

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210924001

http://www.yykxjz.cn/

丁夏阳, 孙昕, 董建宇, 詹启鹏, 张宗航, 张镇, 申丰源, 张沛东, 张秀梅. 莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区生态系统能量流动及仿刺参生态容量评估. 渔业科学进展, 2023, 44(1): 13-23

DING X Y, SUN X, DONG J Y, ZHAN Q P, ZHANG Z H, ZHANG Z, SHEN F Y, ZHANG P D, ZHANG X M. Assessment of ecosystem energy flow and ecological capacity of *Apostichopus japonicus* in the Furong Island artificial reef, Laizhou Bay. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(1): 13-23

# 莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区生态系统能量 流动及仿刺参生态容量评估\*

丁夏阳<sup>1</sup> 孙昕<sup>1</sup> 董建宇<sup>1</sup> 詹启鹏<sup>1</sup> 张宗航<sup>1</sup>  
张镇<sup>1</sup> 申丰源<sup>1</sup> 张沛东<sup>1</sup> 张秀梅<sup>2,3①</sup>

(1. 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室 山东 青岛 266003;

2. 浙江海洋大学水产学院 浙江 舟山 316022;

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 266237)

**摘要** 基于2019年莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区渔业资源调查数据,利用Ecopath with Ecosim 6.6 (EwE 6.6)软件构建了芙蓉岛人工鱼礁区生态系统Ecopath模型,系统分析了芙蓉岛人工鱼礁区生态系统的能量流动规律和结构特征,估算了仿刺参(*Apostichopus japonicus*)的生态容量。Ecopath模型由16个功能组组成,基本涵盖了芙蓉岛人工鱼礁区生态系统能量流动的主要过程。结果发现,生态系统各功能组的营养级范围为1.000~3.978,其中,花鲈(*Lateolabrax maculatus*)处于最高营养级;生态系统总转换效率为10.6%,来自初级生产者的转换效率为10.8%,来自碎屑的转换效率为10.1%;生态系统总流量为2 596.108 t/(km<sup>2</sup>·a),其中44%来自碎屑;系统总初级生产量/总呼吸量为1.454,连接指数为0.402,系统杂食指数为0.211, Finn's 循环指数和平均路径长度分别为8.860%和2.980。结果表明,芙蓉岛人工鱼礁区生态系统成熟度和稳定性较低,食物网结构较简单。根据模型计算得出,仿刺参的生态容量为131 t/km<sup>2</sup>,是现存量的6.55倍,具有较大的增殖潜力。

**关键词** 芙蓉岛; 人工鱼礁; Ecopath模型; 生态容量

**中图分类号** S953.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)01-0013-11

人工鱼礁是指在水域中设置的人工设施,可作为海洋生物索饵、繁殖和生长发育的场所,在改善海域生态环境、增加渔业资源等方面效果显著(陈勇等, 2002)。近年来,我国人工鱼礁建设速度较快,但建设后的生态效果评价明显滞后,人工鱼礁所产生的生态资源效应尚不明确,人工鱼礁区缺乏科学合理的渔

业管理。因此,亟需对人工鱼礁的生态效果进行科学分析(林承刚等, 2021)。人工鱼礁区生态环境复杂,评价方法也不尽相同。尹增强等(2012)以鱼礁的自然特征、流场效应、水质与底质、饵料生物、鱼类与大型无脊椎生物5个方面作为评价标准,建立指标体系对人工鱼礁生态效果进行评价。李娇等(2018)采用模

\* 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0901303)和浙江省重点研发计划项目(2021C02047)共同资助。丁夏阳, E-mail: dxy178062@163.com

① 通信作者: 张秀梅, 教授, E-mail: xiumei1227@163.com

收稿日期: 2021-09-24, 收修改稿日期: 2021-10-08

糊综合评价法、层次分析法、综合健康指数模型对北戴河人工鱼礁区和对照海区生态系统健康状况进行评价,结果表明生态效果良好。Islam等(2014)通过比较鱼礁投放前后的渔获量,测算出人工鱼礁的直接经济效益。近年来,国内学者逐渐使用生态通道模型(Ecopath)对人工鱼礁区进行科学评价。

Ecopath模型是利用营养动力学基本原理,基于生态系统水平对系统内食物网关系进行描述的能量平衡模型,可以反映某一特定水域生态系统的稳定性、成熟度等特征(黄孝锋等,2011)。Ecopath模型是海洋生态系统研究中应用最为广泛的一种模型软件,适用于人工鱼礁区生态系统研究。近年来,国内外学者应用Ecopath模型对不同水域生态系统进行了科学评价。2002年哥伦比亚大学渔业中心采用Ecopath模型构建了香港人工鱼礁区生态系统模型,并进行生态经济效应评价和政策模拟(Pitcher *et al*, 2002)。Frisk等(2011)利用Ecopath模型评估了美国特拉华湾(Delaware Bay)沼泽恢复带来的生物量收益。赵静等(2010)应用Ecopath模型评估了枸杞岛海藻场的生态系统状况。陈作志等(2010)应用Ecopath模型分析了南海北部海洋生态系统的食物网结构、能量流动和系统总体特征。然而,关于Ecopath模型的研究主要集中在对水域生态系统的发育程度、结构功能等方面,国内外利用Ecopath模型在人工鱼礁区生态效应评价、生态承载力评估等方面的研究较少,鲜有关于渔业管理模式的探讨。

芙蓉岛人工鱼礁区位于山东烟台莱州太平洋湾海域明波海洋牧场,该海域现已建成人工鱼礁区4处,累计投放人工鱼礁约35.675万 $m^3$ 。该人工鱼礁区以仿刺参底播增殖为主,研究表明芙蓉岛人工鱼礁的建

设改善了当地海域的初级生产力和生态环境(王新萌等,2019;陈传曦等,2021)。然而,对该海域增殖生物仿刺参的生态容量和生态系统健康状况等相关研究还未见报道。本研究根据2019年夏季、秋季莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区的水体理化环境和渔业资源调查数据,构建该生态系统的Ecopath模型,探讨人工鱼礁区生态系统的能量流动和物质循环规律,分析其稳定性和成熟度,进一步评估人工鱼礁区增殖生物仿刺参的生态容量,并提出合理的捕捞管理策略,旨在为人工鱼礁区生态效果评价和海洋牧场可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究海域概况

研究区域位于莱州湾芙蓉岛北侧和东侧的4处人工鱼礁区(37°17'~37°20'N, 119°48'~119°52'E)(图1),礁区总面积为6.26 $km^2$ ,平均水深为3m。其中,礁区A和礁区B建设时间为2018年5—8月,由9万 $m^3$ 石块礁和0.8万 $m^3$ 方形钢混构件礁组成。礁区C和礁区D的建设时间为2013—2014年,由18.625万 $m^3$ 的石块礁和7.25万 $m^3$ 的管状混凝土构件礁组成。于2019年夏季(6月)和秋季(9月和10月)开展了3次人工鱼礁区渔业资源调查。研究区域共设置34个调查站位,4处礁区根据面积大小分别设置5~12个站位,礁区外设置7个站位。渔业资源调查使用拖网(仅非礁区)、流刺网、地笼网等渔业捕捞工具,用于渔业调查的拖网渔船船速为2节,拖网网口宽2m,拖网时间20min;流刺网高1.5m、长30m,放置时间1d;地笼网宽30cm、高16cm、长7m,放置时间1d。样品的处理、鉴定和

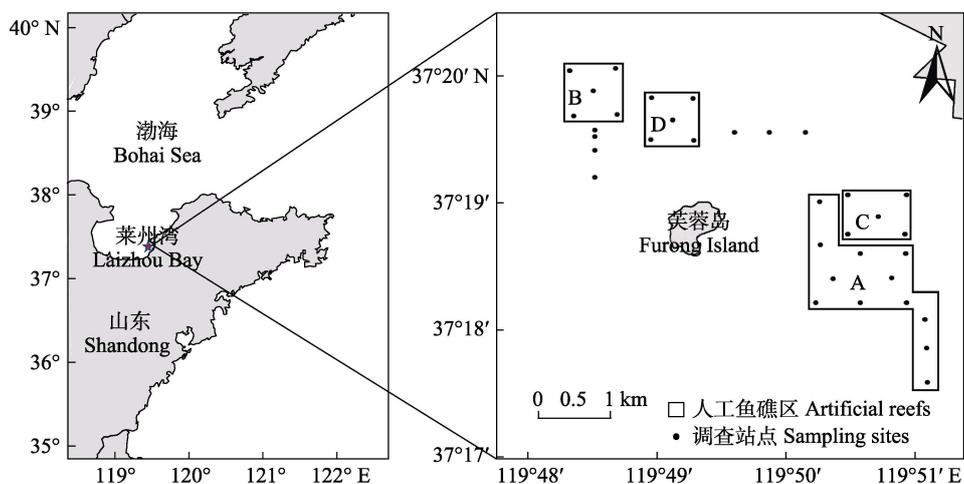


图1 芙蓉岛人工鱼礁区调查站位

Fig.1 Sampling sites of Furong Island artificial reefs

称重均按《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)进行。

## 1.2 Ecopath 模型的建立

**1.2.1 功能组划分** Ecopath 模型由生态系统中一系列生态关联的功能组组成,所有功能组能够覆盖整个生态系统的能量流动过程(Christensen *et al.*, 2005)。Ecopath 模型需要输入生物量( $B$ )、生产量与生物量的比值( $P/B$ )、消耗量与生物量的比值( $Q/B$ )和生态营养效率(ecotrophic efficiency, EE) 4 个基本参数中的任意 3 个,以及食物矩阵(diet composition, DC)和捕捞量参数。根据不同生物种类的食性、个体大小、生态位等特征,同时参考莱州湾其他 Ecopath 模型(杨超杰等, 2016; 林群等, 2013; 张明亮等, 2013)的功能组划分标准,将芙蓉岛人工鱼礁区生态系统划分为 16 个功能组(表 1)。其中,根据生态作用和经济价值,将许氏平鲷(*Sebastes chlegeli*)、大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)、花鲈(*Lateolabrax maculatus*)、矛尾鰕虎鱼(*Chaeturichthys stigmatias*)、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)、日本螯(*Charybdis japonica*)和脉红螺(*Rapana venosa*)单独划分为一个功能组。仿刺参(*Apostichopus japonicus*)作为当地重要增殖生物,生物量相比其他功能组较大,单独划分为一个功能组。其他功能组还包括其他中上层鱼类、其他底层鱼类、其他底栖甲壳类、软体动物、多毛类、浮游动物、浮游植物和碎屑(表 1)。

**1.2.2 数据来源** 本研究中能量流动以湿重( $t/km^2$ )表示,模拟时间为 2019 年。浮游植物生物量通过叶绿素  $a$  含量进行换算(Wu *et al.*, 2016),碎屑生物量参考杨超杰等(2016)、林群等(2013)的研究获得,其他功能组生物量根据渔业资源调查和参考相关文献(李少文等, 2014; 袁伟等, 2020; 林群等, 2021)获得。各功能组的  $P/B$  和  $Q/B$  根据渔业资源网站以及生态系统特征相似的生态系统模型(吴忠鑫等, 2012; 杨超杰等, 2016; 欧阳力剑等, 2010)中的类似功能组获得。功能组的食物组成矩阵根据胃含物分析以及相关文献资料(杨纪明, 2001a、b、c)获得。捕捞量数据来自于莱州明波水产有限公司统计数据,生态营养效率 EE 由于较难获得,由 Ecopath 模型计算得出。

**1.2.3 模型调试** 当得到所有必要的参数进行建模时,基于营养动力学原理,需要对 Ecopath 模型进行调试以达到生态系统输入和输出的平衡(Christensen *et al.*, 2005),使每个功能组的 EE 值介于 0~1 之间,且大多数功能组的  $P/Q$  值处于 0.1~0.3 的合理范围。由于 EE 较难获得,在模型中设置 EE 为未知参数,通过在模型中输入其他参数计算获得。为保证所有功

能组达到平衡,需要调整食物组成矩阵和其他输入参数,直到所有功能组的  $EE < 1$ ,使整个生态系统的能量流动达到平衡。

Ecopath 模型使用“Pedigree”指数来量化模型中输入参数的不确定性(Christensen *et al.*, 2004)。Pedigree 指数的变化范围为 0~1, Pedigree 指数越高,表示模型精确度和可信度越高。

**1.2.4 混合营养效应和关键种分析** 混合营养效应分析(mixed trophic impact analysis, MTI)可以用来分析生态系统不同功能组之间积极或消极的营养相互关系(Odum, 1969),取值范围在-1~1 之间,有利为正值,有害为负值。关键种是指在生态系统中生物量较低,但对其他生物具有重要影响的生物。当关键种被移除后,生态系统结构将会发生改变(Libralato *et al.*, 2006; Power *et al.*, 1996)。

**1.2.5 总体特征参数** 总体特征参数是 Ecopath 模型描述生态系统规模、稳定性和成熟度的指标,其中,系统总流量(total system throughput, TST)是表示生态系统总体规模的指标,是总消耗量(total consumption, TC)、总输出量(total exports, TEX)、总呼吸量(total respiratory flows, TR)及总流向碎屑量(total flows into detritus, TDET)的总和。连接指数(connectance index, CI)和系统杂食指数(system omnivory index, SOI)是反映生态系统内部联系复杂程度的指标。总初级生产量/总呼吸量(total primary production/total respiration, TPP/TR)、系统净生产量(net system production, NSP)等是表征生态系统成熟度的重要指标。其他参数还包括转换效率(transfer efficiency, TE)、Finn's 循环指数(Finn's cycling index, FCI)和 Finn's 平均路径长度(Finn's mean path length, FML)等(Wu *et al.*, 2016)。

**1.2.6 生态容量估算** 生态容量是指一个特定种群在某一时期内和特定环境下,生态系统所能支持的种群大小(唐启升, 1996)。Ecopath 模型基于海域的初级生产量,考虑增殖品种与食物竞争者、捕食者等的相互作用,可为生态容量的研究提供理论指导(林群等, 2018)。本研究中,仿刺参生态容量的计算参考吴忠鑫等(2013)、杨超杰等(2016)的估算方法,首先构建能反映人工鱼礁区当前能流状态的 Ecopath 模型,逐步提高模型中目标种的生物量(捕捞量也相应成比例增加),来代表实际生产中目标种养殖规模的扩大,这会对生态系统中与目标种食性联系紧密的物种产生影响,并引起生态系统能量流动的变化。当模型出现任意功能组的  $EE > 1$  时,模型失去平衡,在模型不平衡之前的生物量即为目标种的生态容量(Jiang *et al.*, 2005; Byron *et al.*, 2011)。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统营养级特征

通过功能组参数输入和模型调试,得到 Ecopath 模型输出结果(表 1)。16 个功能组营养级范围为 1.000~3.978,其中,顶级捕食者花鲈营养级最高(3.978),其次为大泷六线鱼(3.807)。所有功能组的  $P/Q$  值在 0.1~0.3 之间,模型输出结果较为合理。

### 2.2 营养级间的能量流动及转换效率

在生态系统中,各营养级之间的转换效率是指输出量和被摄食量之和与总流量的比值,表示该营养级的能量在生态系统中被利用的效率。芙蓉岛人工鱼礁区生态系统大部分能量流通处于营养级 I 和 II 之间。生态系统初级生产者的总初级生产量为  $870.8 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,其中,  $480.0 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  被消费者摄食流入营养级 II,  $390.8 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  未被有效利用而流入碎屑功能组进入系统再循环(图 2)。各个营养级流入碎屑的能量总和为  $667.6 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,来自初级生产者的能量为  $390.8 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,被摄食的碎屑能量为  $410.4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,进入系统再利用。芙蓉岛人工鱼礁区生态系统中流入营养级 II、III、IV 和 V 的能量分别占生态系统总流量的 34.80%、4.48%、0.57% 和 0.04%。

芙蓉岛人工鱼礁区生态系统共可整合为 5 个营养级(表 2),来自初级生产者的能量流和来自碎屑的能量流,其最高转化效率都是在第 II 营养级。最高能量转换效率在碎屑到营养级 II 之间,达到 15.9%,其次为生产者到营养级 II 之间,达到 13.3%。生态系统总转换效率为 10.6%,来自初级生产者的转换效率为 10.8%,来自碎屑的转换效率为 10.1%,生态系统来自碎屑的能量占系统总流量的 44.0%,来自初级生产者的能量占系统总流量的 56.0%。

### 2.3 功能组间的营养关系

生态系统各营养级之间的混合营养效应分析发现,大部分功能组对自身表现出一定的消极影响,主要因为在栖息空间和食物等方面存在竞争关系,反映了功能组内部的密度制约效应(图 3)。捕食者对其饵料生物功能组产生消极影响,而被捕食者对捕食者功能组产生积极影响。浮游植物、碎屑对大部分功能组产生一定的积极影响,如浮游植物对其他中上层鱼类和浮游动物产生积极影响,碎屑对其他底栖甲壳类和仿刺参产生积极影响。碎屑作为增殖生物仿刺参的主要食物,对仿刺参产生积极影响。花鲈作为生态系统中的顶级捕食者,对其他鱼类功能组产生消极影响。仿刺参作为当地重要增殖生物,渔业捕捞活动对其产生消极影响。

表 1 芙蓉岛人工鱼礁区 Ecopath 模型的基本输入参数和估计参数(粗体)

Tab.1 Basic input data and estimated parameters (bold) for Furong Island artificial reef Ecopath model

功能组 Functional group	营养级 Trophic level	生物量 Biomass/ ( $\text{t}/\text{km}^2$ )	$P/B$ Production/ Biomass	$Q/B$ Consumption/ Biomass	生态 营养效率 EE
花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	<b>3.978</b>	0.079	1.060	4.000	<b>0.215</b>
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	<b>3.807</b>	0.024	1.240	4.300	<b>0.319</b>
许氏平鲉 <i>Sebastes chlegeli</i>	<b>3.763</b>	0.010	1.320	4.700	<b>0.487</b>
矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	<b>3.319</b>	0.270	1.900	6.500	<b>0.605</b>
其他中上层鱼类 Other pelagic fishes	<b>2.920</b>	0.062	2.300	7.900	<b>0.795</b>
其他底层鱼类 Other demersal fishes	<b>2.904</b>	0.142	2.600	8.900	<b>0.378</b>
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	<b>3.001</b>	0.480	8.000	30.000	<b>0.165</b>
日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	<b>2.958</b>	4.220	2.000	11.600	<b>0.033</b>
其他底栖甲壳类 Other benthic crustaceans	<b>2.719</b>	3.500	4.000	20.000	<b>0.930</b>
脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	<b>2.814</b>	0.534	0.800	2.800	<b>0.819</b>
仿刺参 <i>Apostichopus japonicus</i>	<b>2.000</b>	20.000	0.800	3.000	<b>0.913</b>
软体动物 Molluscs	<b>2.163</b>	7.680	7.900	26.600	<b>0.811</b>
多毛类 Ploychaetes	<b>2.116</b>	5.200	6.750	22.500	<b>0.431</b>
浮游动物 Zooplankton	<b>2.053</b>	4.300	25.000	125.000	<b>0.818</b>
浮游植物 Phytoplankton	<b>1.000</b>	8.200	106.200	—	<b>0.551</b>
碎屑 Detritus	<b>1.000</b>	43.000	—	—	<b>0.615</b>

注: — 表示无数据。

Note: — represents no data.

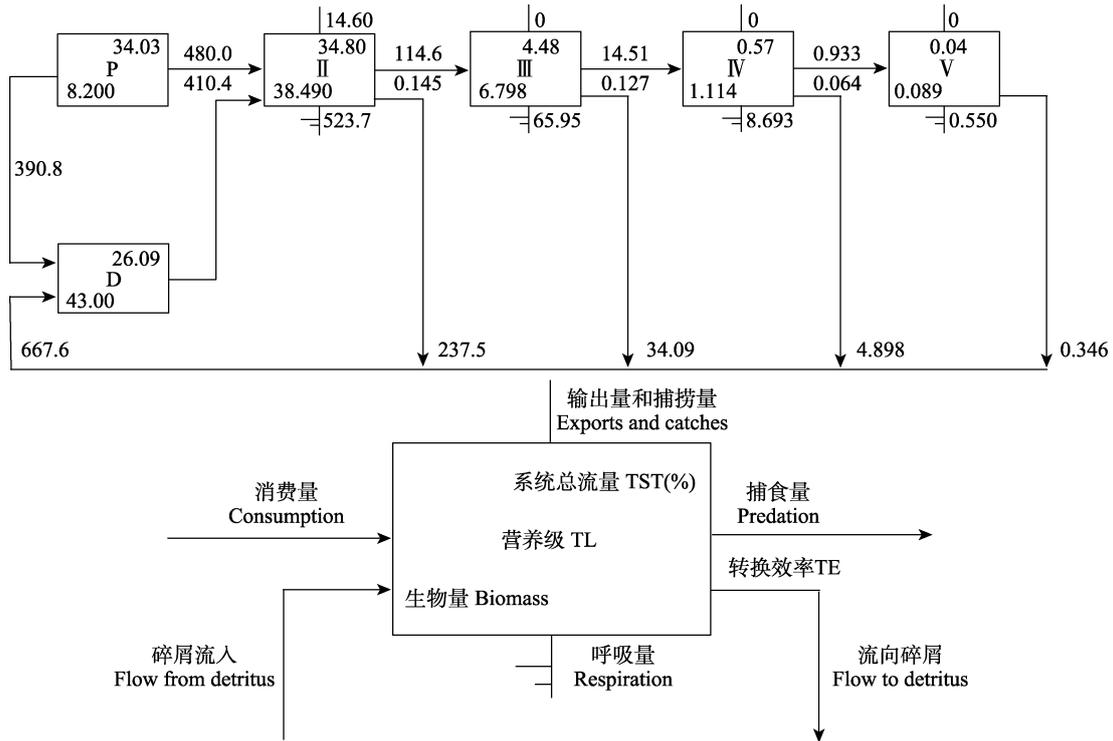


图 2 芙蓉岛人工鱼礁区生态系统能量流动  
Fig.2 Flow diagram of Furong Island artificial reef ecosystem

表 2 芙蓉岛人工鱼礁区生态系统各营养级转换效率

Tab.2 Transfer efficiency of different trophic levels in Furong Island artificial reef ecosystem

能量来源 Energy source		营养级 Trophic level/%			
		II	III	IV	V
生产者	Producer	13.3	13.3	7.1	4.0
碎屑	Detritus	15.9	11.9	5.5	4.8
总能流	All flows	14.5	12.7	6.4	4.3
能量来自碎屑比例	Proportion of total flow originating from detritus/%		44.0		
生产者转换效率	Transfer efficiency from primary producers/%		10.8		
碎屑转换效率	Transfer efficiency from detritus/%		10.1		
总转换效率	Total transfer efficiency/%		10.6		

### 2.4 关键种分析

通过关键指数 1、关键指数 2 和相对总影响来分析生态系统的键种(表 3)。结果显示, 花鲈的关键指数 1 为 0.289, 关键指数 2 为 3.130, 相对总影响为 1.369, 在生态系统所有功能组中排第 1 位, 表明花鲈为该生态系统中的键种, 在生态系统中扮演着重要角色。此外, 仿刺参虽然生物量最大, 但受底播增殖方式限制, 与饵料功能组之外的其他功能组之间的营养关系较小, 导致关键指数和相对总影响较小。

### 2.5 仿刺参生态容量估算

仿刺参是芙蓉岛人工鱼礁区的主要增殖目标种

类, 该种类主要以碎屑和浮游生物为食。根据莱州明波水产有限公司渔业统计数据, 目前仿刺参增殖生物量为 20 t/km<sup>2</sup>。从能量平衡角度评估仿刺参的生态容量, 在当前生物量的基础上逐步提高(同时等比例增加捕捞量), 其他功能组的生物量不变。当仿刺参生物量增加到当前生物量的 6.55 倍时, 碎屑功能组的营养转化效率  $EE=1.001>1$ , 模型失去平衡, 表明仿刺参的生物量增加到 6.55 倍时达到生态容量, 生态容量为 131 t/km<sup>2</sup>。对比当前状态和仿刺参生物量达到生态容量时的生态系统特征参数(表 4), 系统总流量由 2 596.108 t/(km<sup>2</sup>·a)提高到 2 943.538 t/(km<sup>2</sup>·a), 生态系统规模有一定扩大。对于总初级生产量/总呼吸量 TPP/TR、连接指数 CI、系统杂食指数 SOI、Finn's

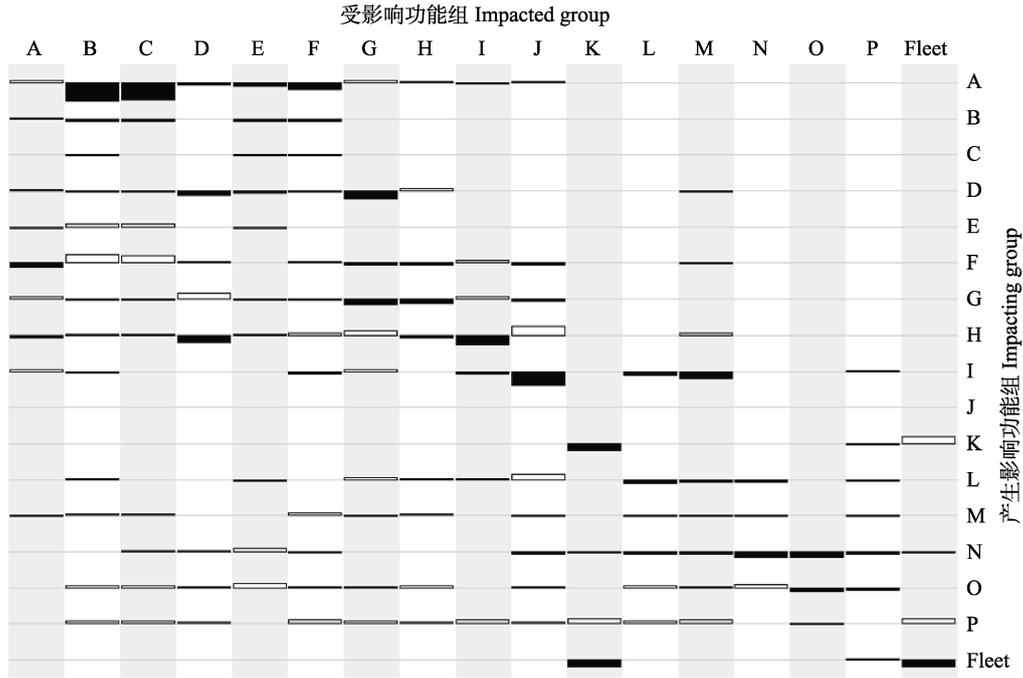


图3 芙蓉岛人工鱼礁区生态系统混合营养效应  
Fig.3 Mixed trophic impacts analysis for Furong Island artificial reef ecosystem

基线上方灰块表示积极影响，基线下方黑块表示消极影响，块状大小表示影响的强弱。A：花鲈；B：大泷六线鱼；C：许氏平鲉；D：矛尾鰕虎鱼；E：其他中上层鱼类；F：其他底层鱼类；G：口虾蛄；H：日本蟳；I：其他底栖甲壳类；J：脉红螺；K：仿刺参；L：软体动物；M：多毛类；N：浮游动物；O：浮游植物；P：碎屑。  
Positive impacts were shown above each baseline in grey bar, while negative impacts were shown below the baselines in dark bar, and the rectangular frame size showed the strength of the impact.  
A: *Lateolabrax maculatus*; B: *Hexagrammos otakii*; C: *Sebastes chlegeli*; D: *Chaeturichthys stigmatias*; E: Other pelagic fishes; F: Other demersal fishes; G: *Oratosquilla oratoria*; H: *Charybdis japonica*; I: Other benthic crustaceans; J: *Rapana venosa*; K: *Apostichopus japonicus*; L: Molluscs; M: Ploychaetes; N: Zooplankton; O: Phytoplankton; P: Detritus.

表3 芙蓉岛人工鱼礁区各功能组关键指数和相对总影响  
Tab.3 Keystoneness and relative total impact of every functional group in Furong Island artificial reef ecosystem

功能组 Functional group	关键指数 1 Keystone index 1	关键指数 2 Keystone index 2	相对总影响 Relative total impact
花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	0.289	3.130	1.369
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	-0.492	2.866	0.655
许氏平鲉 <i>Sebastes chlegeli</i>	-0.971	2.767	0.205
矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	-0.184	2.125	0.818
其他中上层鱼类 Other pelagic fishes	-0.427	2.519	0.687
其他底层鱼类 Other demersal fishes	-0.033	2.554	1.010
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	-0.189	1.872	0.769
日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	0.019	1.166	0.832
其他底栖甲壳类 Other benthic crustaceans	0.035	1.257	0.909
脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	-1.733	0.282	-0.825
仿刺参 <i>Apostichopus japonicus</i>	-1.580	-0.945	-1.382
软体动物 Molluscs	-0.340	0.578	0.203
多毛类 Ploychaetes	-0.615	0.450	0.030
浮游动物 Zooplankton	-0.298	0.842	0.436
浮游植物 Phytoplankton	-0.322	0.512	0.049

表 4 芙蓉岛人工鱼礁区生态系统特征参数  
Tab.4 Characteristic parameters of Furong Island artificial reef ecosystem

参数 Parameter	$V_1$	$V_2$
总消耗量 Total consumption $/[t/(km^2 \cdot a)]$	1 057.621	1 390.621
总输出量 Total export $/[t/(km^2 \cdot a)]$	271.874	94.274
总呼吸量 Total respiratory flows $/[t/(km^2 \cdot a)]$	598.966	776.566
总流向碎屑量 Total flow into detritus $/[t/(km^2 \cdot a)]$	667.647	682.077
系统总流量 Total system throughput $/[t/(km^2 \cdot a)]$	2 596.108	2 943.538
总初级生产量 Calculated total net primary production $/[t/(km^2 \cdot a)]$	870.840	870.840
总初级生产量/总呼吸量 Total primary production/total respiration	1.454	1.121
系统净生产量 Net system production $/[t/(km^2 \cdot a)]$	271.874	94.274
总初级生产量/总生物量 Total primary production/total biomass	15.920	5.255
总生物量(不计碎屑) Total biomass (excluding detritus) $/[t/(km^2)]$	54.701	165.701
Finn's 循环指数 Finn's cycling index /%	8.860	11.730
Finn's 平均路径长度 Finn's mean path length	2.980	3.380
连接指数 Connectance index	0.402	0.401
系统杂食指数 System omnivory index	0.211	0.206

注:  $V_1$ : 当前生态系统状态;  $V_2$ : 仿刺参生物量达到生态容量时的生态系统状态。

Note:  $V_1$ : Current status of the ecosystem;  $V_2$ : Status at ecological capacity of *Apostichopus japonicus*.

表 5 芙蓉岛人工鱼礁区生态系统与其他模型系统特征参数的比较  
Tab.5 Comparison of characteristic parameters of Furong Island artificial reef ecosystem model with other models

特征参数 Characteristic parameters	本研究 This study	俚岛 Li Island	朱旺 Zhuwang	嵎泗 Shengsi	崂山湾 Laoshan Bay	獐子岛 Zhangzi Island
系统总流量 TST $/[t/(km^2 \cdot a)]$	2 596.108	10 786.680	3 390.130	5 160.000	14 256.510	18 393.090
总初级生产量/总呼吸量 TPP/TR	1.454	1.840	1.035	1.385	1.127	2.197
连接指数 CI	0.402	0.200	0.444	—	0.293	0.224
系统杂食指数 SOI	0.211	0.120	0.360	—	0.333	0.172
Finn's 循环指数 FCI /%	8.860	5.000	12.230	—	20.950	9.120
Finn's 平均路径长度 FML	2.980	2.620	3.301	—	3.996	3.486

循环指数 FCI 和 Finn's 平均路径长度 FMI 等表示生态系统成熟度、稳定性的特征参数(Abdul *et al*, 2016; Christensen *et al*, 1992; Finn, 1976), 当仿刺参生物量增至生态容量时, TPP/TR 由 1.454 降到 1.121, CI 由 0.402 降到 0.401, SOI 由 0.211 降到 0.206, FCI 由 8.860% 提高到 11.730%, FMI 由 2.980 提高到 3.380, 大部分特征参数变化不大。由此可见, 仿刺参的生物量增至生态容量时, 对芙蓉岛人工鱼礁区生态系统的稳定性无显著影响。

### 3 讨论

#### 3.1 模型质量评价

通过对不同输入参数的来源进行赋值, 可利用 Pedigree 指数评价 Ecopath 模型输入参数的总体质量

(Christensen *et al*, 2004), Morissette(2006)给出的全球 150 个 Ecopath 模型 Pedigree 指数在 0.16~0.68 之间。林群等(2013)使用 Ecopath 评估了莱州湾中国对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 的增殖生态容量, 杨超杰等(2016)使用 Ecopath 模型评估了莱州湾朱旺人工鱼礁区日本蟳、脉红螺和仿刺参增殖生态容量, 刘鸿雁等(2019)使用 Ecopath 模型评估了崂山湾人工鱼礁区栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 的生态容量, 三者的 Pedigree 指数分别为 0.51、0.357、0.464~0.484, 建立的 Ecopath 模型可信度较高, 目标种的生态容量评估结果较为合理。本模型的 Pedigree 指数为 0.46, 处于较高水平, 说明本模型输入数据的可靠性较好, 模型质量和可信度较高。本研究主要基于芙蓉岛人工鱼礁区的调查数据, 此外, 由于大部分功能组的  $P/B$  和  $Q/B$  通过参考相似生态系统的 Ecopath 模型获得, 食物组成矩阵通

过胃含物分析和参考相关文献(杨纪明, 2001), 导致模型输入参数存在一定的不确定性, 对模型质量有所影响。在今后的模型研究中, 应在4个季度采样, 结合多种调查方式, 进一步细化功能组。在食物组成矩阵的研究中, 在胃含物分析和参考相关文献的基础上, 可结合稳定同位素分析的技术手段, 进一步确定各功能组的食物组成和在食物网结构中的位置, 提高数据可靠性和模型质量。

### 3.2 生态系统总体特征评价

本研究的生态系统总转换效率为10.6%, 略高于10%的林德曼转换效率(Lindeman, 1942), 说明该生态系统以初级生产者能量支持的牧食食物链为主。与其他相似类型的人工鱼礁区生态系统比较, 芙蓉岛人工鱼礁区生态系统规模明显低于俚岛(吴忠鑫等, 2012)、莱州湾朱旺(杨超杰等, 2016)、崂山湾(刘鸿雁等, 2019)、嵎泗(李永刚等, 2007)、獐子岛(许楨行等, 2016)等人工鱼礁区生态系统(表5)。总初级生产量与总呼吸量的比值(TPP/TR)是评价生态系统成熟度的重要指示参数, 在生态系统发展初期, 大部分能量用于生物的生长发育, 生产量大于呼吸量, 故 $TPP/TR > 1$ ; 在成熟的生态系统中,  $TPP/TR \approx 1$  (Abdul *et al.*, 2016)。本研究中,  $TPP/TR = 1.454 > 1$ 。CI和SOI是反映生态系统内部联系复杂程度的指标, 生态系统越成熟, 生态系统中各功能组之间的相互联系越紧密, 食物网结构越复杂, CI和SOI越接近1, 说明生态系统越稳定(Christensen *et al.*, 1992)。本研究中, 芙蓉岛人工鱼礁区生态系统的连接指数CI和系统杂食指数SOI分别为0.402和0.211, 均小于1。芙蓉岛人工鱼礁区生态系统的TPP/TR、CI和SOI指标均低于多数相似类型生态系统, 说明该生态系统并不成熟, 内部联系复杂程度较低, 食物网结构较为简单, 生态系统发育程度较低。Finn's循环指数是指生态系统中循环使用的能量占生态系统总流量的比值, 越是成熟的生态系统, 循环指数越高。Finn's平均路径长度是指每个循环流经食物链的平均长度, 营养流经的食物链越长, 能量再循环比例越高(Finn, 1976)。本研究中Finn's循环指数仅为8.860%, 表明该生态系统仅有8.860%的能量被循环再利用。Finn's平均路径长度为2.980, 相比于其他人工鱼礁区生态系统, 能量再循环利用率较低, 平均路径长度较短, 进一步表明生态系统的食物网结构简单、复杂程度低。究其原因, 推测可能是因为芙蓉岛海域投礁时间较短, 水深较浅(平均水深3 m), 以及捕捞作业等人类干扰活动对生态系统的发展产生

了影响, 使得该生态系统还处于发展阶段。

### 3.3 仿刺参生态容量评价

仿刺参为该人工鱼礁区的主要增植物种, 现存生物量为 $20 \text{ t/km}^2$ , 本研究Ecopath模型估算的仿刺参生态容量为 $131 \text{ t/km}^2$ , 表明仿刺参尚有较大的增殖空间。对比Ecopath模型中生态系统当前状态与仿刺参生物量达到生态容量时的特征参数可知(表4), 大部分特征参数无显著变化。本研究的仿刺参生态容量高于莱州湾朱旺人工鱼礁区( $50.8 \text{ t/km}^2$ ) (杨超杰等, 2016), 低于荣成俚岛人工鱼礁区( $309.4 \text{ t/km}^2$ ) (吴忠鑫等, 2013), 可能是由于不同海域的生态条件和生产力差异导致的。俚岛人工鱼礁区是浅海岩礁生态系统的补充和延伸, 而浅海岩礁环境系高生产力区, 投放的人工礁为大型藻类的附着和生长提供了良好的附着基。此外, 该礁区丰富的鳗草(*Zostera marina*)资源也为仿刺参提供了重要食物源(吴忠鑫等, 2013), 因此, 该区域的仿刺参生态容量相对较高。莱州湾朱旺人工鱼礁区大型藻类的生物多样性和生物量较少, 分布不均匀, 生产力极低, 这可能是其仿刺参生态容量较低的原因(杨超杰等, 2016)。芙蓉岛人工鱼礁的建设改善了当地海域的初级生产力和生态环境(王新萌等, 2019; 陈传曦等, 2021), 为仿刺参的生长创造了良好的条件。本研究中Ecopath模型简化了生态系统的复杂程度, 忽略了仿刺参生活史和环境变化等因素, 计算出的仿刺参生态容量应处在理论值水平(刘鸿雁等, 2019)。鉴于Ecopath模型是目前国际上较为成熟的资源承载力评估模型之一, 虽然有一定的局限性, 依然可以为仿刺参的增殖和采捕提供借鉴和参考。

仿刺参是芙蓉岛人工鱼礁区主要底播增殖对象, 具有较高的经济价值。仿刺参的增殖途径通常有移植和放流种苗2种方式, 芙蓉岛人工鱼礁区的仿刺参增殖以放流种苗为主。种苗的体长越长, 放流后的成活率越高。隋锡林(2004)研究表明, 放流体长2.5 cm幼参的成活率在20%以上; 放流体长5 cm幼参的成活率可达70%, 回捕率约40%。在一般海区适合放流体长大于2 cm的种苗, 成活率达30%; 实际生产中, 放流体长大于3 cm的种苗, 成活率可达60% (于东祥等, 2005)。根据莱州明波水产有限公司渔业统计数据, 目前芙蓉岛人工鱼礁区每年的仿刺参投苗量为 $0.9 \text{ t/km}^2$ 。根据仿刺参底播增殖相关研究(隋锡林, 2004; 于东祥等, 2005; 杨超杰等, 2016), 以30%的成活率、30%的回捕率以及成参个体均重150 g计, 该海区以每年 $4.1 \text{ t/km}^2$ 的生产量进行采捕, 可维持生态系统的平衡。

## 4 总结

本研究表明, 芙蓉岛人工鱼礁区生态系统以初级生产者能量支持的牧食食物链为主, 生态系统总体规模较小, 成熟度和稳定性较低, 食物网结构较为简单, 各项生态系统特征参数与成熟的生态系统相比差距较大(表 5), 该生态系统是一个处于发展中的“幼态”生态系统, 抗干扰能力弱, 易受到过度捕捞、环境污染等外界因素影响。本研究从能量平衡角度估算的芙蓉岛人工鱼礁区仿刺参的生态容量为 131 t/km<sup>2</sup>, 表明仿刺参仍具有一定的增殖空间。本研究可为人工鱼礁区建设和相似生态系统研究提供参考, 考虑到芙蓉岛人工鱼礁区投礁时间不长, 水深较浅(平均水深 3 m), 需要开展长期监测研究, 并对鱼礁区出现的幼鱼资源进行合理养护, 才能体现人工鱼礁区的资源和环境修复作用, 保证人工鱼礁区资源的可持续发展。

## 参 考 文 献

- ABDUL W, ADEKOYA E O. Preliminary Ecopath model of a tropical coastal estuarine ecosystem around bight of Benin, Nigeria. *Environmental Biology of Fishes*, 2016, 99(12): 909–923
- 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
- CHEN C X, ZHANG J B, WANG X M, *et al.* Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in an artificial reef near Furong Island, Laizhou Bay, Bohai Sea. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(3): 299–313 [陈传曦, 张建柏, 王新萌, 等. 渤海莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系. *中国水产科学*, 2021, 28(3): 299–313]
- CHEN Y, YU C Q, ZHANG G S, *et al.* The environmental function and fish gather effect of artificial reefs. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002, 17(1): 64–69 [陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果. *大连水产学院学报*, 2002, 17(1): 64–69]
- CHEN Z Z, QIU Y S. Assessment of the food-web structure, energy flows, and system attribute of northern South China Sea ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18): 4855–4865 [陈作志, 邱永松. 南海北部生态系统食物网结构、能量流动及系统特征. *生态学报*, 2010, 30(18): 4855–4865]
- CHRISTENSEN V, PAULY D. A guide to the Ecopath II Software System (version 2.1). Manila: International Center for Living Aquatic Resources Management, 1992, 1–67
- CHRISTENSEN V, WALTERS C J, PAULY D. Ecopath with Ecosim: A user's guide. Penang, Malaysia: Fisheries Centre, University of British Columbia, 2005
- CHRISTENSEN V, WALTERS C J. Ecopath with Ecosim: Methods, capabilities and limitations. *Ecological Modelling*, 2004, 172(2/3/4): 109–139
- FINN J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. *Journal of Theoretical Biology*, 1976, 56(2): 363–380
- FRISK M G, MILLER T J, LATOUR R J, *et al.* Assessing biomass gains from marsh restoration in Delaware Bay using Ecopath with Ecosim. *Ecological Modelling*, 2011, 222(1): 190–200
- HUANG X F, BING X W, ZHANG X Z. Application of Ecopath with Ecosim model in fishery ecosystem appraisal. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(6): 125–129 [黄孝锋, 邢旭文, 张宪中. EwE模型在评价渔业水域生态系统中的应用. *水生态学杂志*, 2011, 32(6): 125–129]
- ISLAM G M N, NOH K M, SIDIQUE S F, *et al.* Economic impact of artificial reefs: A case study of small scale fishers in Terengganu, Peninsular Malaysia. *Fisheries Research*, 2014, 151(3): 122–129
- JIANG W, GIBBS M T. Predicting the carrying capacity of bivalve shellfish culture using a steady, linear food web model. *Aquaculture*, 2005, 244(1/2/3/4): 171–185
- LI J, ZHANG Y, YUAN W, *et al.* Research on artificial reef ecosystem health assessment based on fuzzy synthetic evaluation. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(5): 10–19 [李娇, 张艳, 袁伟, 等. 基于模糊综合评价法的人工鱼礁生态系统健康研究. *渔业科学进展*, 2018, 39(5): 10–19]
- LI S W, LI F, ZHANG Y, *et al.* Secondary productivity of macrobenthos in Laizhou Bay, East China. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(1): 190–197 [李少文, 李凡, 张莹, 等. 莱州湾大型底栖动物的次级生产力. *生态学杂志*, 2014, 33(1): 190–197]
- LI Y G, WANG Z H, ZHANG S Y. A preliminary approach on the ecosystem model of the artificial reef in Shengsi. *Marine Fisheries*, 2007, 29(3): 226–234 [李永刚, 汪振华, 章守宇. 嵊泗人工鱼礁海区生态系统能量流动模型初探. *海洋渔业*, 2007, 29(3): 226–234]
- LIBRALATO S, CHRISTENSEN V, PAULY D. A method for identifying keystone species in food web models. *Ecological Modelling*, 2006, 195(3/4): 153–171
- LIN C G, YANG H S, CHEN Y, *et al.* Construction and development of modern marine ranching: Academic Review of the 230th Shuangqing Forum. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(1): 143–152 [林承刚, 杨红生, 陈鹰, 等. 现代化海洋牧场建设与发展: 第 230 期双清论坛学术综述. *中国科学基金*, 2021, 35(1): 143–152]
- LIN Q, LI X S, LI Z Y, *et al.* Ecological carrying capacity of Chinese shrimp stock enhancement in Laizhou Bay of East China based on Ecopath model. *Chinese Journal of Applied*

- Ecology, 2013, 24(4): 1131–1140 [林群, 李显森, 李忠义, 等. 基于 Ecopath 模型的莱州湾中国对虾增殖生态容量. 中国水产科学, 2013, 24(4): 1131–1140]
- LIN Q, SHAN X J, WANG J, *et al.* Changes in Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) carrying capacity of the Bohai Sea. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(4): 19–29 [林群, 单秀娟, 王俊, 等. 渤海中国对虾生态容量变化研究. 渔业科学进展, 2018, 39(4): 19–29]
- LIN Q, YUAN W, SHAN X J, *et al.* Evaluation on biological integrity of fish in Laizhou Bay. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(2): 101–106 [林群, 袁伟, 单秀娟, 等. 莱州湾水域鱼类生物完整性评价. 水生态学杂志, 2021, 42(2): 101–106]
- LINDEMAN R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23(4): 399–417
- LIU H Y, YANG C J, ZHANG P D, *et al.* An Ecopath evaluation of system structure and function for the Laoshan Bay artificial reef zone ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 3926–3936 [刘鸿雁, 杨超杰, 张沛东, 等. 基于 Ecopath 模型的崂山湾人工鱼礁区生态系统结构和功能研究. 生态学报, 2019, 39(11): 3926–3936]
- MORISSETTE L. Complexity, cost and quality of ecosystem models and their impact on resilience: A comparative analysis, with emphasis on marine mammals and the Gulf of St. Lawrence. Vancouver: University of British Columbia, 2007
- ODUM E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164(3877): 262–270
- OUYANG L J, GUO X W. Studies on the  $Q/B$  values and food consumption of major fishes in the East China Sea and the Yellow Sea. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(2): 23–29 [欧阳力剑, 郭学武. 东、黄海主要鱼类  $Q/B$  值与种群摄食量研究. 渔业科学进展, 2010, 31(2): 23–29]
- PITCHER T, BUCHARY E, TRUJILLO P, *et al.* Spatial simulations of Hong Kong's marine ecosystem: Ecological and economic forecasting of marine protected areas with human-made reefs. *Fisheries Centre Research Reports*. Canada: University of British Columbia, 2002, 1–168
- POWER M E, TILMAN D, ESTES J A, *et al.* Challenges in the quest for keystones. *BioScience*, 1996, 46(8): 609–620
- SUI X L. Releasing propagation of *Apostichopus japonicus*. *Shandong Fisheries*, 2004, 21(6): 16–18 [隋锡林. 刺参的放流增殖. 齐鲁渔业, 2004, 21(6): 16–18]
- TANG Q S. 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]
- WANG X M, SHENG H X, LIU S D, *et al.* Distribution characteristics of *Liza haematocheila* and its relationship with environmental factors in Furongdao artificial reef zones, Laizhou Bay, China. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1914–1924 [王新萌, 盛化香, 刘淑德, 等. 莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区鳎资源分布特征及其与环境因子的相关性分析. 水产学报, 2019, 43(9): 1914–1924]
- WU Z X, ZHANG X M, LOZANO-MONTES H M, *et al.* Trophic flows, kelp culture and fisheries in the marine ecosystem of an artificial reef zone in the Yellow Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2016, 182(Part A): 86–97
- WU Z X, ZHANG X M, ZHANG L, *et al.* Predicting the ecological carrying capacity of the Lidao artificial reef zone of Shandong Province for the sea cucumber, *Apostichopus japonicus*, (Selenck) and the abalone, *Haliotis discus hannai*, using a linear food web model. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(2): 327–337 [吴忠鑫, 张秀梅, 张磊, 等. 基于线性食物网模型估算荣成俚岛人工鱼礁区刺参和皱纹盘鲍的生态容纳量. 中国水产科学, 2013, 20(2): 327–337]
- WU Z X, ZHANG X M, ZHANG L, *et al.* Structure and function of Lidao artificial reef ecosystem in Rongcheng of Shandong Province, East China: An evaluation based on Ecopath model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2878–2886 [吴忠鑫, 张秀梅, 张磊, 等. 基于 Ecopath 模型的荣成俚岛人工鱼礁区生态系统结构和功能评价. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2878–2886]
- XU Z X, CHEN Y, TIAN T, *et al.* Structure and function of an artificial reef ecosystem in Zhangzi Island based on Ecopath model. *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. 大连海洋大学学报, 2016, 31(1): 85–94]
- YANG C J, WU Z X, LIU H Y, *et al.* The fishing strategy of *Charybdis japonica* and *Rapana venosa* and the carrying capacity of *Apostichopus japonicus* in Zhuwang, Laizhou artificial reef ecosystem based on Ecopath model. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2016, 46(11): 168–177 [杨超杰, 吴忠鑫, 刘鸿雁, 等. 基于 Ecopath 模型估算莱州湾朱旺人工鱼礁区日本蟳、脉红螺捕捞策略和刺参增殖生态容量. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(11): 168–177]
- YANG J M. A study on food and trophic levels of Bohai Sea Copepoda. *Modern Fisheries Information*, 2001a, 16(6): 6–10 [杨纪明. 渤海挠足类(Copepoda)的食性和营养级研究. 现代渔业信息, 2001a, 16(6): 6–10]
- YANG J M. A study on food and trophic levels of Bohai Sea fish. *Modern Fisheries Information*, 2001b, 16(10): 10–19 [杨纪明. 渤海鱼类的食性和营养级研究. 现代渔业信息, 2001b, 16(10): 10–19]
- YANG J M. A study on food and trophic levels of Bohai Sea invertebrates. *Modern Fisheries Information*, 2001c, 16(9): 8–16 [杨纪明. 渤海无脊椎动物的食性和营养级研究. 现代渔业信息, 2001c, 16(9): 8–16]
- YIN Z Q, ZHANG S Y. The ecological effect evaluation system of protective artificial reef in East China Sea. *Marine Fisheries*, 2012, 34(1): 23–31 [尹增强, 章守宇. 东海区资源保护型人工鱼礁生态效果评价体系的初步研究. 海洋渔业, 2012, 34(1): 23–31]

- YU D X, ZHANG Y, CHEN S Q, *et al.* The theory and technology of releasing propagation of *Apostichopus japonicus* II. Shandong Fisheries, 2005, 22(7): 54–56 [于东祥, 张岩, 陈四清, 等. 刺参增殖的理论和(2). 齐鲁渔业, 2005, 22(7): 54–56]
- YUAN W, WANG J, ZUO T, *et al.* Characteristics of community structure and the dynamic changes of macrobenthos in the Laizhou Bay. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 42(6): 52–61 [袁伟, 王俊, 左涛, 等. 莱州湾大型底栖动物群落结构及其动态变化特征. 海洋学报, 2020, 42(6): 52–61]
- ZHANG M L, LENG Y S, LÜ Z B, *et al.* Estimating the ecological carrying capacity of *Portunus trituberculatus* in Laizhou Bay. Marine Fisheries, 2013, 35(3): 303–308 [张明亮, 冷悦山, 吕振波, 等. 莱州湾三疣梭子蟹生态容量估算. 海洋渔业, 2013, 35(3): 303–308]
- ZHAO J, ZHANG S Y, XU M. The primary research of the energy flow in Gouqi kelp bed ecosystem. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(1): 98–104 [赵静, 章守宇, 许敏. 枸杞海藻场生态系统能量流动模型初探. 上海海洋大学学报, 2010, 19(1): 98–104]

(编辑 冯小花)

## Assessment of Ecosystem Energy Flow and Ecological Capacity of *Apostichopus japonicus* in the Furong Island Artificial Reef, Laizhou Bay

DING Xiayang<sup>1</sup>, SUN Xin<sup>1</sup>, DONG Jianyu<sup>1</sup>, ZHAN Qipeng<sup>1</sup>, ZHANG Zonghang<sup>1</sup>,  
ZHANG Zhen<sup>1</sup>, SHEN Fengyuan<sup>1</sup>, ZHANG Peidong<sup>1</sup>, ZHANG Xiumei<sup>2,3①</sup>

(1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education; Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China;

2. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China;

3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266237, China)

**Abstract** The fishery resources in the Furong Island, Laizhou Bay artificial reef were investigated in 2019; the energy flows and structure of the ecosystem were modeled, and the ecological capacity of *Apostichopus japonicus* was estimated using an Ecopath with Ecosim 6.6 (EwE 6.6). The model included 16 functional groups that covered the main processes of energy flows in the Furong Island artificial reef ecosystem. According to the results, the trophic levels of the functional groups varied from 1.000 to 3.978; *Lateolabrax maculatus* occupied the highest trophic level. The total transfer efficiency was 10.6%, and the proportions of the total flow originating from primary producers and detritus were 10.8% and 10.1%, respectively. The total system throughput was estimated to be 2 596.108 t/(km<sup>2</sup>·a), with 44% originating from detritus. The ratio between the total primary productivity and the total respiration of the system was 1.454; the connectance index was 0.402; the system omnivory index was 0.211; and the Finn cycling index and Finn mean path length were 8.860% and 2.980, respectively. The results showed that the Furong Island artificial reef ecosystem was at a relatively low maturity and stability level with a relatively simple food web. The ecological capacity of *A. japonicus* estimated by the model was 131 t/km<sup>2</sup>, which is 6.55 times the existing stock, indicating its growth potential. According to the actual production situation, the ecological balance of the ecosystem can be maintained with an annual catch of 4.1 t/km<sup>2</sup>. At present, there are few studies using the Ecopath model to evaluate the ecological consequences or ecological capacities of artificial reefs, in China or abroad, and there is little discussion about fishery management models. More applications and verification on artificial reefs are required. This study is expected to provide a scientific basis for the evaluation of ecological consequences of artificial areas and the sustainable utilization of marine ranches.

**Key words** Furong Island; Artificial reef; Ecopath model; Ecological capacity

① Corresponding author: ZHANG Xiumei, E-mail: xiumei1227@163.com