DOI: 10.12264/JFSC2020-0509

獐子岛海域虾夷扇贝底播增殖生态容量评估

张紫轩^{1,2},张继红^{2,3},吴文广²,张坤阳²,胡婧⁴,张峰玮⁴

1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306;

2. 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,山东 青岛 266071;

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, 山东 青岛 266071;

4. 中国水产科学研究院信息技术研究中心, 北京 100141

摘要:根据 2017 年和 2018 年辽宁省大连市獐子岛海域渔业资源和生态环境调查数据,利用 Ecopath with Ecosim 6.5 (EwE)软件构建了獐子岛海域 Ecopath 模型,分析獐子岛海域生态系统的营养级结构和能流特征,评估了虾夷扇贝底播增殖的生态容量。结果显示:(1)獐子岛海域生态系统的营养级范围为 1~4.365,最低营养级为浮游植物和有机碎屑,营养级为 1。处于最高营养级为魟鳐类功能组,营养级为 4.365。牧食食物链的各营养级之间的平均转换效率为 6.268%,而碎屑食物链各营养级之间的平均转换效率为 7.698%,系统的能量流动以碎屑食物链为主,总系统转化效率为 6.923%,低于 10%的林德曼转化效率。系统连接指数为 0.219,系统杂食性指数为 0.174,系统 Finn 循环指数为 7.790,系统 Finn 平均路径长度为 2.674,说明系统的能量并没有被充分利用,存在能量传递阻塞的情况。2)根据模型估算得到的虾夷扇贝的生态容量为 36.805 t/km²,是现存量的 17.5 倍;达到生态容量前后獐子岛生态系统的总初级生产量/总呼吸量变化很小(变化值为 0.26),系统杂食性指数和系统连接指数均没有明显变化,对獐子岛生态系统的稳定性和营养结构未产生很大的影响。因此认为虾夷扇贝增殖量尚有很大潜力。

关键词: Ecopath 模型; 虾夷扇贝; 獐子岛; 生态容量 中图分类号: S932 _____ 文献标志码: A _____ 文章编号: 1005-8737-(2021)07-0878-10

虾夷扇贝(Patinopecten yessoensis)属大型优 良海水养殖贝类,为目前世界扇贝科中经济价值 最高的冷水性种类^[1]。自 20 世纪 80 年代引进我 国后,主要在我国的北方海域养殖。辽宁省大连 市獐子岛海域是我国最大的虾夷扇贝底播养殖基 地,近年来养殖规模已由 20 世纪 80 年代的 60 万 亩(约 4 万 hm²)增至 2017 年的 130 万亩(约 8.67 万 hm²)。然而,快速发展的獐子岛海洋牧场出现 了虾夷扇贝大规模死亡现象^[2],底播增殖产业面 临严峻挑战,亟待加强海水养殖环境影响的系统 研究及基于生态系统水平的养殖管理。增养殖种 类和模式单一,往往会导致系统的生物多样性降 低,生态系统脆弱,一旦出现病害等问题,将会 导致灾难性的崩盘。因此,基于生态系统水平的 养殖容量评估应用对于底播增殖型海洋牧场的可 持续发展尤为重要。

关于养殖容量的评估方法目前主要包括简单 的参数指标法、静态能量/饵料收支模型法、数值

收稿日期: 2020-11-04; 修订日期: 2020-12-20.

基金项目:国家自然科学基金项目(41776155, U1906216);山东省重大科技创新工程专项(2018SDKJ0501-3);农业科研杰出人 才及其创新团队培养项目(125A0301);中国水产科学研究院基本科研业务费资助项目(2020B007);中国水产科学研 究院黄海水产研究所基本科研业务费资助项目((20603022015017-2; 20603022019012);国家农业科学渔业资源环境 青岛观测实验站项目(NAES012FS04).

作者简介:张紫轩(1996-),从事海洋牧场监测与容量评估研究, E-mail: zhangzx11123@163.com

通信作者: 张继红, 研究员, 从事海洋生态和容量评估研究. E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

模型法以及基于食物网结构和能量流动的 EWE 模型法等^[3-5]。目前獐子岛海域虾夷扇贝的增殖容 量研究,仅见张继红等采用的参数指标法^[3]以及 赵云霞等使用的数值模型法^[4],未见基于生态系 统水平的生态容量研究报道。

EWE (Ecopath with Ecosim)模型是基于生态 系统水平的较为完善和成熟的模型之一。Ecopath 模型最初由 Polovina^[6]在 1984 年提出,并用于研 究生态系统生物的生物量和食物消耗,后来结合 Ulanowicz^[7]的能量分析生态学理论用齐次线性 方程组评估生态系统能量流动情况,20世纪90年 代 Christensen 等^[8]将这种分析方法发展为个人 计算机应用软件——EWE。Ecopath 模型被认为是 新一代研究水域生态系统的核心工具,已被广泛 用于生态容量评估。

本研究根据 2017 年、2018 年渔业资源和生态环境调查调查数据,利用 Ecopath with Ecosim 6.5 (EwE)软件构建了獐子岛海域 Ecopath 模型,分析了獐子岛海域的营养结构、能量流动以及食物网结构,据此评估虾夷扇贝底播增殖的生态容量,以期为底播贝类的可持续发展提供决策参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究海域

研究海域獐子岛及其邻近海域为虾夷扇贝底 播增殖的主产区,共计设置10个调查站位(图1), 所调查的海域面积为1040.49 km²。



1.2 数据来源

生态环境和渔业资源生物量数据来源于 2017

年9月、2018年9月的现场调查。用于调查的单 拖渔船的马力为150匹(110kW),底拖网具的规 格为:网口高度2.5m,网口宽度8.4m,网口周 长380目,网目63mm,囊网网目20mm。每站 拖网0.5h,拖速5.475km/h,之后通过扫海面积 法^[9]估算得出生物量数据。浮游植物生物量通过 叶绿素a浓度和浮游植物碳含量比值换算^[10],浮 游动物生物量使用浅水I型浮游生物网采集,底 栖生物使用箱式采泥器采集,获得单位为mg/m³ 的浮游动物和底栖动物生物量数据后,根据獐子 岛附近海域平均水深换算成单位为t/km²的生物 量。以上调查方法均依照《海洋调查规范》(GBT 12763.6-2007)进行。有机碎屑生物量根据经验公 式估算得出。

*P/B*参数值等于其瞬时死亡率,瞬时死亡率 等于自然死亡率*M*与捕捞死亡率*F*的总和,可通 过经验公式计算^[11]。鱼类的*Q/B*值根据鱼鳍外形 比的多元回归模型计算^[12]。依据调查数据依据经 验公式以及参考已发表的獐子岛人工鱼礁区模型 参数,并结合渔业数据库(FishBase: https://www. fishbase.de/)确定功能组*P/B*和*Q/B*值。功能组食 物组成矩阵通过碳氮稳定同位素技术、相同纬度 海域鱼类胃含物分析文献数据以及渔业数据库中 食性数据得到的。捕捞量数据来源于渔业统计年 鉴。营养转化效率(ecotrophic efficiency, EE)由模 型计算得出。

1.3 Ecopath 模型原理

Ecopath 模型由一系列生态关联的功能成分 组成,包括浮游植物、浮游动物、有机碎屑以及 鱼类等,可覆盖生态系统中能量流动的全过程。 根据热动力学原理,Ecopath 模型中每一个生物功 能组的能量输入与输出保持平衡,可表示为:生 产量--捕捞死亡量--捕捞量--生物积累量--净迁移量 --其他死亡量=0,数学公式为:

$$B_i \times (P / B)_i \times \text{EE}_i - \sum_{j=1}^n B_j \times (Q / B)_j \times \text{DC}_{ji} - \text{EX}_i = 0$$

其中, *B_i*为功能组 *i* 的生物量; (*P*/*B*)_{*i*}为功能组 *i* 生产量与生物量的比值;EE_{*i*}为功能组 *i* 的生态营 养效率,指该功能组的生产量被生态系统利用的 程度,即被捕食量、渔获量、生物量积累和迁移 量之和占生产量的比例; B_i 为捕食者 j 的生物量; $(Q/B)_i$ 表示捕食者 j 的消耗量与生物量的比值; DC_{ji} 表示被捕食者 i在捕食者 j的食物组成中所占 的比例; EX_i 为功能组 i 的输出量。根据该方程,一 个包含 n 个生物功能组的生态系统的 Ecopath 模 型,需要用 n 个方程进行联立^[13]。

模型包括生物量(B)、生产量与生物量的比值 (P/B 系数)、消耗量与生物量的比值(Q/B 系数)、 生态营养效率(EE)和食物矩阵(DC)5 个参数。已 知其中的 4 个参数, 模型可给出最后 1 个参数。 在 Ecopath 模型运用的研究中, 由于生态营养效 率(EE)很难被直接测定, 通常将该参数作为未知 由模型算出。

1.4 功能组的划分

根据獐子岛附近海域生态系统的生物种类、 生物学特征和食性特点,将模型内生物划分为 20 个功能组。为了对獐子岛及邻近海域虾夷扇贝的 生态容量进行评估,将虾夷扇贝单独设立一个功 能组(表 1)。

表 1	獐子岛及邻近海域 Ecopath 模型的功能组及主要种类组成
~ 1	

Tab. 1 Functional groups and main species composition of Ecopath model in the sea area of Zhangzi Island and adjacent sea

序号	功能组	主要种类
No.	functional group	main species
1	魟鳐类 stingrays	孔鳐 Raja porosa
2	肉食性底层鱼类 carnivorous demersal fish	黄鮟鱇 Lophius litulon、星康吉鳗 Astroconger myriaster
3	鲆鲽类 flatfish	高眼蝶 Cleisthenes herzensteini、黄盖鲽 Pseudopleuronectes yokohamae、角木叶鲽 Pleuronichthys cornutus、石鲽 Platichthys bicoloratus、褐牙鲆 Paralichthys olivaceus、长 吻红舌鳎 Cynoglossus lighti
4	鲉形目鱼类 Scorpaeniformes	绿鳍鱼 Chelidonichthys kumu、绒杜父鱼 Hemitripterus villosus、细纹狮子鱼 Liparis tanakae、许氏平鮋 Sebastes schlegeli
5	石首鱼科鱼类 Shitouidae	白姑鱼 Argyrosomus argentatus、叫姑鱼 Johnius grypotus、小黄鱼 Larimichthys polyactis
6	大泷六线鱼 Hexagrammos otakii	大泷六线鱼 Hexagrammos otakii
7	锦鳚科鱼类 Pholidae	长绵鳚 Enchelyopus elongatus、繸鳚 Azuma emmnion、方氏云鳚 Enedrias fangi
8	其他中上层鱼类 other pelagic fish	鳀 Engraulis japonicus、蓝圆鰺 Decapterus maruadsi 、竹筴鱼 Trachurus japonicus、鲐 Scomber japonicus、蓝点马鲛 Scomberomorus niphonius
9	其他底层鱼类 other demersal fish	多鳞鱚 Sillago sihama、绿鳍马面鲀 Thamnaconus modestus、细条天竺鱼 Apogonichthys lineatus、尖海龙 Syngnathus acus、绯鰤 Callionymus beniteguri、矛尾虾虎鱼 Chaeturichthys stigmatias
10	棘皮动物 Echinodermata	海燕 Asterinidae pectinifera、砂海星 Luidia quinaria、司氏盖蛇尾 Siegophiura sladeni、 紫蛇尾 Ophiopholis mirabilis、陶氏太阳海星 Solaster dawsoni Verrill、萨氏真蛇尾 Ophiura sarsii vadicola
11	头足类 cephalopod	短蛸 Octopus ocellatus、长蛸 Octopus variabilis、日本枪乌贼 Loligo joponica
12	蟹类 crabs	寄居蟹 Pagurus sp.、泥脚隆背蟹 Carcinoplax vestita、隆背黄道蟹 Cancer gibbosulus、 日本蟳 Charybdis japonica、三疣梭子蟹 Portunus trituberculatus
13	虾类 shrimps	脊腹褐虾 Crangon affinis、鹰爪虾 Trachypenaeus curvirostris、中国对虾 Fenneropenaeus chinensis、口虾蛄 Oratosguilla oratoria、戴氏赤虾 Metapenaeopsis dalei
14	虾夷扇贝 Mizuhopecten Yessoensis	虾夷扇贝 Mizuhopecten yessoensis
15	海蜇 Scyphozoa	海蜇 Scyphozoa
16	其他软体动物 other molluscs	腹足类 Gastropoda、双壳类 Lamellibranchia
17	浮游动物 zooplankton	中华哲水蚤 Calanus sinicus、小拟哲水蚤 Paracalanus parvus 等
18	小型底栖动物 zoobenthos	多毛类 polychetes、甲壳类 Crustacea、枝角类 Cladocera 等
19	浮游植物 phytoplankton	硅藻 Bacillariophyta、甲藻 Pyrrophyta 等
20	有机碎屑 detritus	有机碎屑 detritus

1.5 Ecopath 模型调试、可靠性及虾夷扇贝生态 容量评估

Ecopath 模型调试目的是使各功能组的输入 和输出保持平衡即各个功能组的营养转换效率 (EE)均在 0~1 之间。通常对输入参数食物组成矩 阵、P/B 以及 Q/B 等参数进行调整,以获得生态 系统合理的生态学参数。

用 Pedigree 指数的值反映模型的可靠性,通 常 Pedigree 指数数值介于 0.16~0.68 之间,这是 Morissette 等^[14]统计全球 100 多个 Ecopath 模型 Pedigree 指数得出的数值范围。Pedigree 指数是通 过对模型输入参数量化来评价模型的整体质量 ^[15]。每一个输入参数的来源按照其质量分为直接 测定、经验公式估算、来源于其他模型以及来源 于其他参考文献等几个等级,对于 *B、P/B、Q/B* 以及 DC 等参数,不确定性的范围为 0~1。根据每 个功能组的 Pedigree 指数,评价整个 Ecopath模型 的总体质量。Pedigree 指数的计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^{n} \frac{I_{ij}}{n}$$

其中, I_{ij} 表示模型中功能组 *i* 的 Pedigree 指数; *n* 表示总功能组数; *j* 表示 $B \ P/B \ Q/B$ 、渔获量和 食性参数。

虾夷扇贝生态容量评估:根据 Ecopath 模型的原理,不断增加虾夷扇贝的生物量,直到某一功能组 EE 值大于 1,说明系统平衡被破坏,此时的生物量即为虾夷扇贝的生态容量。

2 结果与分析

2.1 獐子岛及邻近海域的营养结构和能流分布

Ecopath 模型的输入参数与调试后的结果见 表 2。各功能组之间的营养转换效率均在 0~1 之 间。獐子岛及其邻近海域的营养级范围为 1~4.37; 最低营养级为浮游植物和有机碎屑,营养级为 1;

:	表 2 3	卓 千 出 海 域 生 る	S系统 Ecopath	i 模型功能组	估计参数	
timation name	motore	of functional	group of Foond	th model of	Thonas 1	aland m

Tab. 2	Estimation	parameters of func	tional g	roup of Ecoj	path model of	Zhangzi Islan	d marine eco	system
	功能组	营养级	生物量/	捕捞量/	生产量/生物量	消耗量/生物量	营养转化效率	生产量/消耗量
	-7110-11		() (1 (2))	() 1 0)	• • /	.• /		• • • •

功能组 function group	trophic level	(t/km ²) biomass	(t/km ²) fishing amount	production/ biomass	consumption/ biomass	ecotrophic efficiency	production/ consumption
魟鳐类 Stingrays	4.37	0.057	0	0.813	5.67	0.00	0.14
肉食性底层鱼类 carnivorous demersal fish	4.16	0.043	0	0.58	5.19	0.00	0.11
鲆鲽类 flatfish	3.88	0.178	0	1.55	7.05	0.13	0.22
鲉形目鱼类 Scorpaeniformes	4.00	0.401	0	1.22	4.53	0.00	0.27
石首鱼科鱼类 Shitouidae	3.72	0.081	0	2.46	7.94	0.49	0.31
大泷六线鱼 Hexagrammos otakii	3.88	0.258	0.0572	1.04	4.49	0.33	0.23
锦鳚科鱼类 Pholidae	3.25	0.697	0	1.23	6.20	0.42	0.20
其他中上层鱼类 other pelagic fish	3.27	0.798	0	3.23	10.32	0.52	0.31
其他底层鱼类 other demersal fish	3.43	0.831	0.56	2.97	7.67	0.68	0.39
棘皮动物 Echinodermata	2.89	4.060	0	1.5	6.20	0.00	0.24
头足类 cephalopod	2.97	2.580	0	3.34	12.60	0.12	0.27
蟹类 crabs	2.88	3.590	0.618	7.95	22.80	0.19	0.35
虾类 shrimps	2.61	3.970	0.469	7.98	26.50	0.36	0.30
虾夷扇贝 Mizuhopecten yessoensis	2.22	2.105	0.941	5.21	22.60	0.77	0.23
海蜇 Scyphozoa	2.97	8.056	0	6.8	23.20	0.19	0.29
其他软体动物 other molluscs	2.22	2.675	0	6.75	18.50	0.00	0.36
浮游动物 zooplankton	2.11	23.300	0.965	25.98	120.00	0.74	0.22
小型底栖动物 zoobenthos	2.00	39.200	0	12.2	53.30	0.37	0.23
浮游植物 phytoplankton	1.00	45.440	0	140		0.44	
有机碎屑 detritus	1.00	114.750	0			0.37	

2 \

最高营养级为魟鳐类功能组,营养级为 4.37。主要经济鱼类的营养级范围在 2.222~3.884, 虾夷扇贝的营养级为 2.222。

经过营养级聚合,将獐子岛及其邻近海域的所 有功能组合并至 6 个营养级上,各个营养级能流分 布情况见表 3。营养级 I 和营养级 II 的流量分别为 11570 t/km² 和 4777 t/km²,分别占系统总流量的

		e	osystem of Zhangzi Island
	Tał	b. 3	Distribution of energy flow in the
表	3	獐子	岛及其邻近海域生态系统能流分布

					t/(km ·a)
营养级 trophic level	被捕食量 consumption by predators	输出量 export	流向碎屑量 flow to detritus	呼吸量 respiration	系统总流量 throughput
VI	0.000187	0.000122	0.00923	0.015	0.0246
V	0.0246	0.0127	0.493	0.676	1.206
IV	1.206	0.288	9.923	11.47	22.88
III	22.88	1.249	153.8	178.7	356.6
II	356.6	2.06	1508	2910	4777
Ι	4777	3257	3535	0	11570
总计	5158	3260	5208	3101	16728
sum					



0 no data invalid

5

68.1%和 28.1%,此两个营养级流量之和占系统总 流量的 96.2%。随着营养级的不断升高,总流量下 降明显而且是逐级递减的,符合能量金字塔的规 律。除了营养级 I 和营养级 II 以外的所有营养级 流量仅占系统总流量的 3.8%。营养级 I 流向碎屑 的量为 3535 t/km²,占总流向碎屑量的 67.9%,营 养级 II 流向碎屑的量为 1508 t/km²,占总流向碎 屑量的 29%。表明生态系统对营养级 I 的能量利 用不充分,大部分的能量都以碎屑的形式流失。 营养级 I 被摄食量占总被摄食量的 92.6%,属于营 养级 I 的有机碎屑和浮游植物是系统能量的主要 来源。

2.2 獐子岛生态系统食物网结构

獐子岛生态系统模型能量通道示意图(图 2)。 图中每一个圈代表一个功能组,圈的大小表示功 能组生物量的大小,圆圈之间的连线表示不同功 能组之间的能量传递过程。根据此示意图,可以 看出獐子岛生态系统的两条能量流动通道,一条 是始于浮游植物的牧食食物链,另一条是始于有 机碎屑的碎屑食物链。



图 2 獐子岛海域生态系统能量通道示意图 Fig. 2 Energy flow diagram in the Zhangzi Island ecosystem Ecopath model

獐子岛海域生态系统各营养级转换效率见表 4。从表 4 可以看出,每一营养级的营养转换效率 均低于 10%的林德曼转换效率。其中, 牧食食物 链的各营养级之间的平均转换效率为 6.923%, 碎 屑食物链的平均转换效率为 7.698%, 高于牧食食物链。说明该生态系统的能量流动以碎屑食物链为主。低营养级的营养转换效率要高于高营养级, 营养转换效率最高的是营养级 Ⅰ 到营养级 Ⅱ, 营 养转换效率为 7.507%; 最低的是营养级 V 到营养 级 VI, 营养转换效率仅有 1.258%, 可见, 营养级 V 到 VI 之间存在着能量传递阻塞不畅通。

	levels in Zhangzi Island ecosystem
Tab. 4	Conversion efficiency of various trophic
表 4	獐子岛生态系统各个营养级转换效率

来源/营养级 source/prophic level	II	III	IV	V	VI
生产者 producer	6.830	6.257	5.763	2.995	2.006
有机碎屑 detritus	8.487	7.362	7.302	3.164	0.673
总流量 all flows	7.507	6.768	6.530	3.086	1.258
有机碎屑占总能流比	0.44				
转化效率 transfer efficiencies					
初级生产者转化效率/% primary producers transfer efficiencies	6.268				
有机碎屑转化效率/% detritus transfer efficiencies	7.698				
系统转化效率/% total transfer efficiencies	6.923				

2.3 虾夷扇贝底播增殖的容量评估

运用 Ecopath 模型评估虾夷扇贝底播增殖的 生态容量。虾夷扇贝是獐子岛海域的主要增殖品 种,作为滤食性贝类,主要以浮游植物和有机碎 屑为食物,与浮游动物存在食物竞争关系。为了 解虾夷扇贝在獐子岛海域的养殖生态容量,将其 单独作为一个功能组建立模型。增加虾夷扇贝的 生物量,其他功能组的营养转换效率(EE)变化微 小,但对浮游动物功能组的 EE 产生较大的影响 (表 5),当生物量增加到原来的 17.5 倍时,浮游动 物功能组的营养转换效率(EE)达到 1,若继续增 加虾夷扇贝生物量,将会出现浮游动物功能组 EE 大于 1 的情况,系统平衡被破坏。因此认为,虾夷 扇贝生物量增加到 17.5 倍时达到生态容量,为 36.805 t/km²。

表 5 虾夷扇贝生物量增加对浮游动物营养 转换效率(EE 值)的影响

Tab. 5	Effects of increasing Yesso scallop
biom	ass on EE values of zooplankton

倍数 biomass increased multiple	虾夷扇贝生物量/(t/km²) biomass of Yesso scallop	浮游动物 EE 值 EE values of zooplankton
1	2.105	0.741
2	4.210	0.756
5	10.525	0.804
10	21.050	0.882
15	31.575	0.961
17.5	36.805	1.000

采用参数指标法^[3]、数值模型法^[4]及本文的食物网模型法对獐子岛及其邻近海域虾夷扇贝底播 增殖容量进行评估。按照收获时虾夷扇贝的 108 g、 回捕率 8% 对容量结果进行标准化处理,得到不 同评估方法的獐子岛海域虾夷扇贝的生产容量和 生态容量结果(表 6)。

	表 6	不同方式评估虾夷扇贝底播增殖的生态容量的结果
Tab. 6	Ecological carrying	apacity results of different evaluating methods for Yezo scallop bottom culture

	e 1 e 1 i		8	1
年份 year	生态容量/(ind/hm ²) ECC	评估面积/hm ² assessment area	评估方法 assessment method	参考文献 references
2005	80000	3500	参数指标法	[3]
2014-2015	60000-105000	119000	数值模型法	[4]
2017-2018	43000	138000	EWE 模型法	本文 this study

当前及虾夷扇贝达到生态容量时的獐子岛海 域生态系统总体特征参数见表 7。当前,獐子岛生 态系统的总消耗量为 5438.414 t/(km²·a),总输出量 为 3260.386 t/(km²·a),总呼吸量为 3101.213 t/(km²·a), 流向碎屑的量为 5207.979 t/(km²·a),分别占系统 总流量的 32.0%、19.2%、18.3%和 30.6%。下面 的 4 个特征参数可以用来衡量生态系统的成熟度, 总初级生产量/总呼吸量、系统净生产量、总初级 生产量/总生产量以及总生物量/总流量,它们的 数值分别为 2.05、3260.386 t/(km²·a)、46.0 以及 0.008。系统连接指数为 0.219, 系统杂食性指数为 0.174, 系统 Finn 循环指数为 7.790, 系统 Finn 平 均路径长度为 2.674, 以上 4 个特征参数可以分析 生态系统的食物网结构。虾夷扇贝生物量增至生态 容量时, 系统总流量由原来的 17007.99 t/(km²·a)增

长至 17737.73 t/(km²·a), 增长了 4.3%, 总生产量也 由原来的 7611.118 t/(km²·a)增长至 7791.905 t/(km²·a), 增长了 2.4%。大部分特征参数无显著性变化。可 见, 虾夷扇贝的生物量增加至生态容量时, 对獐 子岛海域生态系统的稳定性无显著性影响。

	表 7	虾夷扇贝达到生态容量时獐子岛海域总体特征参数
Tab. 7	Summary statist	ics of Zhangzi Island as Yezo scallop reaches ecological carrying capacity

参数 parameter	当前数值 values at present	达到生态容量时数值 values under ECC	
总消耗量 sum of all consumption	5438.414	6222.634	
总输出量 sum of all exports	3260.386	2813.797	
总呼吸量 sum of all respiratory flows	3101.213	3547.802	
流向碎屑量 sum of all flows into detritus	5207.979	5153.5	
系统总流量 total system throughput	17007.99	17737.73	
总生产量 sum of all production	7611.118	7791.905	
渔获物平均营养级 mean trophic level of the catch	2.568	2.568	
总效率(捕捞量/净初级生产量) gross efficiency (catch/net p.p.)	0.00056	0.0006	
总初级生产量 calculated total net primary production	6361.6	6361.6	
总初级生产量/总呼吸量 total primary production/total respiration	2.05	1.79	
系统净生产量 net system production	3260.386	2813.797	
总初级生产量/总生产量 total primary production/total biomass	45.992	36.768	
总生物量/总流量 total biomass/total throughput	0.00813	0.00975	
总生物量 total biomass (excluding detritus)	138.32	173.02	
总捕捞量 total catch	3.610	19.139	
系统连接指数 connectance index	0.219	0.219	
系统杂食性指数 system omnivory index	0.174	0.175	
系统 Finn 循环指数 Finn's cycling index	7.790	7.997	
系统 Finn 平均路径长度 Finn's mean path length	2.674	2.714	

注: 表中的各项指数无单位, 其他参数的单位为 t/(km²·a).

Note: The Parameters in the table have no unit; the unit of other parameters is $t/(km^2 \cdot a)$.

3 讨论

3.1 獐子岛海域生态系统特性

建立的 Ecopath 模型可量化獐子岛海域生态 系统结构特性和能量流动特性。通常,总初级生 产量/总呼吸量(TPP/TR)是衡量系统成熟度的指 标,在生态系统发育的初期,一般总初级生产量 大于总呼吸量,故 TPP/TR 大于 1;若 TPP/TR 小 于 1,说明该系统可能受到污染;TPP/TR 的数值 越接近于 1,说明该生态系统越稳定^[16-17]。獐子岛 生态系统的 TPP/TR 值为 2.05,说明该生态系统 处于发育阶段,系统成熟度不高。许祯行等^[18]依 据 2010—2012 年的调查结果, 建立了獐子岛鱼礁 区 Ecopath 模型, 结果发现生态系统 TPP/TR 值 为 2.291, 与本结果相近。

系统连接指数(CI)和系统杂食性指数(SOI)是 衡量生态系统食物网内部复杂程度的指标,这两 个值越接近 1,说明食物网结构越复杂,系统成 熟度越高,系统越稳定^[19]。獐子岛生态系统的 CI 和 SOI 值分别为 0.219 和 0.174,都远小于 1,说 明该生态系统食物网结构相对简单,功能组之间 联系并不密切,系统成熟度较低。我们搜集了有 关獐子岛海域生态系统 CI 值和 SOI 值的有关研究 报道(表 8)。

表 8 獐子岛附近海域生态系统不同年份 CI 和 SOI 值对比 Tab. 8 Comparison of CI and SOI values of Zhangzi Island ecosystem in different years

参数 parameter	2010 ^[18]	2011 ^[18]	2012[18]	2019
系统连接指数 connectance Index	0.203	0.209	0.214	0.219
系统杂食性指数 system Omnivory Index	0.136	0.139	0.172	0.174

比较发现, 獐子岛生态系统 CI 和 SOI 值均有 逐年升高的趋势, 说明系统为发育型生态系统, 食物网结构正在复杂化, 生态系统的稳定性在逐 年增强。鉴于发育型生态系统对外界干扰的抵抗 能力较弱, 故对海区主要的增殖和捕捞物种的增 殖量和捕捞强度, 应以生态容量为指导, 以保障 系统资源的可持续发展。

3.2 虾夷扇贝底播增殖的生态容量

本文 Pedigree 指数为 0.463,在已有研究报道 的范围之内,说明本文建立的模型具有较好的可 信度和较强的可靠性。Inglis 等^[20]提出的容量概 念是普遍接受、应用较多的一种,他将贝类的养 殖容量分为物理容量(physical carrying capacity)、 生产容量(production carrying capacity)、生态容量 (ecological carrying capacity)和社会容量(social carrying capacity)。生产容量定义为贝类产量达到 最大时的可养密度;生态容量是指养殖贝类不对 生态系统健康的某些衡量指标产生显著影响的放 养密度。目前养殖容量评估方法包括简单的参数 指标法、静态能量/饵料收支模型、数值模型法以 及食物网模型法等。由于采用的评估方法、指标 体系的差异,使得容量评估结果缺少可比性。

根据表 8 结果,我们发现不同评估方式获得 的獐子岛及其邻近海域虾夷扇贝底播增殖的生态 容量在同一数量级内,但是也存在一定的差异。 滤食性贝类以天然的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、悬浮颗粒有机物的浓度、养殖 区与外界水交换情况等密切相关。食物通常为贝 类养殖容量的限制指标^[21]。参数指标法和生态系 统动力学模型法都是以食物作为限制性指标。而 食物网模型法 EWE 考虑了整个系统的食物网结 构和物质能量流动,是基于生态系统水平的一种 容量评估方法,不仅考虑虾夷扇贝对浮游植物初 级生产的下行控制,同时也考虑了对浮游动物的 食物竞争作用。因此,EWE法给出的生态容量低 于参数指标法和数值模型法的结果。另外,以养 殖容量并非是一个稳定的常数,会随环境条件的 变化而变化,具有明显的动态性。我们采用的 3 种方法所用的数据来源日期不同,环境条件和评 估海域的范围(图 3,表 8)都存在一些差异,这会 导致容量评估结果存在一定的变化。



蓝色虚线围成的区域为本文调查区域; 红色虚线区域为张继 红等^[3]2005 年调查区域; 绿色区域为 Zhao 等^[4]调查区域. Fig. 3 Sea areas selected by different ECC assessment methods The area enclosed by the blue dotted line in the figure is the survey area of this article; the red dotted line is the survey area of Zhang et al^[3]; the green area is the survey area of Zhao et al^[4].

从本文的结果来看, 獐子岛海域虾夷扇贝的 现存生物量为 2.105 t/km², 增加 17.5 倍可达到生 态容量, 尚有很大的发展潜力。当然, 虾夷扇贝底 播增殖时需要考虑底质类型, 评估海域中并非所 有底质条件都适合底播。另外, 需要注意的是当 底播区域比较集中时, 虽然整体上没有超过生态 容量, 但是集中增殖的区域可能会出来局部的食 物限制。可以采用系统水平的食物网模型与局部 区域的参数指标法相结合的方式, 以保障整个系 统的可持续发展和局部区域的食物供给充足。

参考文献:

[1] Wang Q C. Introduction of Yezo scallops and its prospects for increasing cultivation in northern my country[J]. Fisheries

- Yu Z A, Li W J, Zhang M, et al. Identification of possible pathogenic factors of massive mortality and its epidemiological investigation of cultured scallop (*Patinopecten yessoensis*)[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(6): 52-57. [于佐安, 李文姬, 张明, 等. 虾夷扇贝大规 模死亡的流行病学研究及可能致病因子的探讨[J]. 中国 海洋大学学报: 自然科学版, 2013, 43(6): 52-57.]
- [3] Zhang J H, Fang J G, Wang S H. Carrying capacity for Patinopecten yessoensis in Zhang Zidao Island, China[J]. 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[J]. 水产学报, 2008, 32(2): 236-241.]
- [4] Zhao Y X, Zhang J H, Lin F, et al. An ecosystem model for estimating shellfish production carrying capacity in bottom culture systems[J]. Ecological Modelling, 2019, 393: 1-11.
- [5] Jiang W M, Gibbs M T. Predicting the carrying capacity of bivalve shellfish culture using a steady, linear food web model[J]. Aquaculture, 2005, 244(1-4): 171-185.
- [6] Polovina J J. Model of a coral reef ecosystem[J]. Coral Reefs, 1984, 3(1): 1-11.
- [7] Ulanowicz R E. Growth and Development: Ecosystems Phenomenology[M]. New York: Springer, 1986.
- [8] Christensen V, Walters C J, Pauly D. ECOPATH with ECOSIM: A user's guide[R]. Vancouver: Fisheries Centre, University of British Columbia, 2005.
- [9] Huang L M, Li J, Zhang Y Z, et al. Current fishery resource assessment in the Minjiang River Estuary and its neighboring waters[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(5): 142-148. [黄良敏, 李军, 张雅芝, 等. 闽江口及附近海域渔 业资源现存量评析[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(5): 142-148.]
- [10] Sun J. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for marine phytoplankton and its relative conversion biomass[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. [孙军. 海洋浮游植物细胞体积和表面积模型及其转 换生物量[D]. 青岛:中国海洋大学, 2004.]
- [11] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters and mean environmental temperature in

175 fish stocks[J]. ICES Journal of Marine Science, 1980, 39(2): 175-192.

- [12] Palomares M L D, Pauly D. Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity[J]. Marine and Freshwater Research, 1998, 49(5): 447.
- [14] Morissette L, Hammill M O, Savenkoff C. The trophic role of marine mammals in the northern gulf of St. Lawrence[J]. Marine Mammal Science, 2006, 22(1): 74-103.
- [15] Christensen V, Walters C J. Ecopath with Ecosim: Methods, capabilities and limitations[J]. Ecological Modelling, 2004, 172(2-4): 109-139.
- [16] Abdul W O, Adekoya E O. Preliminary Ecopath model of a tropical coastal estuarine ecosystem around bight of Benin, Nigeria[J]. Environmental Biology of Fishes, 2016, 99(12): 909-923.
- [17] Odum E P. The strategy of ecosystem development[J]. Science, 1969, 164(3877): 262-270.
- [18] Xu Z X, Chen Y, Tian T, et al. Structure and function of an artificial reef ecosystem in Zhangzi Island based on Ecopath model[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2016, 31(1): 85-94. [许祯行, 陈勇, 田涛, 等. 基于 Ecopath 模型的獐 子岛人工鱼礁海域生态系统结构和功能变化[J]. 大连海 洋大学学报, 2016, 31(1): 85-94.]
- [19] Christensen V, Pauly D. A guide to the ECOPATH II software system (version 2.1)[J]. ICLARM Software, 1992, 6: 1-72.
- [20] Inglis G J, Hayden B J, Ross A H. An overview of factors affecting the carrying capacity of coastal embayments for mussel culture[R]. Christchurch: NIWA, 2000.
- [21] Zhang J H, Lin F, Fang J G. Carrying capacity assessment and its application in mariculture management[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 85-89. [张继红, 蔺凡, 方建光. 海水养殖容量评估方法及在养殖管理上的应用[J]. 中国 工程科学, 2016, 18(3): 85-89.]

Ecological carrying capacity assessment of bottom-culture Yesso scallops, *Patinopecten yessoensis*, in Zhangzi Island

ZHANG Zixuan^{1, 2}, ZHANG Jihong^{2, 3}, WU Wenguang², ZHANG Kunyang², HU Jing⁴, ZHANG Fengwei⁴

1. School of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

- 2. 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, China;
- Qingdao Marine Science and Technology Pilot National Laboratory, Marine Fisheries Science and Food Production Process Functional Laboratory, Qingdao 266071, China;
- 4. Information Technology Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141, China

Abstract: The Yesso scallop, Patinopecten yessoensis, is a large-scale fine marine cultured shellfish and is currently the most economically valuable cold-water species in the scallop family in the world. Since it was introduced to China in the 1980s, it has been mainly cultivated in the northern waters. Zhangzi Island is China's largest scallop bottom sowing base, where the scale of cultivation has increased from 600,000 mu in the 1980s to 1.3 million mu in 2017. However, the rapid development of Zhangzi Island Marine Ranch has seen the large-scale death of Yesso scallops, and the bottom sowing industry is facing extremely severe challenges. We aimed to strengthen systematic research on the environmental effect of mariculture and investigate the sustainable development of bottom-seeded multiplication marine ranches. The existing methods for evaluating the ecological capacity of the Yesso scallop on Zhangzi Island include the parameter index method and the numerical model method. In this study, we used Ecopath with Ecosim 6.5 (EwE) software to construct the Ecopath model of the Zhangzi Island sea area and analyzed the trophic structure and energy flow characteristics of the Zhangzi Island sea ecosystem, as well as evaluated the ecological capacity of the bottom sowing and proliferation of Yesso scallops. The results indicated that 1) the trophic level of the Zhangzi Island marine ecosystem was between 1 and 4.365. The lowest trophic level of one was occupied by phytoplankton and organic debris. The highest trophic level was the stingray functional group with a trophic level of 4.365. The average conversion efficiency between the trophic levels of the grazing food chain was 6.268% and the average conversion efficiency between the trophic levels of the detritus food chain was 7.698%. The energy flow of the system was predominantly the detritus food chain. The total system conversion efficiency was 6.923%, and the Lindemann conversion efficiency was lower than 10%. The system connection index was 0.219, the system omnivorous index was 0.174, the system Finn cycle index was 7.790, and the average path length of the Finn system was 2.674, indicating that the energy of the system was not fully utilized and there was a case of energy transmission blocking. Comparing our results with those of previous Ecopath model data for Zhangzi Island ecosystem, it was found that these values have increased annually, indicating that the ecosystem is in a state of continuous development. 2) The ecological capacity of the Yesso scallop estimated by the model was 36.805 t/km², 17.5 times higher than that of the existing stock; the total primary production/total respiration of the Zhangzi Island ecosystem before and after reaching ecological capacity exhibited little (0.26) change, the system omnivorous index and the system connection index did not change significantly and, thus, did not have a significant effect on the stability and nutritional structure of the Zhangzi Island ecosystem. Therefore, there is still great potential for the growth of the Yesso scallop population on Zhangzi Island.

Key words: Ecopath model; *Patinopecten yessoensis*; Zhangzi Island; ecological carrying capacity Corresponding author: ZHANG Jihong. E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn