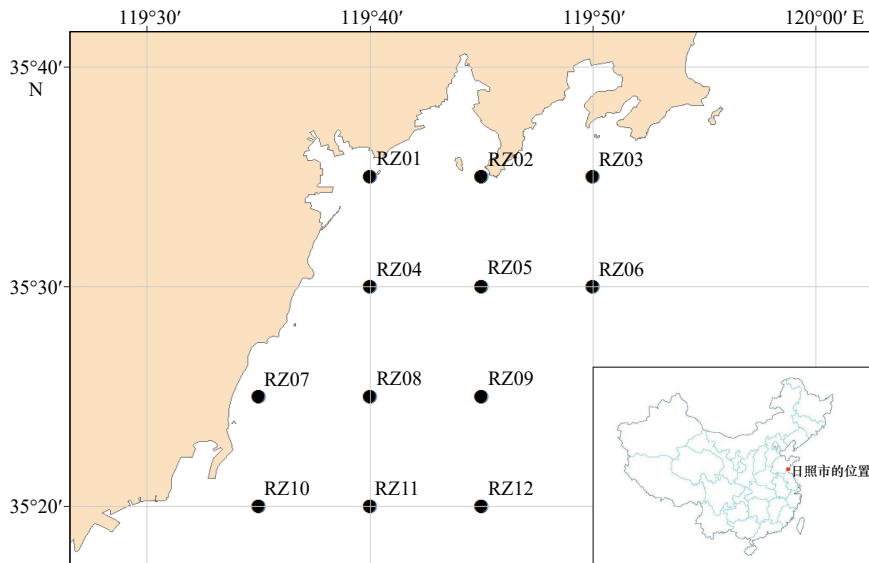


图1 研究区域及调查站位示意图

Fig. 1 The diagram of study area and survey station

物资源的自然生产总量(B)。再根据最大可持续产量(Maximum Sustainable Yield, MSY)的简单估算模式,即 $MSY=0.5B$ 来计算可捕捞的海洋生物资源总量。最后,根据鱼类、虾蟹类、头足类和贝类的蛋白质含量以及年人均蛋白质摄入量来计算海洋生物资源的人口承载力。

2.2.1 营养动态模型

海洋生态系统中的能量和物质通过食物链按一定的效率即“生态效率”,由低营养层次物种向高营养层次物种传递;当各营养层次物种的数量达到某一渐近值时就不再增加,维持在一定水平上波动,即处于生态平衡状态^[14-15]。利用营养动态模型公式,即 $B=Q(E)^n$ 计算海洋生物资源量^[17],式中, B 为海洋生物资源年产量, Q 为浮游植物年产量(鲜重), E 为生态效率, TL 为渔业资源的营养级。

2.2.2 Tait 沿岸海域能流分析模型

根据 Tait 对沿岸海域生态系能流分析结果,近岸海域初级生产力约有 10% 可转化为底栖滤食性动物^[16]。因此,调查海域贝类的年产碳量为 10% 的滩涂年初级产碳量。模型计算式,即 $W_s=[(0.1C_m)/C_s]$ 。式中, W_s 为贝类不含壳重的年生产量(kg); C_m 为近岸海域的年初级产碳量(kg); C_s 为贝类软组织鲜重含碳率(%)。

2.3 评估模型参数值的获取

2.3.1 浮游植物叶绿素 a (Chl a)

首先通过不同孔径的滤膜把浮游植物按照粒度截留下来,对不同粒度的浮游植物进行分级测定。浮游植物粒径分为 20~200 μm (小型)、2~20 μm (微型)和小于 2 μm (微微型)。利用 90% 丙酮溶液萃取

海水中的叶绿素 a ,然后用叶绿素荧光计在波长 670 nm 处测定提取液酸化前后的荧光值,来计算海水中叶绿素 a 的浓度。具体步骤按照《海洋调查规范》第 6 部分——海洋生物调查(GBT 12763.6-2007)中的方法进行。

2.3.2 初级生产力

将初级生产力(Primary Productivity, PP)按照 Cadée^[18]简化计算公式: $PP = \frac{P_s \times E_h \times T_h}{2}$ 和表层海水的浮游植物生产力(P_s)计算公式: $P_s = Chl a \times C_a$ 合并得到如下的初级生产力公式:

$$PP = \frac{Chl a \times C_a \times E_h \times T_h}{2}, \quad (1)$$

式中, PP 为调查海域的初级生产力(以 C 计)[$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; $Chl a$ 为表层海水(1 m 以内)的叶绿素 a 的含量(mg/m^3); C_a 为同化系数,指浮游植物光合作用速率(以 C 计)与叶绿素 a 含量之比值,即单位叶绿素 a 在单位时间内合成的有机碳量($\text{mg}/(\text{mg} \cdot \text{h})$); E_h 为海水真光层的深度(m),按照海水透明度的 3 倍来计算; T_h 为调查海域白昼时间的长短(h)。

2.3.3 浮游植物有机碳含量、年初级产碳量和年生产量

采用重铬酸钾氧化-还原容量法计算浮游植物有机碳含量。首先利用浮游植物网采集调查海域的浮游植物样品,再通过 80 目筛网过滤浮游动物,利用 220 目筛网再一次过滤滤液中的浮游植物。新鲜浮游植物样品经抽滤、称重,置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温干燥箱中 24 h 烘干水分,再采用电子分析天平称量。最后,采用化学分析法检测浮游植物干样中的有机碳含量,然

后换算鲜样有机碳含量。浮游植物有机碳含量的具体实验步骤按照文献 [15] 中的方法进行。

年初级产碳量 (t)=海洋年平均初级生产力×待评估海域面积×365 d÷1 000。

浮游植物生年产量 (t)=年初级产碳量÷浮游植物鲜重有机碳含量 (%) [15]。

2.3.4 生态效率

生态效率 (Ecological Efficiency, E) 定义为海洋生态系统中的能量和物质由低营养层次物种向高营养层次物种的传递效率, 具体是指海洋浮游动物对食物的消化吸收并转变成身体生长、质量增加的效率 [19]。中国近海和外海普遍采用的生态效率值为 15% [13, 15]。

2.3.5 鱼类、虾蟹类和贝类的营养级

按照《海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查 GB/T 12763.6-2007》、《海洋水产资源调查手册》和《全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程》中的方法对调查海域进行底拖网调查。渔业资源拖网调查所用网具为单拖底拖网, 网口 700 目, 网目尺寸为 2.3 寸。定点站位拖网 1 h, 拖速为 3.0 kn。对每站的渔获物进行种类鉴定、计数和称重, 统计渔获物的重量比例、渔获物的相对重要性指数 (Index of Relative Importance, IRI) 和渔获物的营养级 (Trophic Level, TL) 3 个方面的指标。其中, IRI 是根据各种类在数量、重量中所占比例和出现频率 3 个方面进行优势度的综合评价, 判断其在群落中的重要程度。按照公式 $IRI = (N\% + W\%)F$ 来计算, 式中, $N\%$ 为在数量中所占的比例; $W\%$ 为在重量中所占的比例; F 为出现频率。

利用稳定同位素技术分析渔业资源的营养级。首先, 渔获物样品经超纯水清洗后, 取鱼类背部肌肉、虾类腹部肌肉、蟹类螯足肌肉和贝类闭壳肌, 冷冻低温干燥 (-50℃) 至恒重。然后, 用研钵研磨成粉末, 由同位素分析质谱仪测定样品中 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 稳定同位素比值。

营养级计算公式: $TL = (\delta^{15}N \text{ 消费者} - \delta^{15}N \text{ 基准生物}) / TEF + \lambda$ 。式中, TL 为所计算生物的营养级; $\delta^{15}N$ 消费者为该系消费者 $\delta^{15}N$ 同位素比值; $\delta^{15}N$ 基准生物为该系基准生物 $\delta^{15}N$ 同位素比值; TEF 为相邻营养级同位素富集度; λ 为基准生物营养级。

2.3.6 含肉率和蛋白质含量

渔业资源的含肉率是衡量水产品品质和生产性能的一项重要指标。含肉率 (Dressed Ratio, DR) 通常受到渔业资源种类、生活环境、饵料等因素影响。本文根据已有的各种渔业资源含肉率的文献报道 [20-23], 通过归纳整理计算出鱼类、虾蟹类、头足类和贝类的

平均含肉率分别为 67.52%、56.44%、71.76% 和 21.71%。渔业资源产品中的主要营养成分包括蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素及矿物质等。其中, 渔业资源产品是全球人类食物蛋白质的第三大来源。按照文献中鱼类、虾蟹类、头足类和贝类的蛋白质含量的平均值分别为 17.19% [20]、18.3% [22]、13.24% [24] 和 10.69% [25]。

2.4 海洋生物资源承载力的计算公式

根据营养动态模型, 以调查海域的初级生产力为基础, 计算海域中渔业资源的最大可持续产量, 并整合海洋生物资源的含肉率和蛋白质含量以及年人均蛋白质的摄入量等参数, 整理得到海域中“鱼类、虾蟹类和头足类”资源的承载力 ($MBCC_1$) 的计算公式 (单位: 万人):

$$MBCC_1 = \frac{PP \times (E)^{TL} \times DR_f \times PR_f \times S_1 \times 365}{C_p \times P_{intake} \times 2 \times 10^7}, \quad (2)$$

式中, PP 为海域的初级生产力 (以 C 计) [mg/(m²·d)]; E 为生态效率 (%); S_1 为海域面积 (km²); C_p 为浮游植物含碳率 (%); P_{intake} 为年人均蛋白质摄入量 (kg); TL 、 DR_f 和 PR_f 分别为鱼类、虾蟹类、头足类的营养级、含肉率 (%) 和蛋白质含量 (%)。

根据 Tait 沿岸海域能流分析模型, 滩涂年初级产碳量、贝类软组织鲜重含碳率, 并整合贝类蛋白质含量以及年人均蛋白质摄入量等参数, 整理得到近海海域及滩涂中贝类资源承载力 ($MBCC_2$) 的计算公式 (单位: 万人):

$$MBCC_2 = \frac{PP \times PR_s \times S_2 \times 365}{C_s \times P_{intake} \times 2 \times 10^7}, \quad (3)$$

式中, PP 为调查海域的初级生产力 (以 C 计) [mg/(m²·d)]; PR_s 为贝类蛋白质含量 (%); S_2 为近海海域及滩涂的面积 (km²); C_s 为贝类软组织鲜重含碳率 (%); P_{intake} 为年人均蛋白质摄入量 (kg)。

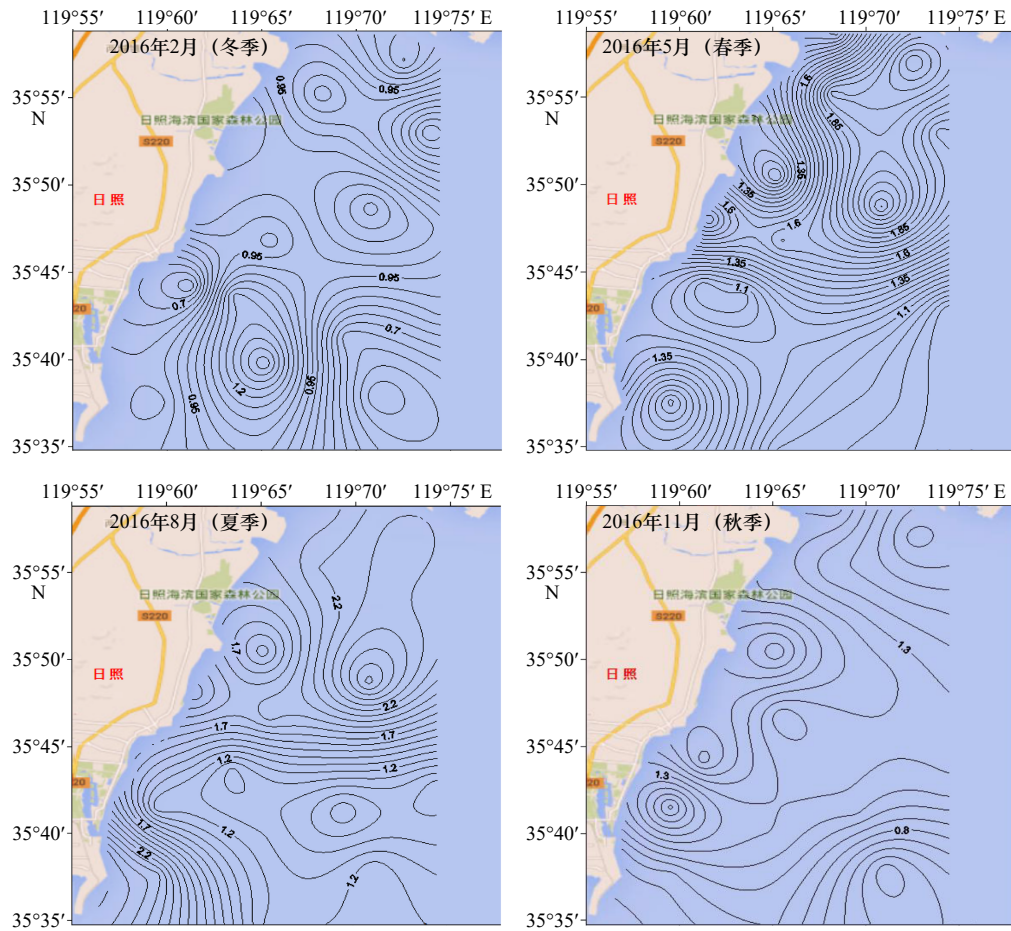
海洋生物资源总承载力计算公式:

$$MBCC = MBCC_1 + MBCC_2. \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 初级生产力与年初级产碳量

根据 4 个航次的调查结果, 日照海域 2 月叶绿素 a 含量的平均值为 0.92 $\mu\text{g/L}$, 变化范围为 0.45~1.45 $\mu\text{g/L}$; 整体分布趋势是中部较低, 西南部和北部较高 (图 2)。5 月叶绿素 a 含量的平均值为 1.41 $\mu\text{g/L}$, 变化范围为 0.85~2.21 $\mu\text{g/L}$; 整体分布趋势是由南部向北部逐渐升高。8 月叶绿素 a 含量的平均值为 1.75 $\mu\text{g/L}$, 变化范围为 0.71~2.75 $\mu\text{g/L}$; 整体分布趋势是东南部近岸海域和中部海域较高, 向远岸方向逐渐降低。11 月

图2 2016年日照海域各季度叶绿素 a 含量的平面分布($\mu\text{g/L}$)Fig. 2 The concentration distribution of chlorophyll a in each season in the sea field of Rizhao in 2016 ($\mu\text{g/L}$)

叶绿素 a 含量的平均值为 $1.13 \mu\text{g/L}$,变化范围为 $0.32 \sim 1.85 \mu\text{g/L}$;整体分布趋势是近岸较高,向远岸方向逐渐降低。日照海域叶绿素 a 含量2月最低,8月最高,年平均值为 $1.30 \mu\text{g/L}$ (表1)。

表层水中浮游植物生产力(P_s)等于表层叶绿素 a 含量乘以同化系数(Q)。同化系数(Q)是指单位叶绿素 a 在单位时间内合成的有机碳量。同化系数在一定程度上表征了浮游植物光合作用(固碳)的强度。海水中的磷酸盐与同化系数有较好的相关关系,根据

表1 2016年日照海域不同月份的叶绿素 a 含量Tab. 1 The content of chlorophyll a in different months in the sea field of Rizhao in 2016

调查时间	叶绿素 a 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	变化范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
2016年2月	0.92	0.45~1.45
2016年5月	1.41	0.85~2.21
2016年8月	1.75	0.71~2.75
2016年11月	1.13	0.32~1.85
年平均值	1.30	0.58~2.07

海水磷含量可以计算同化系数,由此获得南黄海秋季同化系数的范围为 $4.5 \sim 6.8 \text{ mg}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ^[26]。本次调查测定了日照海域磷酸盐的年平均值为 $0.011 \mu\text{g/L}$,计算得到日照海域的年平均同化系数为 $5.62 \text{ mg}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ 。因此,表层水浮游植物生产力(P_s)为 $7.32 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。真光层的深度按照透明度的3倍来计算。根据公式(1)计算得到日照海域平均初级生产力(C)为 $428.22 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。日照市海域辖区面积为 6000 km^2 ,浮游植物含碳率为 10.21% ,最终计算得到日照海域年初级产碳量和浮游植物年生产量分别为 93.78 万 t 和 918.51 万 t (表2)。其中,10 m等深线以内浅海的面积为 200 km^2 ,年初级产碳量为 3.12 万 t 。

3.2 海洋生物资源现状与营养级

日照海域冬季、春季、夏季和秋季各站位的渔获物的重量及尾数分布情况见图3。冬季航次海域平均渔获重量为 1.26 kg/h ,平均渔获尾数为 1845 尾/h (图3),其中RZ03站位渔获重量和尾数最高。春季航次海域平均渔获重量为 10.09 kg/h ,平均渔获尾数为 869 尾/h ;其中,RZ07站位渔获重量最高为 42.53 kg/h ,

表 2 2016 年日照海域浮游植物年生产量

Tab. 2 The annual production of phytoplankton in the sea field of Rizhao in 2016

海域	面积/km ²	初级生产力(以C计)/ mg·(m ² ·d) ⁻¹	年初级产碳量/万吨	浮游植物年生产量/万吨
日照辖区的海域	6 000	428.22	93.78	918.51
10 m等深线以内的浅海	200	428.22	3.12	—

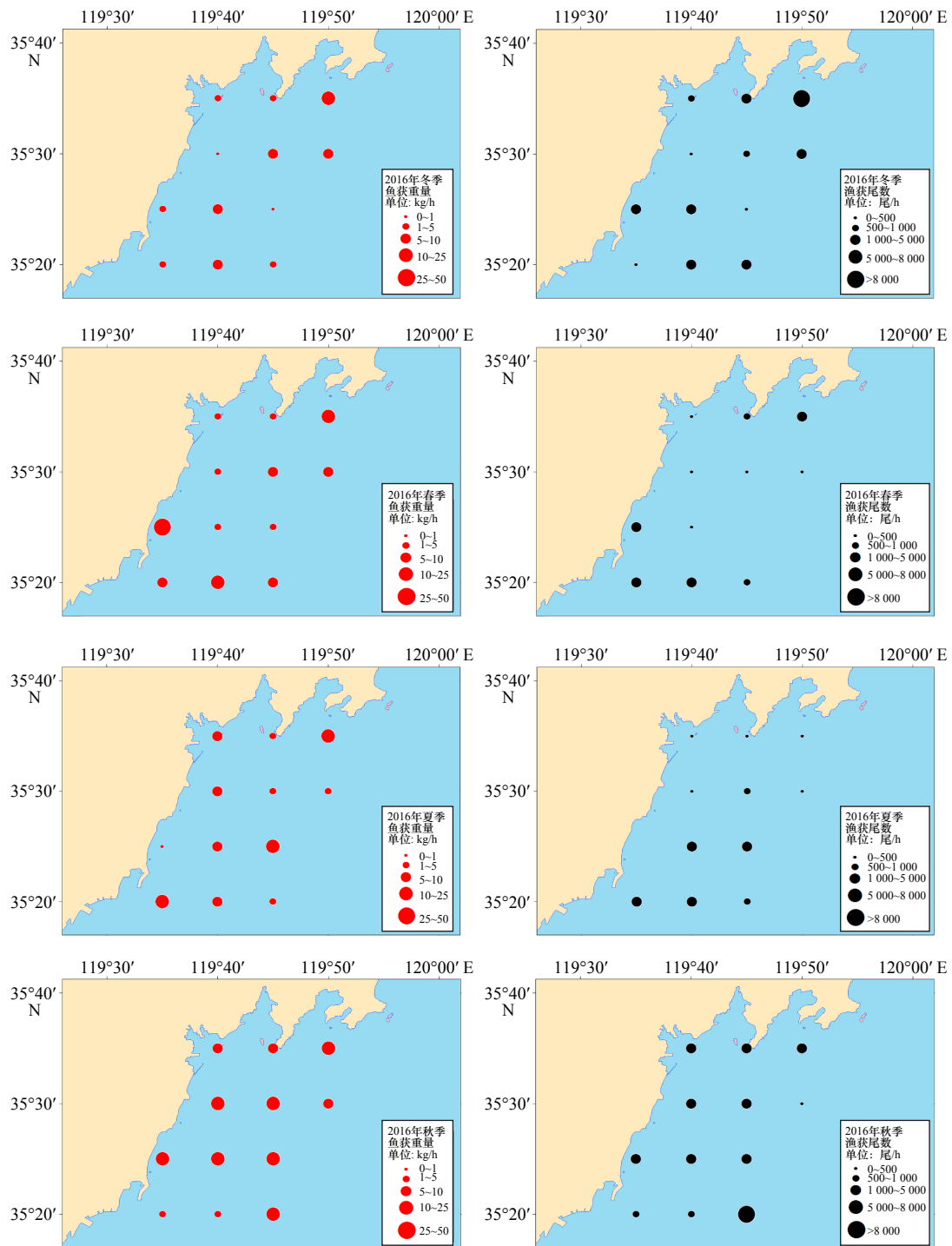


图 3 2016 年日照海域冬季、春季、夏季和秋季各站位的渔获重量及尾数分布

Fig. 3 The distribution of catch weight and tail number in each season in the sea field of Rizhao in 2016

表3 2016年日照海域的渔业资源组成

Tab. 3 The component of fishery resources in the sea field of Rizhao in 2016

统计项目	2016年2月		2016年5月		2016年8月		2016年11月	
	W%	N%	W%	N%	W%	N%	W%	N%
鱼类	83.06	40.67	81.18	65.02	48.03	46.50	52.64	42.35
虾蟹类	10.47	58.92	15.78	33.43	38.72	26.31	25.34	52.92
头足类	6.47	0.42	3.05	1.55	13.25	27.19	22.01	5.73

注: W%表示渔获物的重量比例; N%表示渔获物的数量比例。

RZ10 站位渔获尾数最高为 1 955 尾/h。夏季航次海域平均渔获重量为 6.61 kg/h, 平均渔获尾数为 1 402 尾/h; 其中, RZ10 站位渔获重量最高为 15.96 kg/h, RZ09 站位渔获尾数最高为 4 122 尾/h。秋季航次海域平均渔获重量为 11.13 kg/h, 平均渔获尾数为 2 677 尾/h; 其中, 渔获重量最高站位为 RZ12 号站为 20.84 kg/h; 渔获重量超过 10 kg/h 的站位 7 个, 5~10 kg/h 之间的站位 3 个; 渔获尾数最高站位为 RZ12 号站为 12 604 尾/h。渔获尾数大于 5 000 尾/h 的站位有 1 个, 渔获尾数在 1 000~5 000 尾/h 之间的站位有 8 个。

冬季调查共捕获渔业资源 48 种, 其中, 鱼类 23 种, 占总种类数的 47.92%; 虾蟹类 21 种, 占 43.75%, 头足类 4 种, 占 8.33%。春季调查共捕获渔业资源 44 种, 其中, 鱼类 32 种, 占总种类数的 72.73%; 虾蟹类 9 种, 占 20.45%, 头足类 3 种, 占 6.82%。夏季调查共捕获渔业资源 50 种, 其中, 鱼类 35 种, 占总种类数的 70.00%; 虾蟹类 11 种, 占 22.00%, 头足类 4 种, 占 8.00%。秋季调查共捕获渔业资源 62 种, 其中, 鱼类 41 种, 占总种类数的 66.13%; 虾蟹类 16 种, 占 25.81%, 头足类 5 种, 占 8.06%。按照重量和数量分别计算了各季度渔获物组成, 结果显示日照海域中渔业资源以鱼类为主, 其次是虾蟹类, 头足类最少(表 3)。

根据渔获物的相对重要性指数来确定日照海域的渔业资源的优势种和重要种。在秋季航次调查中通过底拖网捕获了鱼类、虾蟹类、头足类等渔业资源。其中, 优势种有 5 种, 依次为戴氏赤虾、尖海龙、短蛸、口虾蛄、六丝钝尾虾虎鱼; 捕获重要种有 11 种, 依次为小黄鱼、枪乌贼、矛尾虾虎鱼、鹰爪虾、黄鲛鳀、双斑鲷、丝虾虎鱼、皮氏叫姑鱼、长蛸、三疣梭子蟹、细纹狮子鱼(表 4)。利用稳定同位素技术分析了生物样品的营养级, 再根据不同生态类群物种的营养级及物种在渔获物中的比例, 进行加权计算出鱼类、虾蟹类和头足类的平均营养级分别为 3.85、3.92 和 3.90(表 4)。

3.3 海洋生物资源的自然生产量和承载力评估

根据海洋生物资源的分布区域将其划分为海域中的“鱼、虾蟹和头足类”资源和 10 m 等深线以内的浅海滩涂贝类资源。按照调查海域的年平均初级生产力(以 C 计)为 428.22 mg/(m²·d), 鱼类、虾蟹类和头足类平均营养级分别为 3.85、3.92 和 3.90, 各营养级的生态效率为 15%, 计算出日照市辖区海域鱼类、虾蟹类或头足类资源的年自然生产量分别为 4.12 万 t、3.61 万 t 或 3.75 万 t。根据渔获物的重量比例, 加权平均后的计算出日照海域“鱼类、虾蟹类和头足类”资源的自然生产量为 3.89 万 t 以及最大可持续产量为 1.95 万 t。根据鱼类、虾蟹类和头足类的平均含肉率分别是 67.52%、56.44% 和 71.76%, 渔获物的重量比例(表 4, 鱼类 47.97%、虾蟹类 26.72%、头足类 25.31%)进行加权平均, 计算得到日照市辖区海域“鱼类、虾蟹类和头足类”资源提供的可食水产品量为 1.30 万 t。按照 10 m 等深线以内的浅海 200 多平方千米, 计算年初级产碳量为 3.12 万 t; 贝类年平均有机碳含量为 5.67%, 根据 Tait 沿岸海域能流分析模型计算日照近岸海域的除去壳重的贝类资源自然生产量为 5.50 万 t 以及最大可持续产量为 2.75 万 t。按照中国营养学会推荐的年人均水产品摄入量为 21 kg, 计算出日照市辖区海域鱼类、虾蟹类和头足类资源承载的人口为 61.90 万人, 贝类资源承载的人口为 130.95 万人, 承载力总和为 192.86 万人(表 5)。

根据鱼类、虾蟹类和头足类的蛋白质含量的平均值分别为 17.19%^[20]、18.3%^[22] 和 13.24%^[24], 计算出日照市辖区海域的鱼类、虾蟹类和头足类资源可以为人们提供 2 390.98 t、1869.46 t 和 1871.70 t 的蛋白质; 再根据渔获物的重量比例(表 4, 鱼类 47.97%、虾蟹类 26.72%、头足类 25.31%), 加权平均后的计算出“鱼类、虾蟹类和头足类”资源的年蛋白质供应量为 2 120.19 t。贝类(去壳)的最大可持续产量为 2.75 万 t, 贝类蛋白质含量的平均值为 10.69%^[25], 计算得到贝类

表 4 2016 年 11 月份日照海域渔业资源的优势种及其营养级

Tab. 4 Dominant species and trophic levels of fishery resources in the sea field of Rizhao in November 2016

	种类	W/%	IRI	TL
鱼类	尖海龙(<i>Syngnathus acus</i>)	6.33	2 339	3.51
	六丝钝尾虾虎鱼(<i>Amblychaeturichthys hexanema</i>)	5.92	1 036	3.71
	小黄鱼(<i>Larimichthys polyactis</i>)	9.06	928	3.69
	矛尾虾虎鱼(<i>Chaemrichthys stigmatias</i>)	4.72	625	3.46
	黄鲛鳗(<i>Lophius litulon</i>)	7.94	467	4.29
	六丝矛尾虎鱼(<i>Amblychaeturichthys hexanema</i>)	1.98	293	4.25
	皮氏叫姑鱼(<i>Johnius belangerii</i>)	2.04	235	4.21
	细纹狮子鱼(<i>Liparis tanakae</i>)	3.44	115	4.23
虾蟹类	戴氏赤虾(<i>Metapenaeopsis dalei</i>)	6.72	4 478	3.91
	口虾蛄(<i>Oratosquilla oratoria</i>)	10.12	1 368	4.11
	鹰爪虾(<i>Trachypenaeus curvirostris</i>)	2.41	511	4.06
	双斑蛄(<i>Charybdis bimaculata</i>)	2.35	348	3.39
	三疣梭子蟹(<i>Portunus trituberculatus</i>)	1.48	121	3.31
头足类	短蛸(<i>Octopus ocellatus</i>)	14.67	1 433	3.92
	枪乌贼(<i>Loligo japonica</i>)	3.87	844	3.76
	长蛸(<i>Octopus variabilis</i>)	3.32	228	3.95

注: W%为渔获物的重量比例; IRI为渔获物的相对重要性指数; TL为渔获物的营养级。

表 5 2016 年日照市海洋生物资源的自然生产量及承载力

Tab. 5 The natural production and carrying capacity of marine biology resources in the sea field of Rizhao in 2016

统计项目	平均营养级	年生产量/万t	最大可持续产量/万t	含肉率/%	蛋白质含量/%	可提供的蛋白质量/t	加权平均蛋白质量/t	承载力/万人
鱼类	3.85	4.12	2.06	67.52	17.19	2 390.98		
虾蟹类	3.92	3.61	1.81	56.44	18.30	1 869.46	2 120.19	7.07
头足类	3.90	3.75	1.97	71.76	13.24	1 871.70		
贝类	—	5.50	2.75	—	10.69	2 939.75	2 939.75	9.80

资源可提供的蛋白质量为 2 939.75 t。根据公式(2)和(3),按照年人均摄入蛋白质量 30 kg,计算出日照市辖区海域“鱼类、虾蟹类和头足类”资源能够承载的人口为 7.07 万人,贝类资源承载的人口为 9.80 万人。最后,根据公式(4)计算出日照市海洋生物资源承载力总和为 16.87 万人(表 5)。

4 讨论

4.1 海洋生物资源量评估模型之间的比较分析

海域中的“鱼、虾蟹和头足类”资源具有流动性和季节性的特点,很难准确计算它们的自然生产量。常

用的渔业资源量估算模型有营养动态模型和 Cushing 模型。卢振彬^[27]采用营养动态模型估算厦门附近海域(总面积 2 713 km²)的渔业资源自然生产量为 2.01 万 t(渔业资源密度为 7.41 t/km²)。本文利用营养动态模型估算鱼类、虾蟹类和头足类资源加权平均后的自然生产量为 3.89 万 t(渔业资源密度为 6.48 t/km²),略低于厦门沿岸海域估算的资源密度数值。Cushing 模型指出渔业资源的年产碳量等于 0.01 初级产碳量与 0.1 次级产碳量之和的一半,即 $P=(0.01 \text{ 初级产碳量}+0.1 \text{ 次级产碳量})/2$,计算出日照海域渔业资源的年产碳量为 1.17 万 t。据报道鲜鱼类有机碳含量

为 13.5%, 鲜虾蟹类有机碳含量为 9.50%, 鲜头足类有机碳含量为 5.51%^[27]。按日照海域鱼类、虾蟹类和头足类在资源总生物量中的比率(47.97%、26.72%、25.31%)进行加权计算, 得出平均含碳率为 10.41%, 即 1 t 有机碳换算渔获物鲜重为 9.61 t。最终计算出日照海域渔业资源的年生产量为 11.24 万 t。此数值明显高于根据营养动态模型计算的渔业资源自然生产量, 并且 Cushing 模型没有考虑渔业资源现状。因此, 利用营养动态模型估算的日照海域渔业资源自然生产量更为准确。

贝类养殖容量的估算模型主要有营养动态模型、Tait 沿岸海域能流模型、方建光模型。营养动态模型取决于浮游植物有机碳含量、生态效率和贝类营养级; Tait 沿岸海域能流模型取决于年初级产碳量和贝类有机碳含量; 方建光模型取决于养殖贝类滤水率和非养殖滤食性附着动物栖息密度及其滤水率。利用这 3 种模式估算江苏如东滩涂贝类养殖容量分别为 1.55×10^6 kg/km²、 2.59×10^6 kg/km²、 3.46×10^6 kg/km², 平均值为 2.53×10^6 kg/km² [28]。我们利用 Tait 沿岸海域能流模型估算日照海域的贝类养殖容量为 8.25×10^5 kg/km², 数值低于江苏如东滩涂贝类养殖容量。这主要是由于江苏如东滩涂的初级生产力(以 C 计)为 1 303.51 mg/(m²·d) [28], 是日照近岸海域初级生产力的 3.04 倍。相对而言, Tait 沿岸能流分析模型所需参数较少, 评估结果更接近于 3 个模型的平均值, 适合应用于贝类资源承载力评估。

4.2 承载力评价模型的关键参数率定与误差分析

承载阈值界定与关键参数率定是资源环境承载力研究的核心内容。关键参数率定是影响资源环境承载力定量评价结果的重要限制因素^[1]。利用营养动态模型对资源量进行估算时, 一些参数例如叶绿素 *a* 或初级生产力、营养级等基本上属于海洋环境监测中的常规调查项目, 数据比较容易获取。其中, 初级生产力受到叶绿素 *a*、磷酸盐、亚硝氮、pH 值、光照等多种因子影响。本文采用叶绿素 *a* 法计算日照海域的初级生产力(以 C 计)为 428.22 mg/(m²·d), 略低于 2005 年秋季南黄海初级生产力(以 C 计)的平均值 586 mg/(m²·d) [29]。海域叶绿素 *a* 含量或初级生产力是估算资源自然生产量的首选参数。例如, 对亚利桑那-内华达州边界的米德湖中斑纹贻贝生产容量的研究发现, 当叶绿素 *a* 含量度在最低值时(0.017 μg/L), 该生态系统最多能够支撑 1.02×10^{13} 个成年个体生长^[30]。利用 Schaefer 剩余产量模型估算东北太平洋海域可承载 2.80~25.00 万 t 鲱鱼, 在白令海东部海域可承载

32.50 万 t 鲱鱼^[31]。但是, 按照单位面积来计算, 温哥华西海岸和格鲁吉亚海峡的承载力最高为 9.3~13.8 t/km², 而白令海东部海域的承载力最低为 0.7 t/km²。并且, 单位面积海域的鲱鱼承载力与初级生产力之间存在显著的正线性^[31]。本文基于叶绿素 *a* 含量及初级生产力, 利用营养动态模型计算出日照海域可承载 3.89 万 t 的鱼类、虾蟹类和头足类资源, 以及 5.50 万 t 的贝类资源, 资源密度为 15.65 t/km²。Schaefer 剩余产量模型的估算值表示的是海域现存的资源量, 营养动态模型的估算值是潜在的自然资源生产量, 理论上后者一般要高于前者。

生态效率是本研究中的另一个关键参数。但是, 生态效率不容易准确测定。在实验室中, 可利用放射性同位素 (¹⁴C、³²P 和 ³⁵S)、原素分析 (C、N 和 P)、热量 (卡路里分析) 和个体称重的方法进行分析; 对 16 种浮游动物的生态效率进行分析得出其生态效率的平均值为 26.52% [19]。海域中食物通常不够充足导致生态效率要小于实验室测定的数值, 例如研究发现日本东部海域的生态效率在 5%~22% 之间^[19]。世界大洋区、近岸区及上升流区生态效率的估算值一般分别为 10%、15% 和 20%; 我国海域普遍采用的生态效率值为 15%, 例如对闽东和闽南渔场的生态效率测算值分别为 15.1% 和 16.1% [14, 32]。接下来, 我们也将对生态效率的参数率定方法进行研究, 来进一步提高海洋生物资源承载力评估的准确性。

4.3 海洋生物资源承载力的阈值界定及内涵

资源环境承载力是衡量自然环境与人类社会经济活动之间关系的科学概念。其中, 承载力阈值是资源环境承载能力的一个清晰化表述和量化的管理控制目标^[33]。杨正先等将海洋资源环境承载能力超载阈值定义为: 一定时期和一定区域范围内, 在符合可持续发展需求的情况下, 区域海洋资源和生态环境功能的最低管理要求以及所能承载的社会经济活动的最大能力^[7]。2016 年国家发改委等 13 部委联合下发的《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》中海洋资源环境承载能力包括海域空间资源、海洋渔业资源、海洋生态环境和海岛资源环境四项基础要素。其中, 海洋渔业资源评价主要是表征近岸海洋渔业资源的承载状态, 采用渔业资源综合承载指数评价指标, 通过游泳动物指数(包括渔获物经济鱼类比例、渔获物营养级状况)和鱼卵仔稚鱼指数(包括鱼卵密度、稚鱼密度)加权平均得到。通过设定海洋渔业资源综合承载指数的阈值, 根据综合承载指数的数值大小, 将评价结果划分为超载、临界和可载

3 种类型^[4]。该方法存在不合理的地方,例如根据海洋功能区划要求确定超载阈值在逻辑上存在因果倒置问题,根据环境质量和达标率确定环境承载力超载阈值缺乏足够的科学依据和适用性等^[7]。本研究中的海洋生物资源承载力与上述海洋渔业资源评价不同,我们评价的不是承载状态,而是计算承载“力”或阈值。联合国粮食及农业组织 (FAO) 提出并已被广泛接受的资源承载力定义为:一个国家或地区的资源承载力是指在可以预见的期间内,利用本地能源及其他自然资源和智力、技术等条件,在保证符合其社会文化准则的物质生活水平下,该国家或地区所能持续供养的人口数量^[34-35]。目前,“以多少土地、粮食,养活多少人口”仍是土地资源承载力研究的核心内容。土地资源承载力研究仍普遍被认为是认识土地、人口与食物之间关系和解决人口与资源、环境矛盾的主要途径^[36]。例如,利用能值分析的方法计算了韩国西南海岸的一个无人居住岛屿的承载力,结果表明在保证资源环境可持续发展的前提下能够承载 370 人^[37]。本研究利用营养动态模型法和 Tait 沿岸海域能流模型估算某一辖区海域在特定时间的资源量和最大可捕捞量及其对应的可供养的人口数量。本研究中的海洋生物资源承载力不考虑海洋生物资源跨区域调配和渔业资源本身流动性,这一评估结果其表征的是在当前营养状况和生态环境状况条件下,某一辖区海域的生物承载力的理想值,是对承载力阈值或最大潜力值的评估。本文研究的海洋生物资源承载力传承了经典的土地承载力的概念与内涵,有利于建立陆海统筹的资源环境承载力的监测预警机制。

4.4 海洋生物资源承载力与其他地区的比较

资源环境承载力研究的最终落脚点是解决承载的人口数量和经济规模^[34]。已有一些研究报道利用营养动态模型法,对闽东渔场^[4]、闽中渔场^[15]和闽南—台湾浅滩^[32]等海域等渔业资源生态容量和最大可持续开发量进行估算。例如,卢振彬^[15]利用营养动态模

型估算闽中渔场鱼类资源潜在生产量为 38.59 万 t。本文利用该方法对日照海域的生物资源量进行了估算,其鱼类、虾蟹类、头足类和贝类的年产量为 34.2 万 t。狄乾斌等^[5]根据长海县海洋捕捞与海水养殖产量,计算出 2010 年长海县海洋水产品可以承载 606.2 万人,2020 年可以承载 690.6 万人,远超过当地居民人数。我们通过分析日照辖区海域的生物资源量、生物资源的含肉率和年人均水产品摄入量等关键参数,计算得到日照辖区海域渔业资源所能承载的人口数量是 192.86 万人。至 2016 年底,日照辖区人口数为 299.72 万人。因此,从海洋生物资源能够提供的动物食品的角度出发,在不考虑资源跨区域占用和渔业资源流动性的情况下,当前日照辖区海域自然条件下的生物资源不足以承载目前的人口规模。目前,日照市渔业正从近海走向远海,渔业技术和装备实现质的飞跃,日照市海水养殖面积为 431 km²,以海水工厂化养殖和海水池塘养殖为主,主要养殖类型为牙鲆、鲈鱼、大菱鲆、半滑舌鳎、海参、梭子蟹、日本对虾和南美白对虾等。海水养殖和远洋捕捞将有效增强辖区的渔业资源承载力。

本文基于“资源量-消费量”模型建立了一项海洋生物资源承载力的定量评价技术,共包含 12 项指标。其中,海水叶绿素 *a* 含量、同化系数、海洋生物营养级和浮游植物含碳率以及贝类软组织鲜重含碳率 5 项指标,需要通过具体实验分析来进行参数率定;海水真光层深度、海洋生物含肉率和蛋白质含量 3 项指标通过简单实验即可获得;生态效率的现场分析测试繁琐,可以采用理论值 15%;海域白昼时间的长短、海域面积和年人均水产品消费标准或年人均蛋白质摄入量 4 项指标作为一般性固定值参数。本文建立的海洋生物资源承载力方法可操作性强,可以为陆海统筹的资源环境承载力监测预警工作提供技术支持,并将对科学规划渔业发展空间和促进渔业资源的可持续利用起到积极作用。

参考文献:

- [1] Clarke A L. Assessing the carrying capacity of the Florida Keys[J]. *Population & Environment*, 2002, 23(4): 405-418.
- [2] Graymore M. Journey to sustainability: Small regions, sustainable carrying capacity and sustainability assessment methods[D]. Brisbane: Griffith University, 2005.
- [3] 封志明, 杨艳昭, 江东, 等. 自然资源资产负债表编制与资源环境承载力评价[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7140-7145.
Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Jiang Dong, et al. The compilation of natural resources balance sheets (NRBS) and the evaluation of resources and environment carrying capacity (RECC)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7140-7145.
- [4] 关道明, 张志锋, 杨正先, 等. 海洋资源环境承载能力理论与测度方法的探索[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1241-1247.
Guan Daoming, Zhang Zhifeng, Yang Zhengxian, et al. Research on measuring strategy of carrying capacity of marine resources and environment[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(10): 1241-1247.
- [5] 狄乾斌, 韩增林, 刘锴. 海岛地区人口容量与海洋水产资源承载力初步研究——以大连长海县为例[J]. *中国渔业经济*, 2007, 1(2):

- 28-33.
- Di Qianbin, Han Zenglin, Liu Kai. Primary study on carrying capacity of marine aquatic resources and population capacity in island[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2007, 1(2): 28-33.
- [6] 蔡莉, 王磊. “新东部”渔业资源人口承载力实证分析——以山东省为例[J]. *西北人口*, 2010, 31(4): 41-45.
- Cai Li, Wang Lei. An empirical study of population carrying capacity about Chinese “the new eastern part”: A case study in Shandong[J]. *Northwest Population*, 2010, 31(4): 41-45.
- [7] 杨正先, 张志锋, 韩建波, 等. 海洋资源环境承载力超载阈值确定方法探讨[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 313-319.
- Yang Zhengxian, Zhang Zhifeng, Han Jianbo. Thresholds determination of marine resource and environmental carrying capacity[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 313-319.
- [8] 樊杰, 周侃, 王亚飞. 全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 266-276.
- Fan Jie, Zhou Kan, Wang Yafei. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V2016)[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 266-276.
- [9] 孙悦民, 宁凌. 海洋资源分类体系研究[J]. *海洋开发与管理*, 2009, 26(5): 42-45.
- Sun Yueming, Ning Ling. Research on marine resources classification system[J]. *Ocean Development and Management*, 2009, 26(5): 42-45.
- [10] 杨洋, 刘志国, 何彦龙, 等. 基于非平衡产量模型的海洋渔业资源承载力评估——以浙江省为例[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(4): 534-539.
- Yang Yang, Liu Zhiguo, He Yanlong, et al. The assessment of carrying capacity of marine fishery resources based on the non-equilibrium production model—A case study in Zhejiang province[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(4): 534-539.
- [11] 丁琪, 陈新军, 李纲, 等. 基于渔获统计的西北太平洋渔业资源可持续利用评价[J]. *资源科学*, 2013, 35(10): 2032-2040.
- Ding Qi, Chen Xinjun, Li Gang, et al. Catch statistics and the sustainable utilization of northwest Pacific Ocean fishery resources[J]. *Resources Science*, 2013, 35(10): 2032-2040.
- [12] 张魁, 廖宝超, 许友伟, 等. 基于渔业统计数据的南海区渔业资源可捕量评估[J]. *海洋学报*, 2017, 39(8): 25-33.
- Zhang Kui, Liao Baochao, Xu Youwei, et al. Assessment for allowable catch of fishery resources in the South China Sea based on statistical data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(8): 25-33.
- [13] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- Zhan Bingyi. *Fishery Resources Assessment*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [14] 林法玲. 闽东渔场鱼类资源生态容量和最大可持续开发量[J]. *海洋渔业*, 2004, 26(2): 86-92.
- Lin Faling. The ecological carrying capacity of fish resources and maximum sustainable exploitation on the fishing grounds of East Fjian[J]. *Marine Fisheries*, 2004, 26(2): 86-92.
- [15] 卢振彬. 闽中渔场鱼类资源生产量和最大可持续开发量[J]. *南方水产*, 2006, 2(2): 6-14.
- Lu Zhenbin. The production of fishery resources and the maximum sustained yield in the Min-zhong fishery in Taiwan Strait[J]. *South China Fisheries Science*, 2006, 2(2): 6-14.
- [16] 沈国英, 施秉章. 海洋生态学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1990.
- Shen Guoying, Shi Bingzhang. *Marine Ecology*[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1990.
- [17] Parsons T R, Takahashi M, Hargrave B. *Biological Oceanographic Processes*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1977.
- [18] Cadée G C. Primary production off the Guyana coast[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1975, 9(1): 128-143.
- [19] Ikedal T, Motoda S. Estimated zooplankton production and their ammonia excretion in the Kuroshio and adjacent seas[J]. *Fishery Bulletin*, 1978, 76(2): 357-367.
- [20] 程波, 陈超, 王印庚, 等. 七带石斑鱼肌肉营养成分分析与品质评价[J]. *渔业科学进展*, 2009, 30(5): 51-57.
- Cheng Bo, Chen Chao, Wang Yingeng, et al. Nutritional components analysis and quality evaluation of *Epinephelus septemfasciatus*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2009, 30(5): 51-57.
- [21] 李建军, 郑伟强, 陈小曲, 等. 诸氏鳊虎鱼含肉率及肌肉营养成分分析[J]. *中国比较医学杂志*, 2013, 23(12): 35-39.
- Li Jianjun, Zheng Weiqiang, Chen Xiaoqu, et al. Analysis of nutritional components and flesh content of *Mugilogobius chulae*[J]. *Chinese Journal of Comparative Medicine*, 2013, 23(12): 35-39.
- [22] 王潇, 张继光, 徐坤华, 等. 3种海捕虾肌肉营养成分分析与品质评价[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(8): 209-214.
- Wang Xiao, Zhang Jiguang, Xu Kunhua, et al. Analysis and quality evaluation of nutrition in the muscle of three kinds of marine shrimps[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2014, 40(8): 209-214.
- [23] 许巧倩, 刘俊, 贺利容. 橄榄蛭蚌含肉率及肌肉营养成分分析[J]. *淡水渔业*, 2003, 1(4): 28-29.
- Xu Qiaoqing, Liu Jun, He Lirong. Analysis of meat percentage and muscle nutrient composition of olive clam[J]. *Freshwater Fisheries*, 2003, 1(4): 28-29.
- [24] 黄建盛, 陈刚, 张健东, 等. 野生虎斑乌贼(*Sepia pharaonis*)肌肉主要营养成分分析及评价[J]. *营养学报*, 2014, 36(5): 502-504.
- Huang Jiansheng, Chen Gang, Zhang Jiandong, et al. Analysis and evaluation of main nutritional composition of muscle of wild *Sepia pharaonis*[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2014, 36(5): 502-504.
- [25] 李苹苹. 五种经济贝类的营养成分及蛋白质质量分析[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(15): 99-101.

- Li Pingping. The analysis of nutrient ingredients and protein quality on five economic shellfish[J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(15): 99–101.
- [26] 费尊乐, C.C.TREES, 李宝华. 利用叶绿素资料计算初级生产力[J]. 海洋科学进展, 1997, 10(1): 35–47.
Fei Zunle, C.C.TREES, Li Baohua. Estimating primary productivity using chlorophyll data[J]. *Advances in Marine Science*, 1997, 10(1): 35–47.
- [27] 卢振彬. 厦门海域渔业资源评估[J]. 热带海洋, 2000, 19(2): 51–56.
Lu Zhenbin. Estimation on fishery resources in xiamen coastal waters[J]. *Tropic Oceanology*, 2000, 19(2): 51–56.
- [28] 李磊, 蒋玫, 沈新强, 等. 江苏如东滩涂文蛤养殖区养殖容量[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(5): 752–726.
Li Lei, Jiang Mei, Shen Xinqiang, et al. Culture capacity of *Meretrix meretrix* in mud flats of Rudong, Jiangsu Province[J]. *Marine Environmental Science*, 2014, 33(5): 752–726.
- [29] 郑国侠, 宋金明, 戴纪翠, 等. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 109–118.
Zheng Guoxia, Song Jiming, Dai Jicui, et al. Distributions of chlorophyll a and carbon fixed strength of phytoplankton in autumn of the southern Huanghai Sea waters[J]. *Haiyang Xuebao*, 2006, 28(3): 109–118.
- [30] Cross C L, Wong W H, Che T. Estimating carrying capacity of quagga mussels (*Dreissena rostriformis bugensis*) in a natural system: A case study of the Boulder Basin of Lake Mead, Nevada-Arizona[J]. *Aquatic Invasions*, 2011, 6(2): 141–147.
- [31] Perry R I, Schweigert J F. Primary productivity and the carrying capacity for herring in NE Pacific marine ecosystems[J]. *Progress in Oceanography*, 2008, 77(2/3): 241–251.
- [32] 卢振彬, 戴泉水, 肖方森. 闽南—台湾浅滩海域鱼类资源生产量[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(1): 60–66.
Lu Zhenbin, Dai Quanshui, Xiao Fangsen. Capacity of fish resources in southern Fujian-Taiwan shoal sea area[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(1): 60–66.
- [33] Abernethy V D. Carrying capacity: the tradition and policy implications of limits[J]. *Ethics in Science and Environmental Politics*, 2001(2001): 9–18.
- [34] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379–395.
Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: from theory to practice[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379–395.
- [35] UNESCO & FAO. Carrying capacity assessment with a pilot study of Kenya: a resource accounting methodology for exploring national options for sustainable development[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.
- [36] 封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的土地资源限制性和限制度研究[J]. 地理研究, 2014, 33(8): 1395–1405.
Feng Zhiming, Yang Yanzhao, You Zhen. Research on land resources restriction on population distribution in China[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(8): 1395–1405.
- [37] Nama J, Changa W, Kang D. Carrying capacity of an uninhabited island off the southwestern coast of Korea[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(17): 2102–2107.

The assessment of carrying capacity of marine biology resources based on primary productivity method

—A case study of coastal waters of Rizhao

Liu Shenghao^{1,2}, Zhao Linlin^{1,2}, Liu Wei^{1,2}, Wang Bo^{1,2}, Zhang Zhaohui^{1,2}

(1. Marine Ecology Research Center, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources (Qingdao), Qingdao 266061, China; 2. Marine Ecology and Environmental Science Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: The technical bottlenecks of threshold determination and key parameter calibration in carrying capacity of resources and environment urgently need to be broken through, and then establish a standardized quantitative evaluation method. In the present study, several key parameters such as primary productivity, phytoplankton organic carbon content and trophic level were obtained through investigation and experimental analysis. The nutrition dynamic model and the Tait coastal energy flow model were used to estimate the total quantities of marine biological resources. Then, the threshold of carrying capacity of marine biological resources was calculated based on the “resource-consumption” model. For example, according to the survey results in 2016, the annual average primary pro-

ductivity of sea area under Rizhao jurisdiction was $428.22 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and the annual production of phytoplankton was $9.19 \times 10^6 \text{ t}$. Meanwhile, the average trophic levels of fishes, shrimps and crabs, and cephalopods were 3.85, 3.92 and 3.90, respectively. The annual production of fishery resources (fish, shrimp and crab, and cephalopod) in the sea area was 38.9 thousand tons calculated by the “nutritional dynamic model”. In addition, the shellfish resources in shallow sea within 10 m depth contour was 55 thousand tons calculated by the Tait coastal energy flow model. Thus, according to the annual per capita intake of aquatic products of 21 kg, the total carrying capacity of marine biological resources in Rizhao coastal waters was 1.9286×10^6 people. Meanwhile, according to the annual per capita protein intake of 30 kg, the total carrying capacity of marine biological resources in Rizhao area was calculated to be 1.687×10^5 people. Taken together, this paper describes a quantitative assessment technique with wide applicability for carrying capacity of marine biological resources. This will contribute to substantial utilization of the marine biological resources and establishment of the monitoring and early warning of resources and environment carrying capacity in a way of overall planning of land and sea.

Key words: carrying capacity of resources; marine biology resources; primary productivity; trophic level; trophic dynamic model