

## 基于 Ecopath 模型的珠江口 6 种增殖放流种类生态容纳量估算

刘岩<sup>1</sup>, 吴忠鑫<sup>2</sup>, 杨长平<sup>1</sup>, 单斌斌<sup>1</sup>, 刘胜男<sup>1</sup>, 孙典荣<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东广州 510300; 2. 大连海洋大学, 辽宁大连 116023)

**摘要:** 增殖放流是渔业资源养护的重要方式。放流前对放流海域进行生态容纳量评估, 有计划地实施增殖放流活动, 可避免对原有生态系统造成破坏。文章根据 2016 年珠江口渔业资源数据, 构建了由 29 个功能组组成的基于珠江口的生态系统通道 (Ecopath) 模型, 利用该模型分析了生态系统的总体特征、食物网结构与混合营养效应, 估算了适宜于该水域的 6 种不同增殖放流种类的生态容纳量。结果表明, 功能组营养级范围为 1~4.2 级, 6 种适宜放流种类营养级介于 2.2~3.7, 最高营养级功能组为哺乳动物, 系统总流量  $9\,092.447\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , 系统总能量转化效率 12.23%, 连接指数 0.370, 系统杂食指数 0.287。食物链通道主要有 2 类, 以碎屑食物链为主。花鲈 (*Lateolabrax japonicus*)、黑鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*)、黄鳍鲷 (*A. latus*)、长毛对虾 (*Penaeus penicillatus*)、墨吉对虾 (*P. monodon*) 和波纹巴非蛤 (*Paphia undulata*) 的最大容纳量分别为  $0.094\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 、 $0.500\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 、 $0.650\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 、 $1.580\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 、 $1.610\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$  和  $75.870\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

**关键词:** Ecopath 模型; 生态容纳量; 增殖放流; 珠江口

中图分类号: S 937.3

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Ecological carrying capacity of six species of stock enhancement in Pearl River estuary based on Ecopath model

LIU Yan<sup>1</sup>, WU Zhongxin<sup>2</sup>, YANG Changping<sup>1</sup>, SHAN Binbin<sup>1</sup>, LIU Shengnan<sup>1</sup>, SUN Dianrong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Stock enhancement is important for conservation of exploitable resources. Assessment of ecological capacity of the discharged sea area before discharge and planned implementation of proliferation and discharge activities can avoid damage to the original ecosystem. Based on the survey data of the fishery resources of Pearl River estuary in 2016, an Ecopath mass-balance model of the Pearl River estuary ecosystem consisting of 29 functional groups was constructed. Thus, the overall characteristics of the ecosystem, the food-web structure and the mixed trophic impact were analyzed. The ecological carrying capacities of six species of stock enhancement which were suitable for this area were estimated. The results show that the fractional trophic levels ranged from 1 to 4.2, and those of the six species ranged from 2.2 to 3.7, with marine mammals occupying the highest trophic level. The total system throughput of the ecosystem was  $9\,092.447\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , and the total energy transfer efficiency was 12.23%. The connectance index

收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2019-04-01

资助项目: 中国-东盟海上合作基金中越北部湾渔业资源增殖放流与养护项目; 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201303048)

作者简介: 刘岩 (1988—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事渔业资源保护有关研究。E-mail: 365830796@qq.com

通信作者: 孙典荣 (1973—), 男, 硕士, 研究员, 从事渔业资源调查利用与生态修复研究。E-mail: drsun73@163.com

and system omnivory index were 0.370 and 0.287, respectively. There were two main channels of food chain in the ecosystem, and the energy flow was dominated by grazing food chain. The ecological carrying capacities of biomass for *Lateolabrax japonicus*, *Acanthopagrus schlegelii*, *A. latus*, *Penaeus penicillatus*, *P. monodon* and *Paphia undulata* were  $0.094 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,  $0.500 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,  $0.650 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,  $1.580 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,  $1.610 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$  and  $75.870 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ , respectively.

**Key words:** Ecopath model; ecological carrying capacity; enhancement; Pearl River estuary

珠江口海域因珠江径流带来的丰富营养物质,成为我国南海北部的重要渔场之一<sup>[1-2]</sup>。20世纪80—90年代珠江口渔业资源尤为丰富,经济鱼类曾达50余种,海洋捕捞总产量达30万吨以上<sup>[3]</sup>。随着经济发展带来的环境污染与破坏以及捕捞压力的急剧增大,使得该海域渔业资源种类与产量大幅下降<sup>[4]</sup>。增殖放流是渔业资源养护的重要方式之一,我国增殖放流规模与范围逐年扩大,并取得一定效果<sup>[5]</sup>。开展增殖放流前,对放流海域进行放流种类的生态容纳量评估,有计划地实施增殖放流活动,可避免对原有生态系统造成破坏。

生态通道模型(Ecopath)是由国际水生资源管理中心(ICLARM)开发的食物网分析软件(Ecopath with Ecosim, EwE)中的一部分<sup>[6]</sup>。该模型基于生态系统的营养动力学原理,划分不同的功能组,构建水域生态系统结构、描述生态系统的能量流动与平衡、定量生态系统特征值,评价生态系统的稳定性与成熟度<sup>[7-8]</sup>;在研究渔业资源衰退机制、预测不同渔业政策对海洋生态系统和渔业效益的影响等方面同样有诸多应用<sup>[8]</sup>。许祯行等<sup>[9]</sup>基于Ecopath模型构建评价了獐子岛人工礁区生态系统稳定性,陈作志等<sup>[10]</sup>基于该模型构建并预测了捕捞压力对北部湾海洋生态系统的影响。Ecopath模型在评价增殖放流对水域生态系统的影响、估算水域特定增殖种类生态容纳量上同样适用,杨超杰等<sup>[11]</sup>用该模型估算了莱州湾刺参(*Apostichopus japonicus*)的适宜增殖容量并提出底播增殖管理策略,吴忠鑫等<sup>[12]</sup>估算了荣成俚岛人工鱼礁区刺参和皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)的生态容纳量,王腾等<sup>[13]</sup>估算了海州湾中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)的生态容纳量。

珠江口水域,最早由刘玉等<sup>[14]</sup>于2008年提出其生态系统的EwE模型功能组划分;段丽杰<sup>[4]</sup>基于1981年与1998年的渔业和生态数据,构建了该海域的Ecopath生态模型。关于珠江口水域Ecopath模型的水域增殖种类生态容纳量的研究还未见报道。本研究选取“农业部关于做好‘十三五’水

生生物增殖放流工作的指导意见”<sup>[15]</sup>中伶仃洋海域推荐的5个不同生态位的适宜放流物种[花鲈(*Lateolabrax japonicus*)、黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)、黄鳍鲷(*A. latus*)、长毛对虾(*Penaeus penicillatus*)、斑节对虾(*P. monodon*)],与适宜该海域的底栖贝类波纹巴非蛤(*Paphia undulata*)共同组成了6种该海域适宜放流种类,基本包含了该海域生态系统的主要营养层级。基于2016年珠江口渔业资源调查数据,构建该海域生态通道模型,描述其营养结构与生态系统性能,并对6种适宜增殖放流种类进行生态容纳量估算,以期为该海域的增殖放流实施提供科学指导与理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究海区与数据来源

本研究所用的数据资料主要来自2016年4个航次(3月、5月、8月和11月)珠江口水域的资源调查。本研究中生态系统环境容纳量评估水域的位于珠江口的广州市番禺区以南,地理坐标为 $113^{\circ}30'E\sim 114^{\circ}24'E$ 、 $22^{\circ}16'N\sim 23^{\circ}00'N$ ,水域面积约为 $400 \text{ km}^2$ (调查站位设置见图1)。采样方法按《海洋监测规范》(GB 17378—2007)和《海洋调查规范海洋生物调查》(GB 12763.6—2007)执行。浮游植物采用浅水Ⅲ型浮游生物网采样,浮游动物用浅水Ⅰ型浮游生物网采样,鱼卵仔稚鱼用大型浮游生物网(内径80 cm)水平拖网采集,底栖生物使用“大洋-50”型采泥器采集,游泳生物使用调查网具为尖尾罟。浮游植物、浮游动物、底栖生物和鱼卵仔稚鱼样本均用5%甲醛溶液固定,分类鉴定主要依据《海洋生物分类编码》(GB/T 17826—1999)进行。对渔业资源调查游泳生物渔获物进行生物学测定和胃含物分析。

### 1.2 Ecopath模型建立

1.2.1 功能组划分 Ecopath模型定义生态系统由一系列生态关联的功能组组成,要求功能组必须对生态系统能量流动途径全过程进行覆盖<sup>[16]</sup>,系统中的功能组应包括有机碎屑、浮游生物、底栖生物、

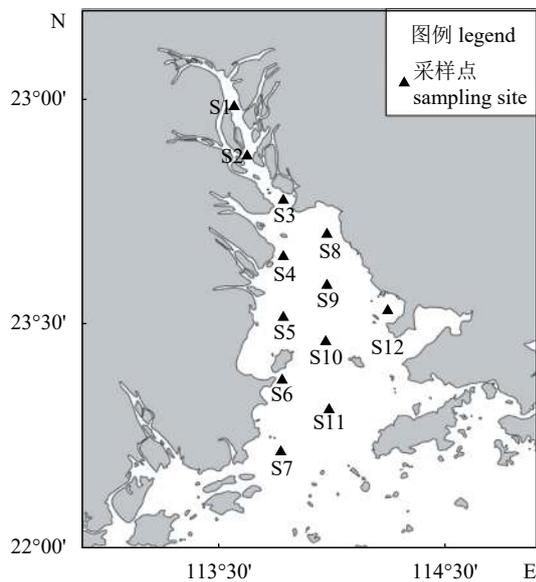


图1 珠江口调查站位图

Fig.1 Sampling sites in Pearl River estuary

一组规格和生态特性相同的鱼种等不同营养级种类<sup>[17]</sup>。本研究基于生态学或生物分类学地位、经济价值、生态功能、食性对应关系、栖息特点等,划分珠江口水域生态系统 Ecopath 模型功能组。把珠江口生态系统初步划分为 29 个功能组,包括 23 个系统功能组和珠江口适宜放流种类 6 个功能组(表 1)。3 种鱼类皆为广盐性鱼类,喜栖息于咸淡水交汇的河口水域,洄游性弱;2 种对虾皆曾是珠江口水域重要的经济虾类,其生长快、游泳能力弱,仅在小范围内移动扩散;波纹巴非蛤为底栖贝类,栖息于放流底播水域。

**1.2.2 参数的确定** 功能组生物量(B)海洋哺乳动物组参考段丽杰<sup>[4]</sup>、刘玉等<sup>[14]</sup>;渔业资源、浮游动物、底栖动物生物量数据通过现场调查获得,取周年均值;渔业资源生物量通过扫海面积法计算,浮游动物和底栖动物根据平均水深换算。浮游植物生物量通过叶绿素 *a* 转化碳质量,后以 1:10 转换为湿质量计算获得<sup>[18]</sup>。有机碎屑量难以估算,参考 Pitcher 等<sup>[19]</sup> 的香港水域与段丽杰<sup>[4]</sup> 的珠江口水域的 Ecopath 模型。当生态系统平衡时,鱼类功能组的生产量与生物量比值(P/B)等于瞬时总死亡(Z),根据渔业生态调查数据,利用 Pauly<sup>[20]</sup> 提出多种估算鱼类和其他水生生物 P/B 值的方法,估算鱼类功能组 P/B;消耗量与生物量比值(Q/B)采用 Palomares 和 Pauly<sup>[21]</sup> 提出的用游泳鱼类的尾部形状和面积大小来估算;生态营养转化效率(EE)的取值范围介于 0~1,指的是生产量对生态系统能量

贡献的比例,由于 EE 很难直接测量和得到,通常设为未知参数,通过 Ecopath 模型调整系统平衡获得。本研究每个功能组中包含许多种,很难用单种 P/B 和 Q/B 数据代表作为该功能组的参数,本文参考相近海域生态系统模型<sup>[19, 22]</sup>中类似的功能组,并结合渔业数据库网([www.fishbase.org](http://www.fishbase.org)),来确定本研究模型各功能组的 P/B 和 Q/B 参数。食物组成矩阵(DC)数据通过生物的胃含物分析并参考渔业数据库网站和已有食性的研究结果<sup>[23]</sup>综合确定。

**1.2.3 模型的输出与调试** 模型最初建立时,部分功能组  $EE > 1$ 。通过反复调整修正输入参数,最小化不合理因素,使模型达到平衡。本模型调试主要从食物组成着手,参考敏感度分析建立起的功能组相互关系认知,对各功能组食物组成做出调整<sup>[19]</sup>。

**1.2.4 增殖生态容纳量估算** 本研究参照吴忠鑫等<sup>[12]</sup>将生态容纳量定义为大量引入目标种后未明显改变生态系统的主要能量流动和食物网结构的目标种最大承载水平。通过逐步提高模型中目标种类的生物量(保持除该功能组外的其他功能组生物量不变),来代表实际生产中目标种类增殖规模的扩大(同时,相应的增加该目标种类的捕捞产量),逐一增加适宜放流种类花鲈、黑鲷、黄鳍鲷、长毛对虾、斑节对虾和波纹巴非蛤 6 个功能组的生物量:当大幅度地提高某一目标种的生物量时,必然导致系统内与其紧密相关(食性联系紧密)的其他种类的生物量变化,从而引发相应的系统能流变化;与此同时, Ecopath 模型将试图调整其他参数以使得系统重新获得平衡。由于生态营养转化效率(EE)取值 0~1,因此在反复迭代的过程中确定目标种的生态容纳量:定义为提高目标种的生物量直至发现系统中另一功能群的  $EE > 1$ ,此时系统允许的生物量即为生态容纳量<sup>[12]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 研究区域生态模型构建

对珠江口水域生态系统进行 Ecopath 模型构建,通过不断调试,得出该水域 6 种适宜放流种类的生态系统 Ecopath 模型。模型中 Pedigree 指数介于 0~1.0 可量化评价参数可靠度。Morissette 等<sup>[24]</sup>统计了全球 150 个 Ecopath 模型的 Pedigree 指数(可信度为 0.164~0.675),该模型为 0.521,可信度较高。模型功能组参数输入和模型调试结果见表 2,该生态系统特征参数见表 3。

表1 珠江口生态系统Ecopath模型的功能群及主要种类

Tab.1 Functional groups and main species in Pearl River estuary

序号 No.	功能组 functional group	种类 species
1	海洋哺乳动物	中华白海豚 <i>Sousa chinensis</i>
2	鲨鱼类	何氏鳐 <i>Raja hollandi</i> 、尖头斜齿鲨 <i>Scoliodon sorrakowah</i> 等
3	其他大型中上层鱼类	长颌宝刀鱼 <i>Chirocentrus nudus</i> 、四指马鲛 <i>Eleutheronema tetradactylus</i> 、鲮鱼 <i>Liza haematocheila</i> 、带鱼 <i>Trichiurus haumela</i> 、短带鱼 <i>Trichiurus brevis</i> 、二长棘鲷 <i>Paerargyrops edita</i> 等
4	花鲈	花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>
5	其他小型中上层鱼类	前鳞骨鲮 <i>Mugilophuyseni</i> 、白氏银汉鱼 <i>Allanetta bleekeri</i> 、六指马鲛 <i>Polynemus sextarius</i> 、丽叶鲮 <i>Syngnathus acus</i> Linnaeus 等
6	其他鲱形目鱼类	裘氏小沙丁鱼 <i>Sardinella jussieu</i> 、斑鲹 <i>Clupanodon punctatus</i> 、鳙 <i>Ilisha elongate</i> 、康氏小公鱼 <i>Stolephorus commersoni</i> 、赤鼻棱鲷 <i>Thrissa kammalensis</i> 、杜氏棱鲷 <i>Thrissa dussumieri</i> 、汉氏棱鲷 <i>Thrissa hamiltonii</i> 、七丝鲚 <i>Coilia grayii</i> 等
7	凤鲚	凤鲚 <i>Coilia mystus</i>
8	花鲹	花鲹 <i>Clupanodon thrissa</i>
9	其他大型底栖鱼类	长蛇鲻 <i>Saurida elongata</i> 、尖吻鲛 <i>Uroconger lepturus</i> 、海鲛 <i>Muraenesox cinereus</i> 、龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i> 、中华海鲶 <i>Arius sinensis</i> 、多鳞鳢 <i>Sillago sihama</i> 、黄斑篮子鱼 <i>Siganus oramin</i> 、斑点鸡笼鲷 <i>Drepane punctata</i> 、广东鲂 <i>Megalobrama hoffmanni</i> 、大鳞舌鲷 <i>Cynoglossus macrolepidotus</i> 、半滑舌鲷 <i>Cynoglossus semilaevis</i> 等
10	石首鱼科	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i> 、皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengeri</i> 、截尾白姑鱼 <i>Argyrosomus aneus</i> 、勒氏短须石首鱼 <i>Umbrina russelli</i> 等
11	黑鲷	黑鲷 <i>Acanthopagrus schlegelii</i>
12	黄鳍鲷	黄鳍鲷 <i>Acanthopagrus latus</i>
13	小型底层鱼类	眶棘双边鱼 <i>Ambassis gymnocephalus</i> 、白肌银鱼 <i>Leucosoma chinensis</i> 、鹿斑鲷 <i>Leiognathus ruconius</i> 、短吻鲷 <i>Leiognathus brevis</i> 等
14	鲉形目鱼类	斑纹东方鲀 <i>Fugu ocellatus</i> 、棕腹刺鲀 <i>Gastrophysus spadiceus</i> 、黑鳃兔头鲀 <i>Lagocephalus inermis</i> 等
15	鰕虎鱼类	矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i> 、钟馗鰕虎鱼 <i>Triaenopgon barbatus</i> 、红狼牙鰕虎鱼 <i>Odontamblyopus rubicundus</i> 、孔鰕虎鱼 <i>Trypauchen vagina</i> 等
16	头足类	短蛸 <i>Octopus ocellatus</i> 、中国枪乌贼 <i>Loligo chinensis</i> 、曼氏无针乌贼 <i>Sepiella japonica</i> 等
17	其他无脊椎动物	毛海参类等
18	蟹类	锯缘青蟹 <i>Scylla serrata</i> 、红星梭子蟹 <i>Portunus sanguinolentus</i> 、日本蜆 <i>Charybdis japonica</i> 、锈斑蜆 <i>Charybdis feriatius</i> 、字纹弓蟹 <i>Varuna litterata</i> 、直额绒螯蟹 <i>Eriocheir rectus</i> 、字纹弓蟹 <i>Varuna litterata</i> 等
19	其他虾类	近缘新对虾 <i>Metapenaeus affinis</i> 、周氏新对虾 <i>Metapenaeus joyneri</i> 、墨吉对虾 <i>Banana prawn</i> 、脊尾白虾 <i>Exopalaemon carinicauda</i> 、鲜明鼓虾 <i>Alpheus distinguendus</i> 、细螯沼虾 <i>Macrobrachium superbum</i> 、广东长臂虾 <i>Palaemon guangdongensis</i> 、亨氏仿对虾 <i>Parapenaeopsis hungerford</i> 等
20	长毛对虾	长毛对虾 <i>Penaeus penicillatus</i>
21	斑节对虾	斑节对虾 <i>Penaeus monodon</i>
22	虾蛄类	黑斑口虾蛄 <i>Oratosquilla kempii</i> 、猛虾蛄 <i>Harpisquilla harpax</i> 、口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i> 、眼斑猛虾蛄 <i>Harpisquilla annandalei</i> 等
23	其他大型底栖动物	体长>1 mm, 包括其他棘皮动物、甲壳类、软体动物包括光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i> 、河蚬 <i>Corbicula fluminea</i> 、中国圆田螺 <i>Cipangopaludina chinensis</i> 、菲律宾偏顶蛤 <i>Modiolus philippinarum</i> 、小荚蛭 <i>Siliqua minima</i> 等
24	波纹巴非蛤	波纹巴非蛤 <i>Paphia undulata</i>
25	棘皮动物	海胆类、海参类、海星类、蛇尾类等
26	小型底栖动物	体长<1 mm, 包括轮虫类、环节动物、多毛类、软体动物、甲壳类等
27	浮游动物	原生动物、水螅水母类、桡足类、枝角类、端足类、长尾类、短尾类、糠虾类、毛颚类、有尾类、其他浮游幼体等
28	浮游植物	硅藻、甲藻、蓝藻、绿藻类: 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> 、中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i> 、小球藻 <i>Chlorella</i> sp.、黄丝藻 <i>Tribonema</i> sp.等
29	有机碎屑	颗粒有机碳和溶解有机碳

表2 珠江口生态系统Ecopath模型功能组估算参数

Tab.2 Basic input and output parameters of groups estimated by Ecopath for Pearl River estuary ecosystem

序号 No.	功能组 functional group	营养级 trophic level	生物量/t·km <sup>-2</sup> B	生产量/生物量/a <sup>-1</sup> P/B	消耗量/生物量/a <sup>-1</sup> Q/B	转化效率 EE
1	海洋哺乳动物	<b>4.159</b>	0.009	0.045	14.77	<b>0.000</b>
2	鲨鳐类	<b>4.152</b>	0.012	0.820	9.500	<b>0.000</b>
3	其他大型中上层鱼类	<b>3.366</b>	0.721	0.940	5.110	<b>0.294</b>
4	花鲈	<b>3.722</b>	0.004	0.270	7.300	<b>0.721</b>
5	其他小型中上层鱼类	<b>3.277</b>	1.370	2.880	11.00	<b>0.391</b>
6	其他鲱形目鱼类	<b>3.112</b>	1.750	4.080	17.35	<b>0.243</b>
7	凤鲚	<b>2.696</b>	0.330	2.825	13.50	<b>0.837</b>
8	花鲮	<b>2.931</b>	0.120	3.650	12.10	<b>0.769</b>
9	其他大型底栖鱼类	<b>3.682</b>	0.012	2.432	27.44	<b>0.616</b>
10	石首鱼科鱼类	<b>3.226</b>	0.160	3.550	11.35	<b>0.608</b>
11	黑鲷	<b>3.680</b>	0.005	0.330	6.600	<b>0.600</b>
12	黄鳍鲷	<b>3.332</b>	0.008	0.450	8.100	<b>0.681</b>
13	小型底层鱼类	<b>3.251</b>	1.770	3.940	15.59	<b>0.896</b>
14	鲷形目鱼类	<b>3.401</b>	0.120	1.780	7.110	<b>0.086</b>
15	鰕虎鱼类	<b>3.098</b>	0.870	4.110	17.20	<b>0.805</b>
16	头足类	<b>3.647</b>	1.24	3.500	11.60	<b>0.674</b>
17	其他无脊椎动物	<b>2.469</b>	1.270	9.600	41.54	<b>0.903</b>
18	蟹类	<b>2.651</b>	0.810	5.650	26.90	<b>0.918</b>
19	其他虾类	<b>2.669</b>	1.089	6.800	41.54	<b>0.820</b>
20	长毛对虾	<b>2.669</b>	0.030	6.500	30.00	<b>0.647</b>
21	斑节对虾	<b>2.669</b>	0.005	6.500	30.00	<b>0.452</b>
22	虾蛄类	<b>3.074</b>	1.700	5.300	18.90	<b>0.591</b>
23	其他大型底栖动物	<b>2.450</b>	5.600	5.100	18.50	<b>0.915</b>
24	波纹巴非蛤	<b>2.200</b>	1.950	3.000	18.500	<b>0.970</b>
25	棘皮动物	<b>2.184</b>	1.570	10.260	41.54	<b>0.561</b>
26	小型底栖动物	<b>2.250</b>	13.76	6.570	36.90	<b>0.789</b>
27	浮游动物	<b>2.000</b>	13.50	36.000	186.0	<b>0.437</b>
28	浮游植物	<b>1.000</b>	15.00	230.000	—	<b>0.672</b>
29	有机碎屑	<b>1.000</b>	200.0	—	—	<b>0.374</b>

注: 黑体部分为模型估算值

Note: The estimated parameters by model are in bold.

珠江口水域生态系统的营养级为1~4.2级, 最高营养级功能组对应为哺乳动物, 处于生态系统中食物链的最顶端, 如中华白海豚 (*Sousa chinensis*) 等, 其次为鲨鳐类。以鱼类为主的脊椎动物因食性差别其营养级介于2.7~3.7, 头足类多为肉食性,

以甲壳动物及小鱼为食<sup>[25]</sup>, 营养级为3.6。6种适宜放流种类营养级介于2.2~3.7。该模型生态系统总流量9 092.447 t·(km<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>, 系统净初级生产力1 345.636 t·(km<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>, 联结指数0.370, 系统杂食指数0.287。

表3 珠江口水域生态系统的总体特征参数

Tab.3 Summary statistics of net flow in Pearl River estuary ecosystem by Ecopath

特征参数 attribute parameter	数值 value	数值1 Value 1	数值2 Value 2	数值3 Value 3	数值4 Value 4	数值5 Value 5	数值6 Value 6
总消耗量/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ total consumption	3 491.934	3 492.591	3 495.201	3 497.134	3 538.434	3 540.084	4 859.454
总输出量/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ total export	1 345.636	1 345.135	1 343.186	1 341.765	1 318.511	1 317.548	473.380
总呼吸量/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ total respiratory flow	2 104.364	2 104.865	2 106.814	2 108.235	2 131.489	2 132.452	2 976.620
流向碎屑总量/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ total flows into detritus	2 150.513	2 150.012	2 148.063	2 146.746	2 128.968	2 128.204	1 415.009
系统总流量/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ total system throughput	9 092.447	9 092.603	9 093.264	9 093.880	9 117.402	9 118.288	9 724.463
总生产量/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ total production	4 139.183	4 139.208	4 139.347	4 139.472	4 149.258	4 149.616	4 360.943
总初级生产力/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ calculated total net primary production	3 450.000	3 450.000	3 450.000	3 450.000	3 450.000	3 450.000	3 450.000
总初级生产力/总呼吸量 total primary production/total respiration	1.639	1.639	1.638	1.636	1.619	1.618	1.159
净系统生产量/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ net system production	1 345.636	1 345.135	1 343.186	1 341.765	1 318.511	1 317.548	473.380
总初级生产力/总生物量 total primary production/total biomass	53.253	53.179	52.849	52.731	52.009	51.966	24.873
总生物量/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ total biomass (excluding detritus)	64.785	64.875	65.280	65.427	66.335	66.390	138.705
联结指数 connectance index	0.370	0.370	0.370	0.370	0.370	0.370	0.370
系统杂食指数 system omnivory index	0.287	0.284	0.284	0.285	0.288	0.289	0.283

注：“数值”代表当前的系统状态；“数值1”至“数值6”依次表示花鲈、黑鲷、黄鳍鲷、长毛对虾、斑节对虾和波纹巴非蛤达到最大生态容纳量后的系统特征参数

Note: The "value" represents the present status of the system; Value 1-Value 6 represent the status after a large amount of *L. japonicus*, *A. schlegelii*, *A. latus*, *P. penicillatus*, *P. monodon* and *P. undulata* biomass.

## 2.2 食物网结构

图2为珠江口生态系统食物网结构图，该图显示了整个水域中所有功能组的营养流动关系和系统中生物功能组之间的食物竞争和相互捕食。从图2中可看到2类食物链构成的食物网：一类是以有机碎屑为起点的碎屑食物链，有机碎屑→浮游动物、底栖动物、波纹巴非蛤→甲壳类与其他无脊椎动物→各种硬骨鱼类→海洋哺乳动物和鲨鳐类；另一类是以浮游植物为起点的牧食食物链，浮游植物→浮游动物→甲壳类与其他无脊椎动物→各种硬骨鱼类→海洋哺乳动物和鲨鳐类。系统能量均由有机碎屑和浮游植物提供。

## 2.3 功能群组间的混合营养效应

珠江口水域生态系统中不同功能组之间混合营养影响关系 (mixed trophic impact, MTI) 见图3，反

映一个功能组生物量对另一个功能组生物的影响大小和影响方向，正值(白色)表示其相互影响关系为正相关，表明该功能组生物量的增加对相应功能组的生物量增加具有促进作用；负值(黑色)表示其相互关系为负相关，具有抑制作用(同类残食为负影响)。

鱼类为主的各功能组生物量的增加对海洋哺乳动物产生正影响；浮游动物和浮游植物的增加有利于上述种类生物量的增加，即间接地促进了海洋哺乳动物的增加。肉食鱼类(如花鲈)之间、肉食鱼类与海洋哺乳动物之间有着竞争同类食物的关系，其互为负影响。食物重叠度较大的物种之间也存在相互的负影响(如黑鲷和黄鳍鲷)。

## 2.4 6种适宜放流种类的生态容纳量

对花鲈、黑鲷、黄鳍鲷、长毛对虾、墨吉对虾和

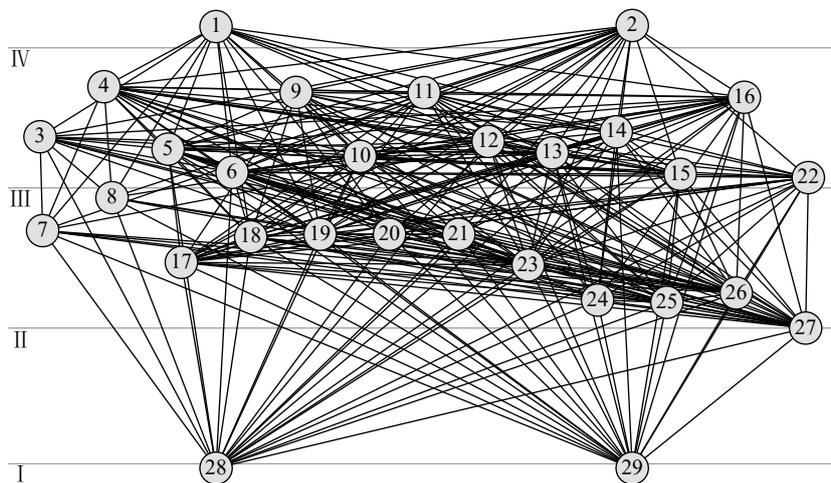


图2 珠江口生态系统食物网

I~IV 表示营养级等级; 数字 1~29 表示功能组序号, 序号所具体代表的功能组见表 1; 后图同此

Fig.2 Food web of Pearl River estuary ecosystem

I-IV. trophic grades; 1-29. functional groups serial numbers, and the functional group specifically represented by the serial number is shown in Tab.1. The same case in the following figure.

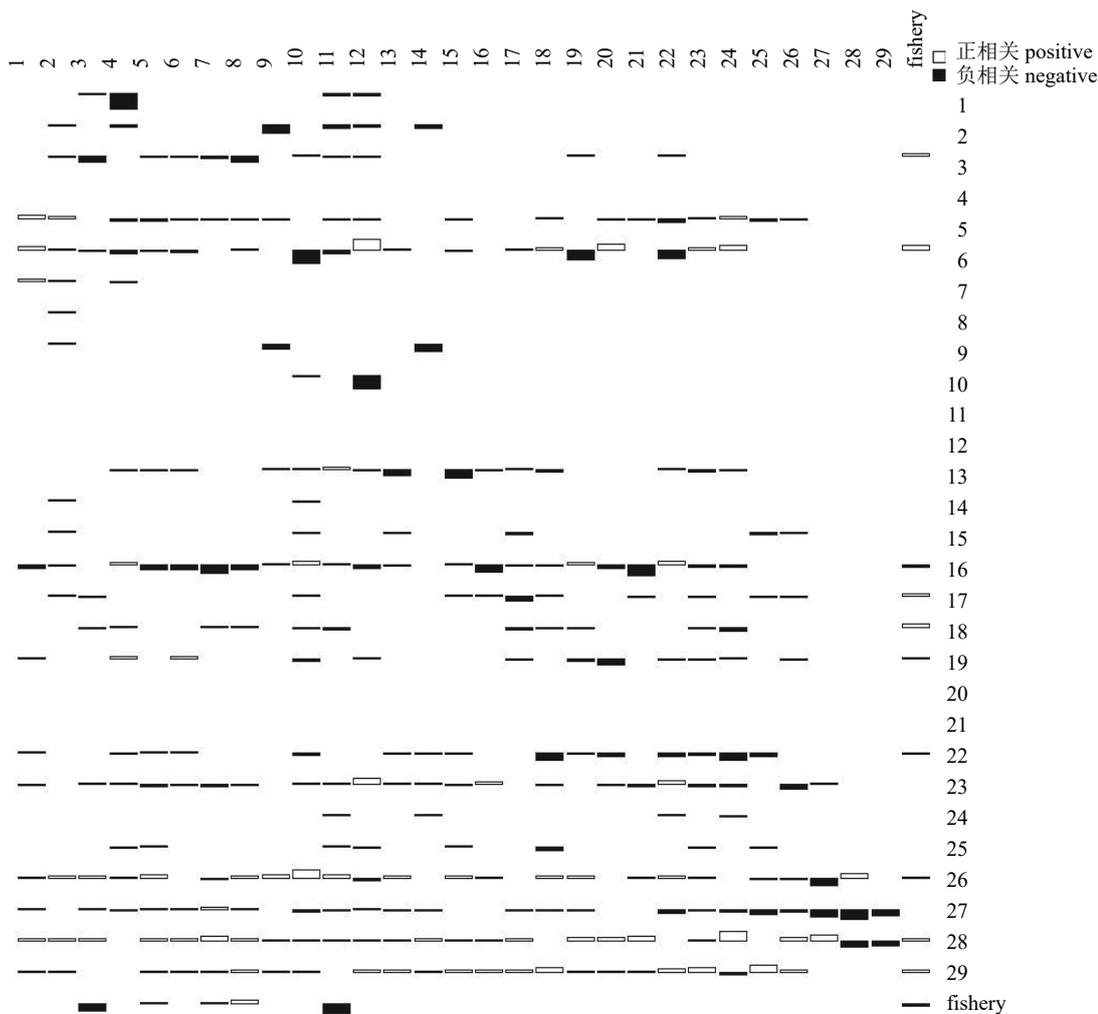


图3 珠江口生态系统功能组的混合营养效应

Fig.3 Mixed trophic impact of functional groups in Pearl River Estuary ecosystem

波纹巴非蛤这6种适合珠江口水域生态系统增殖放流种类进行环境容纳量推算。

以黑鲷为例,当逐步提高生态系统内黑鲷的生物量,会增加对小型底层鱼类、鰕虎鱼类、其他无脊椎动物、其他虾类、其他大型底栖动物、小型底栖动物等功能组群的捕食压力。如果黑鲷摄食对象的 $EE>1$ ,必须降低黑鲷的生物量使模型重新达到平衡。在迭代过程中,黑鲷的生物量不断增加,大于 $0.50\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 后模型不再平衡,此时肉食性鱼类功能组的 $EE>1$ 。由此推算珠江口水域生态系统支撑的黑鲷平均生物量为 $0.5\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ (以 $0.01\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 为步长递增, $EE>1$ 后以 $0.001\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 为步长递减),

即为该生态系统黑鲷的生态容纳量。当黑鲷生物量从目前的 $0.005\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 增加到 $0.5\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,对比生态系统的总体统计学参数可以发现,TPP不变,系统总能流增加了0.23%,其他表征系统总体特征的大部分参数基本一致或变化不大,由此确定珠江口水域生态系统中黑鲷的生态容纳量为 $0.5\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

在本研究建立的生态容纳量模型中,逐一对6种生物的生物量进行反复迭代,最终确定花鲈、黑鲷、黄鳍鲷、长毛对虾、斑节对虾和波纹巴非蛤的最大生态容纳量分别为 $0.094\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 、 $0.500\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 、 $0.650\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 、 $1.580\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 、 $1.610\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 和 $75.870\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ (表4)。

表4 6种适宜放流种类在珠江口生态系统中的最大生态容纳量

Tab.4 Maximum ecological carrying capacity of six species in Pearl River estuary ecosystem

序号 No.	适宜放流种类 suitable release species	当前生物量/ $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ current biomass	最大容纳量/ $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ maximum capacity	转换效率/% conversion efficiency
1	花鲈	0.004	0.094	12.28
2	黑鲷	0.005	0.500	12.46
3	黄鳍鲷	0.008	0.650	12.40
4	长毛对虾	0.030	1.580	12.33
5	斑节对虾	0.005	1.610	12.34
6	波纹巴非蛤	1.950	75.870	11.06

注:当前系统转换效率为12.23%

Note: The current system conversion efficiency is 12.23%.

### 3 讨论

增殖放流作为渔业资源养护的重要和有效方式,基于生态容量评估技术可确保增殖放流活动的可持续开展<sup>[5,26]</sup>。该模型可量化放流海区能量流动、系统稳定性参数,研究放流种类与捕食者、被捕食者、竞争者等其他种类间的相互作用关系,研究增殖放流对生态系统的影响程度,为渔业资源增殖放流提供理论指导<sup>[11-13]</sup>。

总初级生产量(TPP)与总呼吸量(TR)的比值,是反映生态系统成熟度的关键指标<sup>[27]</sup>,当 $TPP/TR$ 大于1时,生态系统处于发育状态;小于1时,系统被有机污染;趋近于1时,系统趋于成熟。本研究中珠江江口生态系统 $TPP/TR$ 为1.639,较与之临近的大亚湾<sup>[28]</sup>的2.185、北部湾<sup>[10]</sup>的2.596略低,但仍高于七股泻湖<sup>[29]</sup>的1.10、国圣湾<sup>[30]</sup>的1.06,说明当前该系统处于发育阶段,有较多能量未被利用。系统联结指数(CI)与系统杂食指数

(SOI)反应系统内部食物网联系紧密程度,指标值越大,指示系统内部联结越复杂,系统稳定性越强。本研究区域的CI和SOI分别为0.370和0.287,这与段丽杰<sup>[4]</sup>的珠江口指数相近,是生态系统复杂性较低、营养关系较简单的体现。综合来看,珠江口生态系统与中国其他沿岸生态系统相似,目前都处于成熟度较低、稳定性较差、易受外界胁迫扰动的状态<sup>[24,31-32]</sup>。造成这一现象的主要原因与过度捕捞造成的大型捕食者缺乏,以及系统中生命周期短、繁殖能力强、世代更替快的r型生物占优密切相关<sup>[32]</sup>。

增殖放流活动作为修复珠江口水域生态系统的必要措施和有效手段之一<sup>[5]</sup>。无序放流增殖可能导致近海生态系统能量流动发生改变。本研究选取了6种适宜于珠江口水域的增殖放流种类,其或为广东沿海资源衰退种:花鲈、长毛对虾和斑节对虾<sup>[33]</sup>,或为珠江口主要放流对象:黑鲷、黄鳍鲷、波纹巴非蛤<sup>[34-35]</sup>,且多为无序放流,未见有关其适

宜放流数量的研究报道, 探讨其放流群体的增殖生态容纳量, 可为渔业资源增殖放流的可持续发展提供指导。凶猛肉食性鱼类花鲈、肉食偏杂食鱼类黑鲷与黄鳍鲷、2 种经济价值较高的对虾及 1 种底栖贝类, 自上到下基本包含了生态系统的主要营养层级, 能有效地在多个营养层次对多余能量进行利用。放流群体不仅受其食物限制, 种间竞争与捕食压力同样是其限制因素<sup>[31]</sup>。6 种适宜增殖放流种类中, 花鲈作为该生态系统中较为顶级的捕食者(营养级 3.72), 主要以鱼、虾及大型节肢动物等为食<sup>[36]</sup>, 黑鲷和黄鳍鲷营养级稍低但仍处于较高水平, 长毛对虾和墨吉对虾则处于较低水平, 波纹巴非蛤最低。

本研究结果表明, 花鲈生物量的增加对小型底层鱼类与其他无脊椎动物有较大负相关影响, 其增殖容量主要受食物来源限制。黑鲷和黄鳍鲷的增殖容量除受食物来源限制外, 还与生态位较为接近的石首科鱼类和小型底层鱼类负相关关系较大, 受种间竞争制约。2 种对虾生物量增加不会面临食物来源压力, 主要受种间竞争制约。波纹巴非蛤处于食物网的底层, 理论上具有巨大的增殖空间, 其增殖容量限制主要来自饵料生物。该模型有其局限性, 仅能反映当前模型条件下的生态容纳量, 为理论上限。在类似的研究报道中, 常将最大增殖容量值的 50% 作为推荐<sup>[11-13, 26]</sup>。

#### 4 结论

开展增殖放流前的生态容纳量研究, 是“负责任渔业行为”的体现与实践。本研究设计了 6 种适宜珠江口水域的增殖放流种类, 并得到这 6 种生物的最大环境容纳量(表 4)。其局限在于较多的种类选择, 未能在组合条件下对放流种类进行比例搭配; 同时, 生态容纳量本身亦是一个动态变化过程, 实际运用中, 还需考虑静态模型无法描述的动态变化; 另外, 提供可靠的食物矩阵数据, 是提高模型质量的关键。

#### 参考文献:

- [1] 袁梦, 汤勇, 徐姗姗, 等. 珠江口南沙海域秋季渔业资源群落结构特征 [J]. 南方水产科学, 2017, 13(2): 18-25.
- [2] 晏磊, 谭永光, 杨吝, 等. 珠江口水域秋季刺网的渔获组成及多样性分析 [J]. 南方水产科学, 2016, 12(1): 111-119.
- [3] 肖瑜璋, 王蓉, 张保学. 珠江口水域海洋渔业资源现状分析与建议 [J]. 黑龙江科技信息, 2010(28): 233.
- [4] 段丽杰. 基于 EwE 的珠江口渔业和近海生态系统模拟研究 [D]. 广州: 中山大学, 2009: 9-15.
- [5] 程家骅, 姜亚洲. 海洋生物资源增殖放流回顾与展望 [J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 610-617.
- [6] HEYMANS J J, COLL M, LINK J S, et al. Best practice in Ecopath with Ecosim food-web models for ecosystem-based management[J]. Ecol Model, 2016, 331: 173-184.
- [7] De MUTSERT K, STEENBEEK J, LEWIS K, et al. Exploring effects of hypoxia on fish and fisheries in the northern Gulf of Mexico using a dynamic spatially explicit ecosystem model[J]. Ecol Model, 2016, 331: 142-150.
- [8] 米玮洁, 胡菊香, 赵先富. 生态通道模型及其在水生态系统中的应用探讨 [J]. 环境科学与技术, 2012, 35(7): 186-190, 196.
- [9] 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.
- [10] 陈作志, 邱永松, 贾晓平, 等. 捕捞对北部湾海洋生态系统的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1604-1610.
- [11] 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鲟、脉红螺捕捞策略和刺参增殖生态容量 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(11): 168-177.
- [12] 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 [J]. 中国水产科学, 2013, 20(2): 327-337.
- [13] 王腾, 张贺, 张虎, 等. 基于营养通道模型的海州湾中国明对虾生态容纳量 [J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 965-975.
- [14] 刘玉, 隋丽杰, 段丽杰, 等. 珠江口 EwE 模型功能组划分研究 [J]. 海洋环境科学, 2008, 27(5): 480-483.
- [15] 农业部. 农业部关于做好“十三五”水生生物增殖放流工作的指导意见 [EB/OL]. [2016-05-25]. <http://www.ynagri.gov.cn/dl/news730/20160525/6269010.shtml>.
- [16] CHRISTENSEN V, WALTERS C J. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations[J]. Ecol Model, 2004, 172(2/3/4): 109-139.
- [17] CHRISTENSEN V, WALTERS C J, PAULY D. Ecopath with ecosim: a user's guide[M]. Vancouver: University of British Columbia, 2005: 154.
- [18] 王增焕, 李纯厚, 贾晓平. 应用初级生产力估算南海北部的渔业资源量 [J]. 海洋水产研究, 2005, 26(3): 9-15.
- [19] PITCHER T J, BUCHARY E, ASUMAILA U R. Spatial simulations of Hong Kong's marine ecosystem: ecological and economic forecasting of marineprotected areas with human-made reefs[J]. Fish Centre Res Rep, 2000, 10(3): 154-158.
- [20] PAULY D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks[J]. ICES J Mar Sci, 1980, 39(2): 175-192.
- [21] PALOMARES M D, PAULY D. Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity[J]. Mar Freshw Res, 1998, 49(5): 447-453.

- [22] WANG Y, DUAN L, LI S, et al. Modeling the effect of the seasonal fishing moratorium on the Pearl River estuary using ecosystem simulation[J]. *Ecol Model*, 2015, 312: 406-416.
- [23] 顾洪静. 福建九龙江口水域鱼类群落及其资源的研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2014: 47-62.
- [24] MORISSETE L, HAMMILL M O, SAVENKOFF C. The trophic role of marine mammals in the northern Gulf of St. Lawrence[J]. *Mar Mammal Sci*, 2006, 22(1): 74-103.
- [25] 黄美珍. 台湾海峡及邻近海域主要无脊椎动物食性特征及其食物关系研究 [J]. *海洋科学*, 2005, 29(1): 73-80.
- [26] 林群, 李显森, 李忠义, 等. 基于 Ecospath 模型的莱州湾中国对虾增殖生态容量 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1131-1140.
- [27] ODUM E P. The strategy of ecosystem development[J]. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [28] 莫宝霖, 秦传新, 陈丕茂, 等. 基于 Ecospath 模型的大亚湾海域生态系统结构与功能初步分析 [J]. *南方水产科学*, 2017, 13(3): 9-19.
- [29] LIN H J, SHAO K T, KUO S R, et al. A trophic model of a sandy barrier lagoon at Chiku in southwestern Taiwan[J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 1999, 48(5): 575-588.
- [30] LIN H J, SHAO K T, HWANG J S, et al. A trophic model for Kuosheng Bay in northern Taiwan[J]. *J Mar Sci Technol*, 2004, 12(5): 424-432.
- [31] 杨林林, 姜亚洲, 袁兴伟, 等. 象山港生态系统结构与功能的 Ecospath 模型评价 [J]. *海洋渔业*, 2015, 37(5): 399-408.
- [32] 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 [J]. *生态学报*, 2010, 30(18): 4855-4865.
- [33] 陈丕茂. 广东人工鱼礁区增殖放流种类初探 [J]. *南方水产*, 2005, 1(1): 11-20.
- [34] 郭晓奇. 广东海洋生物增殖放流存在的问题与对策 [J]. *海洋与渔业*, 2014(7): 40-41.
- [35] 佚名. 农业部和广东省联合举办南海生物资源增殖放流 [J]. *北京农业*, 2009(21): 34.
- [36] 洪巧巧, 庄平, 杨刚, 等. 长江口中国花鲈食性分析 [J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4181-4190.