

DOI: 10.5846/stxb201805301193

刘鸿雁, 杨超杰, 张沛东, 李文涛, 张秀梅. 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): - .  
Liu H Y, Yang C J, Zhang P D, Li W T, Zhang X M. An Ecopath evaluation of system structure and function for the Laoshan Bay artificial reef zone ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): - .

## 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

刘鸿雁<sup>1</sup>, 杨超杰<sup>1</sup>, 张沛东<sup>1</sup>, 李文涛<sup>1</sup>, 张秀梅<sup>1,2,\*</sup>

1 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室, 青岛 266003

2 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 青岛 266072

**摘要:** 基于 2014—2016 年青岛崂山湾人工鱼礁区的生物资源调查数据, 利用 Ecopath with Ecosim (EwE) 软件构建崂山湾人工鱼礁区生态系统生态通道模型 (Ecopath), 系统分析了崂山湾人工鱼礁区生态系统的能量流动规律和结构特征, 估算了栉孔扇贝的养殖容量。该模型由 17 个功能组组成, 基本涵盖了崂山湾人工鱼礁区生态系统能量流动的主要过程。生态网络分析表明, 生态系统各功能组的营养级范围为 1.0—4.255, 星康吉鳗占据了营养级的最高层。能量流动主要有 5 级, 各营养级平均能量传递效率为 10.8%, 其中来自初级生产者的能量效率为 9.8%, 来自碎屑的传递效率为 10.9%; 系统总流量为 14256.510 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 其中 68% 的能量来自碎屑供给; 系统的总初级生产量/总呼吸量为 1.127, 系统联结指数为 0.293, 杂食指数为 0.333, 表明崂山湾人工鱼礁区生态系统成熟度较高, 食物网结构较复杂, 系统内部稳定性较高。关键种指数分析结果显示, 许氏平鲉具有较高的关键指数和相对总影响, 表明其可能在当前生态系统中扮演重要的生态角色。吊笼养殖栉孔扇贝生态容纳量为 189.679 t/km<sup>2</sup>, 在维持生态系统平衡和稳定的前提下, 当前现存量最大可增加 18.55%。

**关键词:** 崂山湾; 人工鱼礁; Ecopath 模型; 生态容量; 食物网

## An Ecopath evaluation of system structure and function for the Laoshan Bay artificial reef zone ecosystem

LIU Hongyan<sup>1</sup>, YANG Chaojie<sup>1</sup>, ZHANG Peidong<sup>1</sup>, LI Wentao<sup>1</sup>, ZHANG Xiumei<sup>1,2,\*</sup>

1 Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Process, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266072, China

**Abstract:** Based on an investigation in the Laoshan Bay artificial reef zone from 2014—2016, a trophic model of the Laoshan Bay artificial reef ecosystem was constructed using Ecopath with Ecosim software to analyze the energy flow pattern and attributes of the ecosystem, estimating the carrying capacity of *Chlamys farreri*. The model included 17 functional groups, covering nearly all the main processes of the energy flow in Laoshan Bay artificial reef ecosystem. Network analysis showed that the trophic level of the functional groups varied from 1.0—4.255, and *Conger myriaster* occupied the highest trophic level. Five discrete trophic levels were found, and the mean trophic transfer efficiency was 10.8%, with a mean transfer efficiency of 10.9% from detritus and 9.8% from the primary producers within the ecosystem. The total system throughput was estimated to be 14256.510 t km<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>, with 68% originated from detritus. The ratio of total primary productivity to total respiration of the system, the connectivity index, and the omnivory index were 1.127, 0.293, and

**基金项目:** 国家自然科学基金 (31172447, 31572227); 国家海洋公益性行业科研专项 (201405010); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目 (2015ASKJ01)

**收稿日期:** 2018-05-30; **网络出版日期:** 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn

0.333, respectively, showing an ecosystem with a high maturity, a complex food web, and a high internal stability. The key species index analysis showed that *Sebastes schlegelii* had a high keystone index and relative overall effect, indicating that it may play an important ecological role in the current ecosystem. The ecological capacity of the ecosystem for *Chlamys farreri* culture is 189.679 t/km<sup>2</sup>; the current stock may increase by 18.55% of the current level.

**Key Words:** Laoshan Bay; artificial reef; Ecopath model; ecological capacity; food web

生态通道模型(Ecopath)以营养动力学为基本原理,以食物网为主线,对自然生态系统进行简化,以建模的方式量化生态系统各特征参数,能够反映出某一时期内、某一特定水生态系统的特征和营养关系,是水生态系统常用的研究工具<sup>[1-2]</sup>。生态通道模型由 Polovina<sup>[3]</sup>提出,经过不断整合发展<sup>[4-6]</sup>,在国外已经成为一种比较成熟的生态系统特征分析方法,被应用于多种生态系统<sup>[7-11]</sup>。近些年,该模型也逐渐用于人工鱼礁区生态系统<sup>[12-14]</sup>和估算海区生态容量<sup>[15-19]</sup>。人工鱼礁区生态系统是人为引导下建立的特殊生态系统,其能量流动和物质循环呈现一定的特殊性,因此需要引入一系列特征参数来对其生态系统特征进行分析。

崂山湾位于我国山东省青岛市东部,北起王哥庄,南至女儿岛,是一个长形半封闭海湾。崂山湾水体环境优良,是多种渔业生物的分布区,同时也是多种经济生物的产卵场和越冬场。但近些年随着捕捞和养殖压力不断加大、海洋污染不断加剧,近岸渔业资源和海洋环境质量日益下降。为缓解这种状况,当地开展了中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)<sup>[20]</sup>、日本对虾<sup>[21]</sup>、三疣梭子蟹(*Portuns trituberculatus*)<sup>[22]</sup>、褐牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)、海蜇(*Phopilema esculentum*)等多种渔业生物的增殖放流,同时针对崂山湾人工鱼礁区生物群落结构已开展多项研究<sup>[23-26]</sup>。但崂山湾人工鱼礁区生态系统的整体特征、重要增殖种类生态容量等尚不明确。

本研究依据 2014—2016 年崂山湾人工鱼礁区生物资源和环境调查数据,构建了该特定生态系统的 Ecopath 模型,探讨该生态系统能量流动规律,分析其成熟度和稳定性,估算礁区重要养殖种类栉孔扇贝的生态容量,旨在为基于生态系统的渔业管理和人工鱼礁生态效果评价提供基础数据,为我国近海人工鱼礁投放和海洋牧场建设提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究海区概况

崂山湾人工鱼礁区位于山东省青岛市崂山湾南部海域,北起黄山口,南至崂山头,由黄山口、三亩前和列坡 3 片海区组成。2006 年开始人工鱼礁投放工作,2014 年春季建设完毕,共计投石 3.2 万空方,形成礁区 5 处,投石面积 39.7 hm<sup>2</sup>,于离岸 50 m—150 m 范围内以平行岸线和连片式丘陵型方式进行投放,形成鱼礁区面积 650 hm<sup>2</sup>。本研究以崂山湾人工鱼礁示范区为模拟区域(图 1)。模拟区域内平均水深为 10 m,近岸 50 m 至 150 m 范围内为人工鱼礁投放区,鱼类资源丰富,藻类生长繁茂,也是海参的主要底播增殖区;离岸 150 m 至 1500 m 范围内为扇贝养殖区。此外,张网、地笼网和刺网等是当地主要渔业捕捞方式。

### 1.2 Ecopath 模型建立

#### 1.2.1 模型功能组划分

本研究使用 Ecopath with Ecosim (EwE) 6.4 软件作为建模平台,通过构建 Ecopath 模型来评估青岛崂山湾人工鱼礁区生态系统各功能组间营养交互作用和能量流动规律<sup>[3-4,27]</sup>,其输出结果能够反映出生态系统的结构、功能和食物产出过程<sup>[28]</sup>。Ecopath 模型由一系列关联的功能组组成,所有功能组基本覆盖生态系统能量流动全过程。本研究依据生态系统中生物生态学特征以及崂山湾人工鱼礁区物种分布情况,同时参考生态系统特征相似水域 Ecopath 模型功能组划分<sup>[19,29]</sup>,将崂山湾人工鱼礁区生态系统划分为 17 个功能组,基本覆盖该生态系统各个营养级和能量流动全过程。将许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)、大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)、斑头鱼(*H. agrammus*)和日本鳀(*Charybdis japonica*)等海区优势种单独划分为一个功能组。刺参

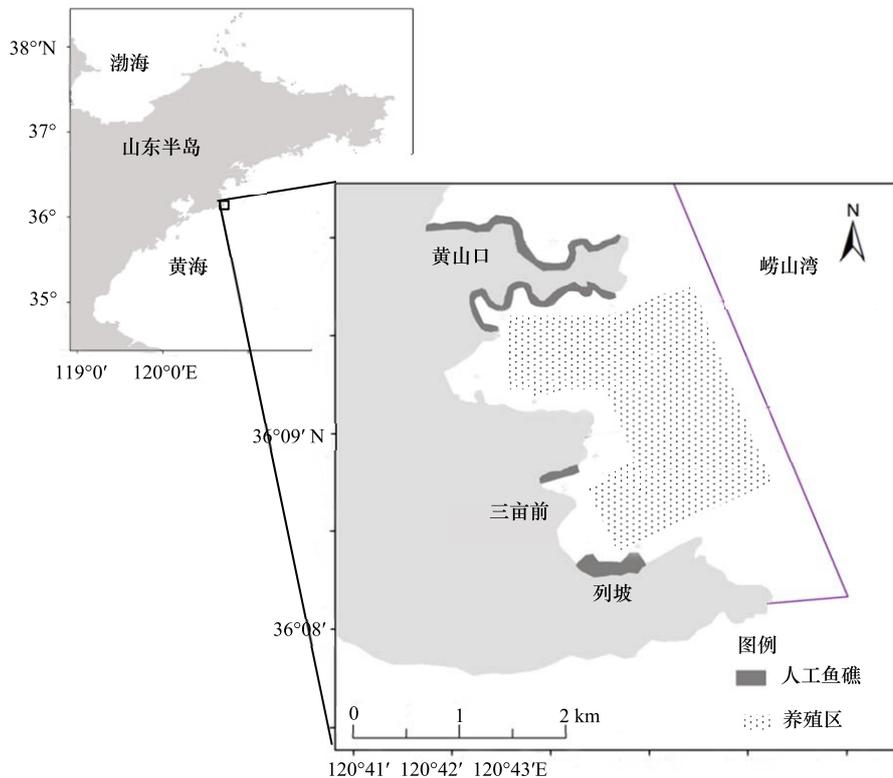


图1 崂山湾人工鱼礁区生态系统研究区域示意图

Fig.1 Sketch map of study area of Laoshan Bay artificial reef zone ecosystem

(*Apostichopus japonicus*) 和栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 是当地重要的增殖和养殖对象,生物量较大,对生态系统能量流动影响较大,单独划分为一个功能组。星康吉鳗 (*Conger myriaster*) 虽然生物量较低,但其营养级较高,在生态系统中处于关键地位,将其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、甲壳类、头足类、多毛类、软体动物、浮游动物、底栖海藻、浮游植物和有机碎屑。

### 1.2.2 模型功能组数据来源

本研究中能量流动以湿重 ( $t/km^2$ ) 表示,模拟时间为 1 年。浮游植物生物量根据叶绿素 a 的含量进行估算<sup>[29]</sup>;浮游动物、甲壳动物、多毛类和软体动物生物量参考崂山湾调查结果转换成湿重;岩礁性鱼类生物量根据周年调查结果计算体长-体重关系,结合相似生态系统的调查密度换算成单位面积生物量<sup>[29]</sup>;中上层鱼类和底栖藻类缺少调查数据,参考相似生态系统的研究结果<sup>[14,19,29]</sup> 提前设定 EE 值进行估算;有机碎屑根据水体中细菌生物量、溶解有机碳 (DOC) 和颗粒有机碳 (POC) 的量进行估算,其中细菌生物量为 17.5% 的浮游植物生物量<sup>[30]</sup>,DOC 和 POC 含量参考青岛近岸调查结果<sup>[31]</sup>。鱼类功能组的 P/B 和 Q/B 值通过经验公式并参考渔业资源数据库网站来确定,其他功能组的 P/B 和 Q/B 值参考临近纬度和生态系统特征大致相同的类似功能群<sup>[14,19,29]</sup>。部分鱼类功能组的食性来自现场胃含物分析,其他功能组的食性输入参考相关文献<sup>[2,19,29,32-34]</sup>。

### 1.2.3 模型调试

模型基本数据输入后需要对模型进行调试以保持生态系统输出和输入的平衡,系统平衡时满足  $0 < EE \leq 1$ <sup>[35]</sup>。由于模型中各功能组的 EE 值主要由模型估算获得,这就不可避免的会导致  $EE > 1$  的情况,在 10% 的范围内,对不平衡功能组的食物组成和输入数据进行反复调整,使每一功能组都满足  $0 < EE \leq 1$ 。

### 1.2.4 模型质量分析

参数来源的可靠性和准确性会影响 Ecopath 模型的质量,本研究通过 P 指数 (Pedigree index) 来量化这种

影响<sup>[36]</sup>。EwE 软件中内置的 Pedigree 程序可以依据各个功能组 B、P/B、Q/B 以及食物组成的来源进行赋值, 计算得出每个功能度的 P 指数, 进而求出模型整体的 P 指数。

### 1.2.5 混合营养效应和关键种分析

通过混合营养效应 (Mixed trophic impact, MTI) 分析各功能组和捕捞活动对生态系统的影响<sup>[1]</sup>。关键种分析以混合营养效应分析为基础, 其能够辨识出生物量相对较低但在生态系统中发挥重要作用的关键种<sup>[37-38]</sup>。

### 1.2.6 总体特征参数

系统的总体特征参数能够反映出系统的规模、稳定性和成熟度。包括总流量 (Total system throughput, TST)、总消耗 (Total consumption, TC)、总输出 (Total export, TEX)、总呼吸 (Total respiratory flows, TR)、流向碎屑量 (Total flow into detritus, TDET)、净初级生产量 (Net system production, NSP)、总生产量 (Total production, TP)、总初级生产量 (Calculated total net primary production, TPP)、总生物量 (Total biomass, TB)、总初级生产量/总生物量 (Total primary production/total biomass, TPP/TB)、总初级生产量/总呼吸量 (Total primary production/total respiration, TPP/TR)、平均捕捞营养级 (Mean trophic level of catch, MT)、连接指数 (Connectance Index, CI)、系统杂食指数 (System Omnivory Index, SOI)、营养级平均传递效率 (Mean transfer efficiency between trophic level, MTE)、Finn's 循环指数 (Finn's cycling index, FCI)、Finn's 平均路径长度 (Finn's mean path length, FML) 等参数<sup>[1]</sup>。

### 1.2.7 栉孔扇贝养殖容量

某一时期内, 特定环境条件下, 生态系统能够支持的某一种群的大小即为容纳量 (carrying capacity)<sup>[39]</sup>。Ecopath 模型调试平衡后, 其他参数保持不变, 逐渐增加栉孔扇贝的生物量, 当任一功能组的 EE 值大于 1 时, 表明系统平衡被打破, 此时栉孔扇贝的生物量即为海区生态容纳量。

## 2 结果

### 2.1 营养级特征

崂山湾人工鱼礁区 Ecopath 模型计算结果如表 1 所示, 各功能组营养级符合生态学基本规律。17 个功能

表 1 青岛崂山湾人工鱼礁区 Ecopath 模型功能组参数

Table 1 Parameters of Ecopath model in artificial reef area in Laoshan Bay, Qingdao

功能组 Functional group	生物量 B Biomass/ (t/km <sup>2</sup> )	生产量/生物量 P/B Production/ Biomass	消耗量/生物量 Q/B Consumption/ Biomass	生态营养效率 EE Ecological efficiency	营养级 Trophic level
星康吉鳗 <i>Conger myriaster</i>	0.264	0.95	3.2	0.744 *	4.255 *
许氏平鲷 <i>Sebastes schlegelii</i>	1.620	0.97	4.0	0.215 *	3.852 *
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	1.210	1.80	4.6	0.936 *	3.741 *
斑头鱼 <i>H. agrammus</i>	0.386	1.40	4.2	0.475 *	3.824 *
日本鳀 <i>Charybdis japonica</i>	1.341	4.60	14.0	0.092 *	3.257 *
栉孔扇贝 <i>Chlamys farreri</i>	160.000	5.70	20.3	0.184 *	2.000 *
刺参 <i>Apostichopus japonicus</i>	1.730	0.80	3.0	0.707 *	2.186 *
其他中上层鱼类 Other pelagic fishes	2.776 *	2.50	8.0	0.960	3.178 *
其他底层鱼类 Other demersal fishes	2.980	2.80	9.0	0.684 *	3.598 *
甲壳类 Crustaceans	12.800	6.00	23.0	0.982 *	3.212 *
头足类 Cephalopod	0.260	3.00	9.6	0.161 *	3.699 *
软体动物 Molluscs	15.200	8.00	26.2	0.901 *	2.690 *
多毛类 Ploychaetes	4.500	5.60	25.7	0.933 *	2.400 *
浮游动物 Zooplankton	14.600	28.20	122.0	0.729 *	2.000 *
底栖海藻 Benthic algae	16.331 *	9.88	—	0.500	1.000 *
浮游植物 Phytoplankton	26.200	130.00	—	0.233 *	1.000 *
有机碎屑 Detritus	83.000	—	—	0.934 *	1.000 *

\* 模型估算值, -相应值不存在, 其他值为输入数据

组的营养级范围 1.0—4.255,其中星康吉鳗的营养级最高,为 4.255,其次为许氏平鲷(3.852),头足类占据了无脊椎动物的最高营养级(3.699)。由生物量和营养级计算得出崂山湾人工鱼礁区高营养层次重要生物资源(许氏平鲷、星康吉鳗、大泷六线鱼、斑头鱼、日本鳎、其他中上层鱼类、其他底层鱼类和头足类)的平均营养级为 3.45。

2.2 营养级间的能量流动和转化效率

营养级间的转化效率(transfer efficiency)为输出和被摄食的能量和占总能量的比例,其表示某一营养级能量在系统中被利用的效率。崂山湾人工鱼礁区生态系统营养层级间的能量流动图显示(图 2):系统总的初级生产量为 3567.354 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,其中有 873 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>的能量传递到营养级 II。流入碎屑的总能量为 4761 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,其中 2694 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>的能量来自初级生产者,系统流入 II、III、IV、V 营养级的能量分别占系统总能量的 37.630%、3.022%、0.412%和 0.035%。崂山湾生态系统各功能组可以整合为 5 个营养级(表 2),起源于碎屑的能量在营养级 I 和营养级 II 之间的流动效率为 10.1%,最高能量流动效率发生在营养级 II 和 III 之间,来自碎屑和初级生产者的能量流动效率分别达 13.0%和 13.8%。系统总的能量转换效率为 10.8%,其中生产者转换效率为 9.8%,碎屑转换效率为 10.9%。

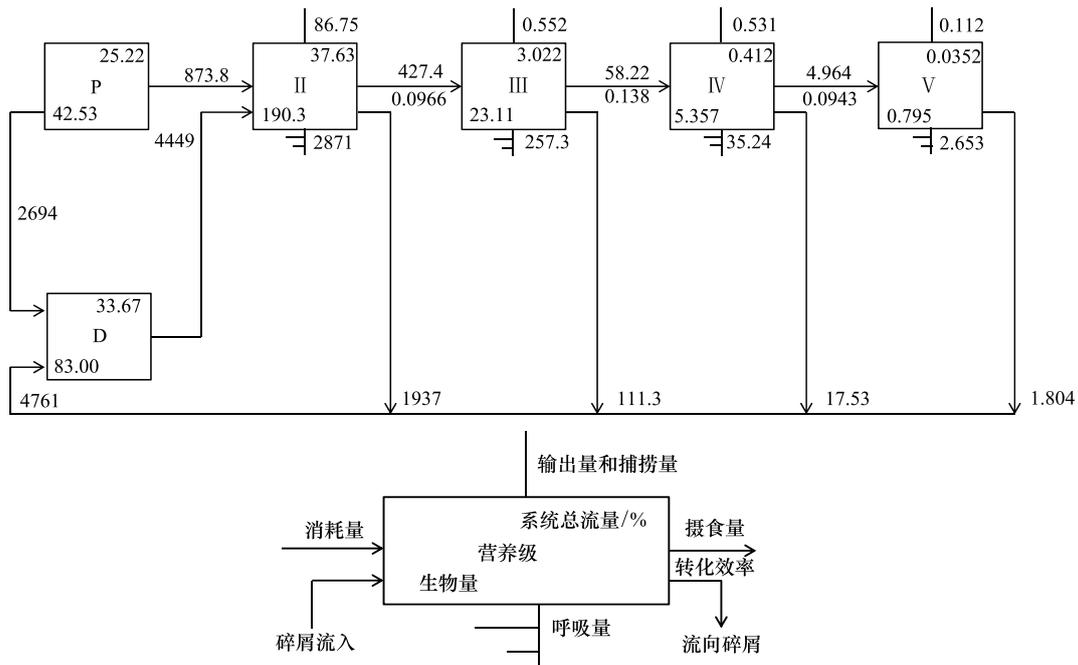


图 2 崂山湾人工鱼礁区生态系统能量流动图

Fig.2 Flow diagram of artificial reef ecosystem in Laoshan Bay

表 2 崂山湾人工鱼礁区生态系统各营养级转换效率/%

Table 2 Transfer efficiency of discrete trophic levels in Laoshan Bay artificial reef ecosystem

能量来源 Source	营养级 Trophic level			
	II	III	IV	V
生产者 Producer	7.7	13.0	9.5	10.7
碎屑 Detritus	10.1	13.8	9.4	10.5
总能流 All flows	9.7	13.8	9.4	10.5
能量来自碎屑比例 Proportion of total flow originating from detritus	68			
生产者转换效率 From primary producers	9.8			
碎屑转换效率 From detritus	10.9			
总转换效率 Total	10.8			

### 2.3 系统总体特征

崂山湾人工鱼礁区生态系统总体特征结果显示(表3):当前系统总流量为  $14256.510 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 其中68%的能量来自碎屑供给, 系统总消耗量、总输出量、总呼吸量、总生产量和总生物量分别为  $5927.582 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $400.767 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $3166.588 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $5142.832 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和  $262.199 \text{ t km}^{-2}$ , 与其他同类型生态系统相比, 崂山湾人工鱼礁区生态系统规模较大; 系统总初级生产力和总呼吸量的比值为1.127, 循环指数为20.95%, 表明系统处于比较成熟的状态; 系统联结指数和杂食指数分别为0.293和0.333, 处于较高水平, 表明系统食物网结构相对比较复杂, 系统稳定性较高; 系统平均捕捞营养级仅为2.026, 处于较低水平。

表3 崂山湾人工鱼礁区生态系统与其他模型系统特征参数的比较

Table 3 Comparison of system attributes of Laoshan Bay artificial reef model with other models

特征参数 Attribute parameter	本研究 This paper	俚岛 <sup>[13]</sup> Li Island	獐子岛 <sup>[14]</sup> Zhangzi Island	嵎泗 <sup>[12]</sup> Shengsi	莱州朱旺 <sup>[19]</sup> Zhuwang in Laizhou	枸杞岛 <sup>[40]</sup> Gouqi Island	加拉帕格斯 <sup>[41]</sup> Galápagos
系统总流量 TST/( $\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	14256.51	10786.68	18393.09	5160.00	3390.13	28019.00	94850.00
总初级生产量 TPP/( $\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	3567.35	4131.97	14546.27	1730.16	1026.94	11604.00	13250.00
总初级生产量/总呼吸量 TPP/TR	1.127	1.840	2.197	1.385	1.035	1.247	0.480
连接指数 CI	0.293	0.200	0.224	—	0.444	0.331	0.160
杂食指数 SOI	0.333	0.120	0.172	—	0.360	0.222	0.250
循环指数 FCI	20.95	5	9.12	—	12.23	—	—
平均能流路径 FCI	3.996	2.620	3.486	—	3.301	2.949	—

TST: 系统总流量, Total system throughput; TPP: 总初级生产量, Calculated total net primary production; TPP/TR: 系统总流量/总呼吸量, Total system throughput/Total respiratory flows; CI: 连接指数, Connectance index; SOI: 杂食指数, System omnivory index; FCI: 循环指数, Finn's cycling index; FML: 平均路径长度, Finn's mean path length

### 2.4 功能组间的食物联系和混合营养效应

崂山湾人工鱼礁区生态系统物质流动图显示(图3):生态系统内部各功能组联系较为密切, 多毛类、软体动物和甲壳类在整个生态系统中扮演重要角色, 它们是初级生产者和高营养级消费者联系的桥梁。崂山湾人工鱼礁区生态系统的食物链主要由以下3条途径组成:(1)底栖生产者(浮游植物、底栖藻类和碎屑)→底栖

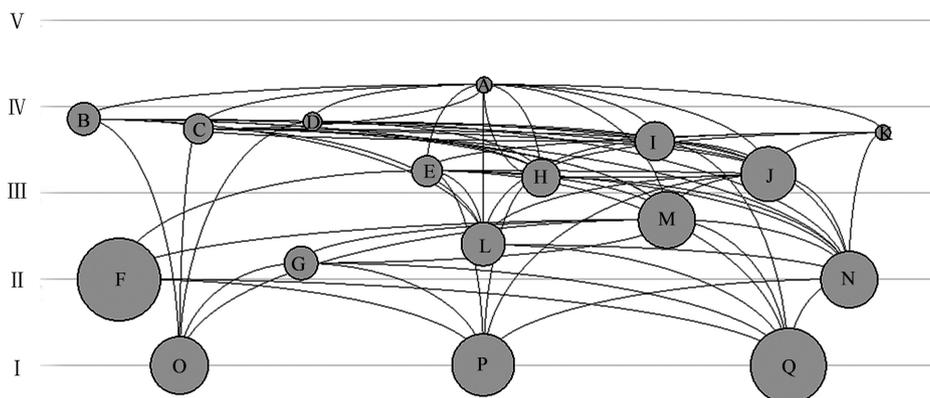


图3 崂山湾人工鱼礁区生态系统物质流动图

Fig.3 Material flow diagram of artificial reef ecosystem in Laoshan Bay

A: 星康吉鳗, *Conger myriaster*; B: 许氏平鲷, *Sebastes schlegelii*; C: 大泷六线鱼, *Hexagrammos otakii*; D: 斑头鱼, *H. agrammus*; E: 日本鲷, *Charybdis japonica*; F: 栉孔扇贝, *Chlamys farreri*; G: 刺参, *Apostichopus japonicas*; H: 其他中上层鱼类, Other pelagic fishes; I: 其他底层鱼类, Other demersal fishes; J: 甲壳类, Crustaceans; K: 头足类, Cephalopod; L: 多毛类, Ploychaetes; M: 软体动物, Molluscs; N: 浮游动物, Zooplankton; O: 底栖海藻, Benthic algae; P: 浮游植物, Phytoplankton; Q: 碎屑, Detritus

无脊椎动物(甲壳类和软体动物)→底层低营养级鱼类(小型底层鱼类)→底层高营养级鱼类(许氏平鲈、星康吉鳎);(2)生产者(浮游植物、碎屑)→栉孔扇贝、刺参,这条食物链最短;(3)生产者(浮游植物、底栖藻类和碎屑)→无脊椎动物(软体动物、甲壳类)→中上层鱼类。

通过混合营养效应分析生态系统各功能组间的直接或间接作用,估计某个功能组生物量的变化对其他功能组的影响<sup>[36]</sup>。崂山湾人工鱼礁区生态系统各功能组间的营养关系图显示(图4):捕食者对其主要饵料生物具有明显负效应,相反,饵料生物的增加则会对捕食者产生积极影响。碎屑、浮游植物、底栖海藻和浮游动物等对其他多数功能组的影响为正效应,其中碎屑对多毛类和浮游动物的影响较强烈;捕捞活动对所有渔业生物功能组具有明显负影响;各功能组对其本身具有明显负效应,这主要是由于同一功能组内的生物生态习性相似,在食物和栖息空间等方面存在竞争。此外,由于生态系统内存在营养级联效应,使得捕捞活动对碎屑、浮游植物等功能组具有一定的正效应。

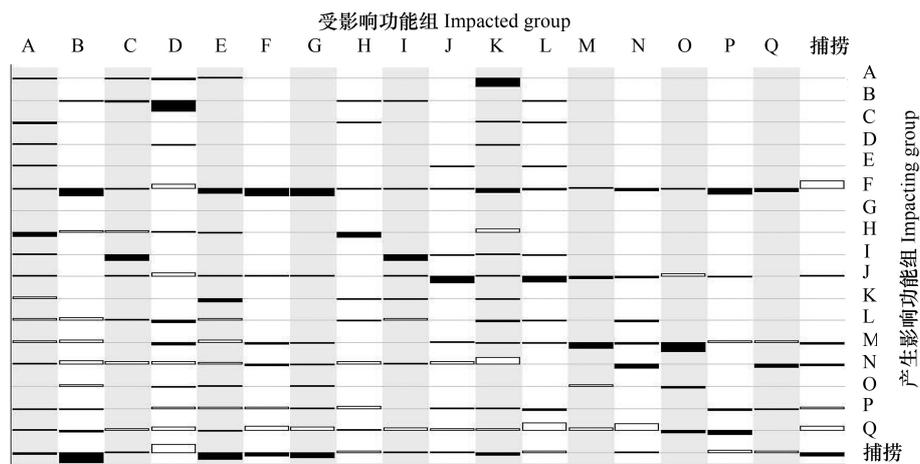


图4 崂山湾人工鱼礁区生态系统营养关系图

Fig.4 Mix trophic impacts analysis for artificial reef ecosystem in Laoshan Bay

基线上方灰块为积极影响,基线下方为消极影响,灰块大小代表影响强弱

## 2.5 关键种分析

通过关键种分析确定海区生态系统关键种,其具有较高的关键指数和相对总影响。关键种分析结果显示(表4):17个功能组的关键指数1和关键指数2存在较大差异,许氏平鲈的关键指数1为-0.129,在17个功能组中排第2位,其关键指数2为2.083,仅次于星康吉鳎(2.763)和头足类(2.367),许氏平鲈相对总影响为0.759,在17个功能组中排第2位。许氏平鲈的关键指数和相对总影响值均较大,表明其可能在当前模拟的生态系统中扮演重要生态角色。软体动物在当前模拟的生态系统中也应具有重要的生态功能。分析认为,栉孔扇贝虽然生物量较大,受吊笼养殖方式的限制,使其除浮游植物外与其他功能组无直接营养关系,这可能导致其关键指数值较低。

## 2.6 栉孔扇贝生态容纳量的估算

栉孔扇贝是崂山湾人工鱼礁区主要笼养对象,根据当地养殖户走访调查估算其现存生物量为 $160 \text{ t/km}^2$ ,其生物量占系统总生物量(不包括碎屑生物量)的61.02%,远高于系统其他功能组的生物量。依据模型生态容量的计算方法,以1%的比例逐渐增加栉孔扇贝的生物量,其他功能组的生物量和其他输入参数保持不变。随着栉孔扇贝生物量的逐渐增加,系统各功能组的生态效率发生相应改变,当栉孔扇贝的生物量增加18.55%,即生物量由 $160 \text{ t/km}^2$ 增加至 $189.679 \text{ t/km}^2$ 时,碎屑功能组的 $EE = 1.0001 > 1$ ,系统平衡被打破。此时,系统基本参数未发生较大改变(表5),因此确定崂山湾人工鱼礁区生态系统栉孔扇贝的养殖容量为 $189.679 \text{ t/km}^2$ 。

表 4 崂山湾人工鱼礁区各功能组关键种和相对总影响指数

Table 4 Keystonesness and relative total impact of every functional group in artificial reef zone, Laoshan Bay

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
星康吉鳗 <i>Conger myriaster</i>	-0.235	2.763	0.592
许氏平鲈 <i>Sebastes schlegelii</i>	-0.129	2.083	0.759
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	-0.800	1.537	0.161
斑头鱼 <i>H. agrammus</i>	-1.107	1.726	0.079
日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	-1.096	1.197	0.082
刺参 <i>Apostichopus japonicus</i>	-0.415	0.208	1.000
栉孔扇贝 <i>Chlamys farreri</i>	-2.061	0.123	0.009
其他中上层鱼类 Other pelagic fishes	-0.393	1.587	0.415
其他底层鱼类 Other demersal fishes	-0.393	1.557	0.415
甲壳类 Crustaceans	-0.269	1.064	0.574
头足类 Cephalopod	-0.637	2.367	0.234
多毛类 Ploychaetes	-0.482	1.291	0.340
软体动物 Molluscs	-0.171	1.092	0.726
浮游动物 Zooplankton	-0.236	1.043	0.623
底栖海藻 Benthic algae	-0.737	0.497	0.198
浮游植物 Phytoplankton	-0.563	0.483	0.308

表 5 崂山湾人工鱼礁区生态系统总体特征

Table 5 The total system parameters of artificial reef ecosystem in Laoshan Bay

特征参数 Attribute parameter	估值 Value	估值 Value *	特征参数 Attribute parameter	估值 Value	估值 Value *
总消耗量 TC/(t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	5927.582	6530.046	总初级生产量/总生物量 TPP/TB	13.606	12.222
总输出量 TEX/(t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	400.767	87.961	总初级生产量/总呼吸量 TPP/TR	1.127	1.025
总呼吸量 TR/(t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	3166.588	3479.394	平均捕捞营养级 MT	2.026	2.026
流向碎屑总量 TDET/(t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	4761.573	4930.738	连接指数 CI	0.293	0.294
系统总流量 TST/(t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	14256.510	15028.140	系统杂食指数 SOI	0.333	0.332
总生产量 TP/(t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	5142.832	5311.997	循环指数 FCI	20.95%	23.63%
净系统生产量 NSP/(t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	400.767	87.961	平均能流路径 FML	3.996	4.213
总初级生产量 TPP/(t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	3567.354	3567.354	P 指数 PI	0.357	0.357
总生物量(不包括碎屑) TB/(t km <sup>2</sup> )	262.199	291.877			

TC: 总消耗量, Total consumption; TEX: 总输出量, Total export; TR: 总呼吸量, Total respiratory flows; TDET: 流向碎屑总量, Total flow into detritus; TP: 总生产量, Total production; NSP: 净系统生产量, Net system production; TB: 总生物量, Total biomass; TPP/TB: 总初级生产量/总生物量, Calculated total net primary production/Total biomass; MT: 平均捕捞营养级, Mean trophic level of catch; PI: P 指数, Pedigree index; Value 表示未大量引入栉孔扇贝前系统状态; Value \* 表示大量引入栉孔扇贝后系统状态

### 3 讨论

#### 3.1 模型质量评价

本研究依据崂山湾人工鱼礁区的调查数据,结合历史文献资料,利用 EwE 软件构建了崂山湾人工鱼礁区的 Ecopath 模型,定量分析了人工鱼礁区生态系统的结构和功能。本研究用 P 指数来评价模型输入参数的总体质量,崂山湾人工鱼礁区生态模型的 P 指数为 0.357,该数值位于全球 150 个 Ecopath 模型 P 指数范围 (0.16—0.68) 的中游<sup>[42]</sup>,表明该模型参数来源可靠性较好,可信度较高。但在建模过程中仍面临一定的问题,如由于取样方式和当地生态环境的限制,所有中上层鱼类被划分为一个功能组,其生物量主要通过模型进行估算,不能反映整个生态系统中上层鱼类的种类和生物量组成。此外,功能组 P/B、Q/B 和食性组成等参数

的输入也存在一定不确定性,可能会对模型质量产生影响。今后建模应采用多种调查方式结合,细化功能组分类,结合胃含物分析和稳定同位素分析结果获取海区更多的营养信息,提高数据采集的精度和模型质量。

### 3.2 生态系统营养级和转化效率

通过营养级分析能够获得各营养级功能组生物在食物链中的相对位置,对了解海洋生态系统的结构和功能具有重要意义<sup>[40]</sup>。崂山湾人工鱼礁区生态系统的总流量和总生物量主要分布在前3个营养级(生产者,草食性、滤食性和碎屑食性消费者),其中营养级 I 中的能量占总流量的 25.22%,生物量占总生物量的 16.23%,营养级 II 中的能量占总能量的 37.63%,生物量占总生物量的 72.58%,营养级 III 中的能量占总流量的 3.02%,生物量占总生物量的 8.81%。当前系统的平均捕捞营养级仅为 2.026,与俚岛人工鱼礁区生态系统的平均捕捞营养级(2.09)接近<sup>[29]</sup>,低于全球岩礁生态系统的平均营养级(2.50)<sup>[43]</sup>。分析认为,一方面,海区扇贝养殖量较大,其生物量占总生物量、采捕量占总捕捞产量均达 60%以上;另一方面,海区渔业生物主要以小型低营养级游泳动物(如日本蟳、玉筋鱼、方氏云鳎)和刺参等为主,关键种类的饵料主要以小型甲壳类、端足类和多毛类为主<sup>[44]</sup>,这导致了崂山湾人工鱼礁区生态系统的平均捕捞营养级偏低。

崂山湾人工鱼礁区生态系统的能量转化效率较高,营养级 II 到营养级 III 的转化效率最高,表明低营养级功能组在能量转化过程中发挥重要作用。系统总的转化效率为 10.8%,接近林德曼效率(10%)<sup>[45]</sup>,与全球 48 个水生态系统的的结果相近(10.1%)<sup>[43]</sup>。本研究中,68%的能量通过碎屑通道传递到高层次营养级,与传统岩礁区以碎屑通道为主的模式一致。分析认为:崂山湾人工鱼礁区位于近岸水域,藻类资源丰富,海藻腐败会产生大量碎屑,导致碎屑提供的能量占有较大比重,但起源于碎屑的能量在系统中具体的传递形式还有待进一步查证。

### 3.3 生态系统总体特征

对比同纬度或相似类型生态系统来描述崂山湾人工鱼礁区生态系统特征和能量流动状态。崂山湾人工鱼礁区生态系统规模明显高于俚岛<sup>[13]</sup>、獐子岛<sup>[14]</sup>、嵎泗<sup>[12]</sup>、莱州湾朱旺<sup>[19]</sup>等人工鱼礁区生态系统,低于枸杞岛海藻场生态系统<sup>[40]</sup>和加拉帕戈斯潮下岩礁生态系统<sup>[41]</sup>;TPP/TR、FCI 和 FML 是表征系统成熟状况的指标,越成熟的生态系统,其内部多余的生产量就越少,TPP/TR 值越接近 1,此时系统内部物质再循环比例也较高,能量流动所经过的食物链也较长;CI 和杂食指数 SOI 是反映系统内部联系复杂程度的指标,越成熟的系统,其内部联系就越强,系统稳定性越强。崂山湾人工鱼礁区生态系统的 TPP/TR、FCI、FML、CI 和 SOI 等指标均明显优于多数临近纬度和相似类型生态系统<sup>[12-14]</sup>,表明该生态系统相对比较成熟,系统内部联系和抗干扰能力较强。分析认为:崂山湾人工鱼礁区位于崂山风景区内,环境优良,藻类资源丰富,海藻场、人工鱼礁和近岸自然礁石等共同构成了近岸水域生态系统。一方面,鱼礁和海藻组成的生态系统为多种生物提供了良好的庇护场所和稳定的栖息环境,另一方面,鱼礁内部的游泳动物和海藻上的附着生物为系统提供了丰富的饵料来源。此外,海藻产生的碎屑被分解成营养盐,有利于浮游植物的繁殖,提高了海区基础生产力。海藻和礁石共同构成复杂的空间环境,丰富的生物相互依赖,使得崂山湾人工鱼礁区生态系统相对成熟,稳定性较好。

### 3.4 栉孔扇贝生态容纳量

据当地养殖户走访调查,估算崂山湾人工鱼礁区栉孔扇贝养殖的现存生物量为 160 t/km<sup>2</sup>,距海区生态容纳量(189.679 t/km<sup>2</sup>)尚有 18.55%的增殖空间。2009 年张继红等<sup>[46]</sup>通过计算海区初级生产力和叶绿素 a 含量,估算獐子岛海域虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)养殖容量,结果表明开展浮筏养殖后当地扇贝养殖量可扩大 20 倍。本研究吊笼养殖栉孔扇贝的生态容纳量与獐子岛人工鱼礁区 2011 和 2012 年底播虾夷扇贝容纳量的估值(168.5 t/km<sup>2</sup>和 217 t/km<sup>2</sup>)接近<sup>[47]</sup>。据报道,2017 年獐子岛底播虾夷扇贝量约为 150 t/km<sup>2</sup>(数据依据獐子岛扇贝底播存量调查进行估算),但其周边海域尚有大面积的浮筏养殖,因此推断獐子岛海域虾夷扇贝早已超出其生态容纳量,存在增养殖密度过大的可能。本研究从能量平衡角度估算了崂山湾人工鱼礁区栉孔扇贝的生态容纳量,但 Ecopath 模型在估算生态容纳量时未考虑空间变化,也未考虑生态系统内部各营养级生物的生长变化,缺乏相关生物学变量的考虑,评估结果过于理论化<sup>[46]</sup>。任何一个模型都有其局限性,本

研究所估算的生态容纳量虽然没有考虑生物的季节变化和生长变化,依然可为扇贝增养殖容量的确立提供借鉴。近些年,随着我国海洋牧场建设和增养殖规模的进一步扩大,基于生态系统营养动力学理论评估生态系统的结构和功能,估算人工鱼礁区生态系统的增养殖容量,不仅可以为增殖型人工鱼礁建设和海洋牧场增养殖种类结构优化与可持续产出提供参考,也可为基于生态系统水平的渔业管理提供合理建议<sup>[29]</sup>。

本研究发现,崂山湾人工鱼礁区生态系统规模较大,系统的成熟度和稳定性较高,抵抗外界干扰的能力较强,但由于海洋生态系统的复杂性和不可控性,需要开展长期监测研究。投放人工鱼礁、建设海洋牧场虽然在一定程度上可以修复或改善受损的海洋生态环境,但人工鱼礁对环境的改善是长期而缓慢的过程。崂山湾人工鱼礁区建成时间尚短,应合理控制海区增养殖规模和捕捞强度,以充分发挥人工鱼礁的资源养护与环境修复生态功能。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [ 2 ] 全龄,唐启升,Pauly D. 渤海生态通道模型初探(英文). *应用生态学报*, 2000, 11(3): 435-440.
- [ 3 ] Polovina J J. Model of a coral reef ecosystem. *Coral reefs*, 1984, 3(1): 1-11.
- [ 4 ] Christensen V, Pauly D. ECOPATH II—a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecological modelling*, 1992, 61(3/4): 169-185.
- [ 5 ] Walters C, Christensen V, Pauly D. Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments. *Reviews in fish biology and fisheries*, 1997, 7(2): 139-172.
- [ 6 ] Walters C, Pauly D, Christensen V, Kitchell J F. Representing density dependent consequences of life history strategies in aquatic ecosystems: EcoSim II. *Ecosystems*, 2000, 3(1): 70-83.
- [ 7 ] Geers T M, Pikitch E K, Frisk M G. An original model of the northern Gulf of Mexico using Ecopath with Ecosim and its implications for the effects of fishing on ecosystem structure and maturity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, 129: 319-331.
- [ 8 ] Lin H J, Shao K T, Jan R Q, Hsieh H L, Chen C P, Hsieh L Y, Hsiao Y T. A trophic model for the Danshuei River Estuary, a hypoxic estuary in northern Taiwan. *Marine pollution bulletin*, 2007, 54(11): 1789-1800.
- [ 9 ] Heymans J J, Shannon L J, Jarre A. Changes in the northern Benguela ecosystem over three decades: 1970s, 1980s, and 1990s. *Ecological modelling*, 2004, 172(2): 175-195.
- [ 10 ] Morales-Zúrate M V, Arreguin-Sánchez F, López-Martínez J, Lluch-Cota S E. Ecosystem trophic structure and energy flux in the Northern Gulf of California, México. *Ecological Modelling*, 2004, 174(4): 331-345.
- [ 11 ] Pinkerton M H, Lundquist C J, Duffy C A J, Freeman D J. Trophic modelling of a New Zealand rocky reef ecosystem using simultaneous adjustment of diet, biomass and energetic parameters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 367(2): 189-203.
- [ 12 ] 李永刚,汪振华,章守宇. 崂山湾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.
- [ 13 ] 吴忠鑫,张秀梅,张磊,佟飞,刘洪军. 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.
- [ 14 ] 许慎行,陈勇,田涛,刘永虎,尹增强,刘汉超. 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.
- [ 15 ] 张明亮,冷悦山,吕振波,李凡,王田田,张爱波. 莱州湾三疣梭子蟹生态容量估算. *海洋渔业*, 2013, 35(3): 303-308.
- [ 16 ] 林群,王俊,李忠义,吴强. 黄河口邻近海域生态系统能量流动与三疣梭子蟹增养殖容量估算. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3523-3531.
- [ 17 ] 王腾,张贺,张虎,张硕. 基于营养通道模型的海州湾中国明对虾生态容纳量. *中国水产科学*, 2016, 23(4): 965-975.
- [ 18 ] 林群,李显森,李忠义,金显仕. 基于 Ecopath 模型的莱州湾中国明对虾增养殖生态容量. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1131-1140.
- [ 19 ] 杨超杰,吴忠鑫,刘鸿雁,张沛东,李文涛,曾晓起,张秀梅. 基于 Ecopath 模型估算莱州湾朱旺人工鱼礁区日本蝠、脉红螺捕捞策略和刺参增养殖生态容量. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(11): 168-177.
- [ 20 ] 袁伟,林群,王俊,孙坚强,陈瑞盛. 崂山湾中国对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 增殖放流的效果评价. *渔业科学进展*, 2015, 36(4): 27-34.
- [ 21 ] 梅春,任一平,徐宾铎,范延琛. 崂山湾日本对虾增殖放流效果的初步研究. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(09): 45-50.
- [ 22 ] 卢晓,董天威,涂忠,信敬福,王云中,王四杰,王培亮. 山东省三疣梭子蟹增殖放流回顾与思考[J]. *渔业信息与战略*, 2018, 33(2): 104-108.
- [ 23 ] 郭书新,高东奎,张秀梅,李文涛,张沛东. 青岛崂山青山湾人工鱼礁区及附近海域鱼卵仔稚鱼种类组成与数量分布. *应用生态学报*,

- 2017, 28(6): 1984-1992.
- [24] 刘鸿雁, 杨超杰, 张沛东, 李文涛, 杨晓龙, 张秀梅. 青岛崂山湾人工鱼礁区底层游泳动物群落结构特征. 生物多样性, 2016, 24(8): 896-906.
- [25] 王欣, 盛化香, 唐衍力, 黄六一, 万荣. 崂山湾人工鱼礁区浮游植物群落结构与环境因子的关系. 渔业科学进展, 2014, 35(4): 7-12.
- [26] 盛化香. 崂山湾人工鱼礁区底栖大型海藻群落的季节性和区域性变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [27] Pauly D, Christensen V, Walters C. Ecopath, Ecosim, and Ecospace as tools for evaluating ecosystem impact of fisheries. ICES Journal of Marine Science, 2000, 57(3): 697-706.
- [28] Scheffer M. Ecology of shallow lakes. London: Chapman & Hall, 1998.
- [29] 吴忠鑫. 山东俚岛人工鱼礁区生态效果初步评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [30] 刘其根, 王钰博, 陈立侨, 陈勇, 刘国栋, 陈马康, 何光喜, 陈来生, 洪荣华. 保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响. 生态学报, 2010, 30(10): 2774-2783.
- [31] 梁成菊. 青岛近海有机碳的分布特征及影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [32] 张宝琳, 孙道元, 吴耀泉. 灵山岛浅海岩礁区刺参(*Apostichopus japonicus*)食性初步分析. 海洋科学, 1995, (3): 11-13.
- [33] 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, 2001, 16(9): 8-16.
- [34] Jiang H, Cheng H Q, Xu H G, Arreguín-Sánchez F, Zetina-Rejón M J, Del Monte Luna P. Trophic controls of jellyfish blooms and links with fisheries in the East China Sea. Ecological Modelling, 2008, 212(3/4): 492-503.
- [35] Christensen V, Walters C J, Pauly D. Ecopath with Ecosim: a user's guide. Vancouver, Columbia: Fisheries Centre, University of British Columbia, 2005, 154.
- [36] Christensen V, Walters C J. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations. Ecological modelling, 2004, 172(2/4): 109-139.
- [37] Power M E, Tilman D, Estes J A, Menge B A, Bond W J, Mills L S, Daily G, Castilla J C, Lubchenco J, Paine R T. Challenges in the quest for keystones. BioScience, 1996, 46(8): 609-620.
- [38] Libralato S, Christensen V, Pauly D. A method for identifying keystone species in food web models. Ecological Modelling, 2006, 195(3/4): 153-171.
- [39] 唐启升. 关于容纳量及其研究. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 1-6.
- [40] 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.
- [41] Okey T A, Banks S, Born A F, Bustamante R H, Calvopiña M, Edgar G J, Espinoza E, Fariña J M, Garske L E, Reck G K, Salazar S, Shepherd S, Toral-Granda V, Wallem P. A trophic model of a Galápagos subtidal rocky reef for evaluating fisheries and conservation strategies. Ecological Modelling, 2004, 172(2/4): 383-401.
- [42] 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[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2007.
- [43] Pauly D, Christensen V. Primary production required to sustain global fisheries. Nature, 1995, 374(6519): 255-257.
- [44] 张波, 袁伟, 王俊. 崂山湾春季鱼类群落的摄食生态及其主要种类. 中国水产科学, 2015, 22(4): 820-827.
- [45] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. Ecology, 1942, 23(4): 399-417.
- [46] 张继红, 方建光, 王巍. 浅海养殖滤食性贝类生态容量的研究进展. 中国水产科学, 2009, 16(4): 626-632.
- [47] 许祯行. 基于 Ecopath 模型的獐子岛人工鱼礁区生态系统功能评价[D]. 大连: 大连海洋大学, 2015.