

DOI: 10.11964/jfc.20220613539

基于 Ecopath 模型的瓯江口斑鲆、刀鲚和鲟的增殖生态容量评估



章欣仪^{1,2,3}, 郑春芳², 秦松^{1,3}, 刘伟成^{1,3*}, 张川^{1,2,3}, 范青松^{1,3}
1. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江温州 325035; 2. 温州大学生命与环境科学学院, 浙江温州 325005; 3. 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 浙江温州 325005

第一作者: 章欣仪, 从事渔业资源研究, E-mail: 995806354@qq.com



摘要:

【目的】 基于 Ecopath 模型对瓯江口斑鲆、刀鲚和鲟增殖生态容量进行评估。

【方法】 根据 2021 年 3 月、5 月、8 月和 11 月瓯江口渔业资源与生态环境本底调查数据, 通过构建由 24 个功能组组成的瓯江口 Ecopath 模型, 对瓯江口营养级结构和能量流动进行初步分析, 并估算了斑鲆、刀鲚和鲟的增殖生态容量。

【结果】 瓯江口海域营养级范围为 1.00~3.55, 其中斑鲆的营养级为 2.46, 刀鲚的营养级为 2.97, 鲟的营养级为 2.44, 均属于较低营养级。系统总初级生产力/总呼吸量 (TPP/TR) 为 2.276, 系统连接指数 (CI) 为 0.367, 系统杂食性指数 (SOI) 为 0.217。斑鲆、刀鲚和鲟的现存生物量分别为 0.0189、0.0379 和 0.0055 t/km², 根据模型估算的生态容量分别为 0.070、0.065 和 0.132 t/km²。

【结论】 该生态系统中有大部分营养物质未被利用, 初级生产力利用效率低, 系统成熟度不高; 对比当前状态与模拟放流后系统状态, 系统的 TPP/TR、CI 和 SOI 均无较大变化, 即斑鲆、刀鲚和鲟具有较大增殖放流潜力。

关键词: 生态容量; 生态系统结构; 食物网; Ecopath 模型; 瓯江口

通信作者: 刘伟成, 正高级工程师, 从事渔业资源与生态学研究。美国缅因大学访问学者, 研究生导师, 主持完成各级科研项目 20 余项, 出版专著 3 部, 发表论文 30 余篇, 获得专利 10 余项, 省部级奖励 2 项, 《水生生物学学报》《Fishes》等审稿人, 农业农村部涉保护区工程影响评价专家、浙江省生态监管专家等。E-mail: lwch80@126.com



资助项目: 国家重点研发计划(2020YFD0900805)

收稿日期: 2023-01-07

修回日期: 2023-03-08

文章编号:

1000-0615(2025)02-029307-12

中图分类号: S 931.5

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)

瓯江口位于东海南部近海, 海域水面开阔, 水质肥沃, 分布有上百个岛屿与众多海湾, 是浙江省第二大水系。因其有利的地形条件和丰富的饵料生物, 瓯江口不仅具有十分丰富的渔业资源, 也是众多鱼类产卵、育幼和索饵的场所, 是温台渔场的重要组成部分^[1]。近年来, 随着沿岸开发带来的环境污染以及长期较高强度的捕捞压力, 使得该海域水体富营养化现象严重, 渔业资源种类与产量大幅下降, 严重威胁瓯江口渔业的可持续发展^[2]。增殖放流是改善水域生态环境和恢复渔业资源的重要途径^[3]。开展增殖放流要充分考虑放流水域中生态系统承载力, 对放流水域进行生态容量评估是科学增殖放流的重要前提。

目前, 已有众多学者报道生态容量评估的方法: 食物限制性指标



法^[4]、Parsons 营养动态模型^[5]、Tait 沿岸海域能流分析模型^[6]、饵料收支平衡模型^[7]、Ecopath 模型等。其中 Ecopath 模型能够从种群营养限制和生态系统营养平衡出发, 不仅考虑评估物种在生态系统中的捕食和竞争关系, 同时也考虑系统的能量流动, 是目前应用最为广泛的生态容量研究方法。

Ecopath 由国际水生资源管理中心 (ICLARM) 开发^[8], 是根据营养动力学原理和能量守恒方程, 对生态系统结构功能和能量流动展开研究的静态模型^[9]。近年来, 该模型已被广泛应用于渔业资源生态容量和增殖放流评估中, 在莱州湾的中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*)^[10]、三沙湾的大黄鱼 (*Larimichthys crocea*)^[11]、大亚湾的黑鲷 (*Sparus macrocephalus*)^[12]、舟山渔场的三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*)^[13] 等增殖放流领域取得了一定成效。本研究以 2021 年甌江口渔业资源和生态环境调查数据为依据, 针对甌江口鱼类资源衰退和富营养化现状, 选取《浙江省水生生物增殖放流实施方案 (2021—2015 年)》中资源修复型刀鲚 (*Coilia nasus*)、净水型斑鲦 (*Konosirus punctatus*) 和鲮 (*Liza haematocheila*), 采用 Ecopath 模型对放流物种的生态容量进行估算, 以期为甌江口的增殖放流工作提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 调查站位和数据来源

采用底拖网进行渔业资源调查, 调查时间为 2021 年 3 月、5 月、8 月和 11 月, 共设调查站位 28 个 (图 1)。调查内容包括对游泳动物、浮游动物、浮游植物、底栖生物以及其他环境要素进行采样, 采样及调查方法依照《海洋监测规范》GB 17378—1998 和《海洋调查规范》GB—12763.91 进行。实验过程中操作人员严格遵守实验动物管理和使用伦理规范。

1.2 模型原理

Ecopath 模型由生态系统中多个生态相互关联的功能组构成, 包括浮游植物、浮游动物、鱼类和底栖生物等, 基本能够反映生态系统的营养级结构和能量流动过程^[14]。根据能量守恒定律, 生态系统中每一个功能组的能量输入与输出保持平衡, 即生产量—捕捞死亡量—其他死亡量=产出量, 模型以一组线性方程来定义生态系统, 每个方程则代表一个功能组:

$$B_i \times (P/B)_i \times EE_i - \sum_{j=1}^n B_j \times (Q/B)_j \times DC_{ij} = EX_i$$

式中, B_i 代表功能组 i 的生物量; $(P/B)_i$ 则为功

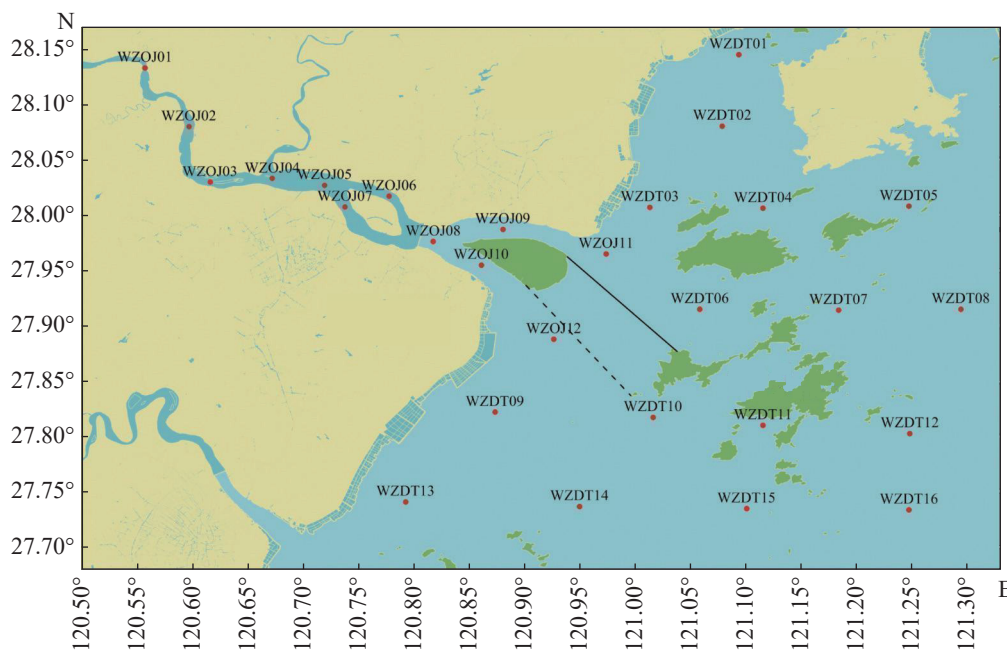


图 1 调查海区及站位设置

Fig. 1 Study area and the location of the stations

能组 i 的生产量和生物量的比值; $(Q/B)_j$ 为消耗量和生物量的比值; EE_i 为功能组 i 的营养转换效率; DC_{ij} 为被捕食组 i 与捕食组 j 的比例; EX_i 为功能组 i 的产出量; n 为功能组数量^[15]。其中, B_i 、 $(P/B)_i$ 、 $(Q/B)_j$ 和 EE_i 这 4 个参数中至少有 3 个为已知, 则可通过模型计算出未知参数。

1.3 功能组划分

功能组由单个物种或多个物种组成, 根据其在生态学或分类学上的特征及优势种或特有种为一功能群的原则划分功能组^[16], 共将瓯江口生态系统生物划分为 24 个功能组(表 1), 基本涵盖瓯江口生态系统营养级结构和能量流动过程, 其中, 刀鲚、斑鲦和鲛为增殖放流对象, 日本花鲈和棘头梅童鱼所处营养级较高且在游泳动物中所占生物量大, 龙头鱼和三疣梭子蟹为调查中确定的优势种, 因此设为独立的功能组, 其余物种根据相应特征划分功能组。

1.4 功能组参数来源

本研究 Ecopath 模型中, 系统中能量流动形式以湿重 (t/km^2) 表示, 时间限制为 1 年。其中渔业资源生物量 (B , t/km^2) 通过扫海面积法计算: $B=G/[S(1-E)]$, G 为每小时重量 (t/h), S 为每小时网口的扫海面积 km^2/h , E 为逃逸率。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得出^[17]; 浮游动物使用浅水 I 型浮游生物网采集, 并在实验室计算生物量; 底栖生物通过挖斗采泥器采集, 并通过 0.5 mm 的套筛冲洗过滤后带到实验室计算生物量。有机碎屑量根据 Pauly 等^[18] 提出的经验公式计算, 同时参考与瓯江口海域生态系统相似的 Ecopath 模型; 鱼类功能组的 P/B 值与 Q/B 值参考相近水域内对应功能组的数据, 主要参考了大亚湾^[12]、象山港^[15]、三门湾^[19]、獐子岛海域^[20]、海州湾^[21] 模型, 同时根据瓯江口实际情况进行相应的调整; 食物组成矩阵 (DC) 数据通过采集样本的胃含物分析, 参考已有食性的研究成果并结合国际水生资源管理中心网站 (Fish Base:<https://www.fishbase.de/>) 综合确定。

1.5 Ecopath 模型的调试及敏感性分析

将基本参数输入 Ecopath 模型后, 为确保每一个功能组的输入和输出保持平衡, 需要对参数进行反复调整修正^[22], 以期达到生态学和

热力学平衡状态^[23], 最后使模型中以下指标处于合理范围: 营养转化效率 (EE) <1 , $0.1<$ 食物总转化效率 (GE) <0.3 , $GE<$ 净效率 (NE), 呼吸量/同化量 (RA/AS) <1 ; 鱼类: $1<$ 呼吸量/生物量 (RA/B) <10 ; 转化率较高群体: $50<$ 呼吸量/生物量 (RA/B) <100 , 生产量/呼吸量 (P/RA) <1 。

通过敏感性分析检测模型输入参数的不确定性对输出参数的影响, 输出参数对于输入参数的敏感性取决于功能组之间的关联程度^[23]。具体通过模型中各参数以 10% 的步长变化, 测试输入参数从 -50%~50% 的幅度变化对输出参数的影响。

1.6 生态容量估算

本研究将生态容纳量定义为在一定时间和特定区域范围内, 一个生态系统所能承载某一物种的最大水平^[24]。Ecopath 模型达到平衡后, 保持其他功能组参数不变, 以 10% 的步长比例逐步增加模型中放流物种功能组的生物量, 当系统中任一功能组的 EE 接近或等于 1 时, 系统趋于不平衡, 此时放流物种功能组的生物量即为生态容纳量, 而增加的生物量则为增殖放流的生物量^[15]。

2 结果

2.1 Ecopath 模型的数据敏感性

模型的敏感性分析表明, 输出参数 EE 对来自同一功能组的输入参数生物量 (B) 的变化最为敏感。对瓯江口 Ecopath 模型的 EE 进行敏感性分析(图 2), 当输入参数的变化范围为 $\pm 50\%$ 时, 输出参数 EE 的变化范围为 -37.68%~104.35%, 不同功能组输出参数的变化对输入参数的敏感程度不同, 但均呈指数变化关系。当输入参数 B 值减少时, 浮游植物功能组的 EE 值对其最为敏感, 当输入参数 B 值增加时, 鲛功能组的 EE 值对其敏感性最低, 其余功能组的 EE 值变化介于二者之间。从整体角度分析, 当功能组输入参数 B 值变化率为 -50% 时, 模型输出参数的平均变化率达到最高, 为 101.10%; 当功能组输入参数 B 值变化率为 50% 时, 模型输出参数的平均变化率达到最低, 为 34.32%。

2.2 瓯江口 Ecopath 模型构建

利用 EwE 6.5 软件构建瓯江口生态系统 Ecopath 模型, 表 2 为模型基本输入和输出情况,

表 1 瓯江口生态系统功能组及主要种类

Tab. 1 Functional groups and main species in Oujiang estuary

序号 no.	功能组 functional group	种类 species
1	浮游植物 phytoplankton	琼氏圆筛藻、蛇目圆筛藻、中华齿状藻、中心圆筛藻等 <i>Coscinodiscus jonesianus</i> , <i>C. argus</i> , <i>Odentella sinensis</i> , <i>C. centralis</i> , etc.
2	浮游动物 zooplankton	中华哲水蚤、真刺唇角水蚤、虫肢歪水蚤、三叶针尾涟虫等 <i>Calanus sinicus</i> , <i>Labidocera euchaeta</i> , <i>Tortanus vermiculus</i> , <i>Diaetylis tricincta</i> , etc.
3	斑鲦 <i>K. punctatus</i>	斑鲦 <i>K. punctatus</i>
4	刀鲚 <i>C. nasus</i>	刀鲚 <i>C. nasus</i>
5	鲛 <i>L. haematocheila</i>	鲛 <i>L. haematocheila</i>
6	鲨鲛类 shark stingray species	宽尾斜齿鲨、赤鲛 <i>Scoliodon laticaudus</i> , <i>Dasyatis akajei</i>
7	日本花鲈 <i>Lateolabrax japonicus</i>	日本花鲈 <i>L. maculatus</i>
8	龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i>	龙头鱼 <i>H. nehereus</i>
9	对虾科 Penaeidae	中国明对虾、周氏新对虾、哈氏仿对虾、细巧仿对虾等 <i>F. chinensis</i> , <i>Metapenaeus joyneri</i> , <i>Parapenaeopsis hardwickii</i> , <i>P. tenella</i> , etc.
10	其他虾类 other shrimp species	脊尾白虾、中华管鞭虾、葛氏长臂虾、安氏白虾、日本鼓虾、鲜明鼓虾等 <i>Exopalaemon carinicauda</i> , <i>Solenocera crassicornis</i> , <i>Palaemon gravieri</i> , <i>P. annandalei</i> , <i>Alpheus japonicus</i> , <i>A. distinguendus</i> , etc.
11	口足目 Stomatopoda	口虾蛄、窝纹网虾蛄、断脊口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i> , <i>Dictyosquilla foveolata</i> , <i>O. interrupta</i>
12	三疣梭子蟹 <i>P. trituberculatus</i>	三疣梭子蟹 <i>P. trituberculatus</i>
13	其他蟹类 other crabs	日本蟳、锈斑蟳、狭颈绒螯蟹、字纹弓蟹、隆线强蟹等 <i>Charybdis japonica</i> , <i>C. feriatius</i> , <i>Eriocheir leptognathus</i> , <i>Varuna litterata</i> , <i>Eucrete crenata</i> , etc.
14	头足纲 Cephalopoda	火枪乌贼、曼氏无针乌贼 <i>Loliolus beka</i> , <i>Sepiella maindroni</i>
15	软体动物门 Mollusca	泥蚶、疣荔枝螺、沟棘骨螺等 <i>Tegillarca granosa</i> , <i>Thais clavigera</i> , <i>Murex aduncospinosus</i> , etc.
16	棘头梅童鱼 <i>C. lucidus</i>	棘头梅童鱼 <i>C. lucidus</i>
17	其他石首鱼科 other Sciaenidae	大黄鱼、小黄鱼、尖头黄鳍牙鲷、白姑鱼、鲉、皮氏叫姑鱼等 <i>L. crocea</i> , <i>L. polyactis</i> , <i>Chrysochir aureus</i> , <i>Pennahia argentata</i> , <i>Miichthys miiuy</i> , <i>Johnius belangerii</i> , etc.
18	腐屑食性鱼类 detritivorous fish	前鳞鲷、鲮、中华海鲷 <i>Planiliza affinis</i> , <i>Mugil cephalus</i> , <i>Arius sinensis</i>
19	其他浮游生物食性鱼类 other planktivorous fish	凤鲚、中颌棱鲢、芝罘棱鲢、康氏侧带小公鱼、鳊等 <i>C. mystus</i> , <i>Thryssa mystax</i> , <i>T. chefuensis</i> , <i>Stolephorus commersonnii</i> , <i>Ilisha elongata</i> , etc.
20	其他游泳动物食性鱼类 other piscivorous fish	海鳗、褐菖鲈、鲻、沙带鱼等 <i>Muraenesox cinereus</i> , <i>Sebastes marmoratus</i> , <i>Mugil cephalus</i> , <i>Lepturacanthus savala</i> , etc.
21	其他底栖生物食性鱼类 other benthivorous fish	翼红娘鱼、黑棘鲷、短吻舌鲷、二长棘鲷、窄体舌鲷、中国鳊 <i>Lepidotrigla alata</i> , <i>Acanthopagrus schlegelii</i> , <i>Cynoglossus abbreviatus</i> , <i>Paerargyrops edita</i> , <i>C. gracilis</i> , <i>Sillago sinica</i>
22	其他混合食性鱼类 other omnivorous fish	镰鲷、刺鲷、短吻鲷、黑鳃兔头鲷、黄鳍东方鲷 <i>Pampus echinogaster</i> , <i>Psenopsis anomala</i> , <i>Leiognathus brevirostris</i> , <i>Lagocephalus inermis</i> , <i>Takifugu xanthopterus</i>
23	底栖生物 benthic organisms	薄倍棘蛇尾、不倒翁虫、中蚓虫、线纽虫 <i>Amphioplus praestans</i> , <i>Sternaspis scutata</i> , <i>Mediomastus californiensis</i> , <i>Lineus</i>
24	碎屑 detritus	

注：序号代表的含义，图5同。

Notes: The meaning represented by the serial numbers is the same as in Fig.5.

可以看出，各功能组的营养转换效率 EE 介于 0~1，瓯江口生态系统营养级范围为 1.00~3.55，其中最低营养级为浮游植物和有机碎屑 (1.00)，

最高营养级为日本花鲈和其他游泳动物食性鱼类 (3.55)，放流种类斑鲦的营养级为 2.46，刀鲚的营养级为 2.97，鲛的营养级为 2.44，主要经

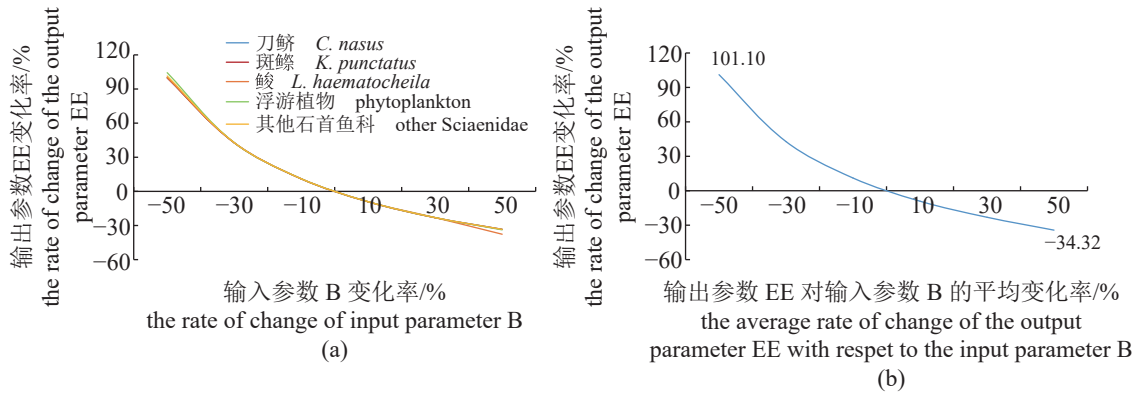


图 2 瓯江口生态系统 Ecopath 敏感性分析结果

Fig. 2 Sensitivity analysis of Ecopath model for Oujiang estuary

表 2 瓯江口生态系统 Ecopath 模型功能组估算参数

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

序号 no.	功能组 functional group	营养级 trophic level	生物量/(t/km ²) B	生产量/生物量(a ⁻¹) P/B	消耗量/生物量(a ⁻¹) Q/B	转化效率 EE
1	浮游植物 phytoplankton	1.00	3.260	180.00		0.392
2	浮游动物 zooplankton	2.00	1.189	25.00	180.00	0.603
3	斑鲚 <i>K. punctatus</i>	2.46	0.019	3.05	8.90	0.594
4	刀鲚 <i>C. nasus</i>	2.97	0.038	3.04	8.60	0.406
5	鲛 <i>L. haematocheila</i>	2.44	0.006	3.40	11.50	0.695
6	鲨鱼类 shark stingray species	3.45	0.033	0.81	2.47	0.090
7	日本花鲈 <i>L. japonicus</i>	3.55	0.169	1.05	3.30	0.171
8	龙头鱼 <i>H. nehereus</i>	3.27	0.156	1.62	5.00	0.308
9	对虾类 Penaeidae	2.42	0.021	5.65	20.00	0.924
10	其他虾类 other shrimp species	2.42	0.085	8.00	28.00	0.980
11	口足目 Stomatopoda	2.62	0.059	4.50	20.30	0.545
12	三疣梭子蟹 <i>P. trituberculatus</i>	2.70	0.257	2.50	7.50	0.224
13	其他蟹类 other crabs	2.66	0.041	3.50	12.00	0.462
14	头足纲 Cephalopoda	2.96	0.016	3.10	9.00	0.735
15	软体动物门 Mollusca	2.16	3.254	7.20	30.00	0.471
16	棘头梅童鱼 <i>C. lucidus</i>	3.14	0.045	1.72	5.50	0.527
17	其他石首鱼科 other Sciaenidae	3.20	0.073	1.85	5.78	0.377
18	腐屑食性鱼类 detritivorous fish	2.26	0.026	3.20	9.76	0.753
19	其他浮游生物食性鱼类 other planktivorous fish	2.74	0.072	3.40	10.00	0.615
20	其他游泳动物食性鱼类 other piscivorous fish	3.55	0.051	1.46	4.79	0.863
21	其他底栖生物食性鱼类 other benthivorous fish	2.69	0.058	2.47	7.10	0.733
22	其他混合食性鱼类 other omnivorous fish	3.06	0.047	2.98	8.50	0.404
23	底栖生物 benthic organisms	2.17	3.655	6.57	27.40	0.241
24	碎屑 detritus	1.00	24.000			0.322

济鱼类营养级介于 2.44~3.50, 虾类营养级为 2.42, 口足类营养级为 2.62, 蟹类营养级介于 2.66~2.70, 头足类营养级为 2.96, 平均营养级为 2.62。

2.3 食物网结构

图 3 为瓯江口生态系统食物网结构图, 图

中每一个圆圈代表一个功能组, 圆圈大小代表该功能组生物量的大小, 圆圈之间的连线代表功能组之间的食物竞争和相互捕食。从图中可看出瓯江口生态系统食物网由 2 条食物链构成: 一条是开始于浮游植物的牧食食物链, 浮游植物→浮游动物和底栖动物→小型鱼类→大型鱼

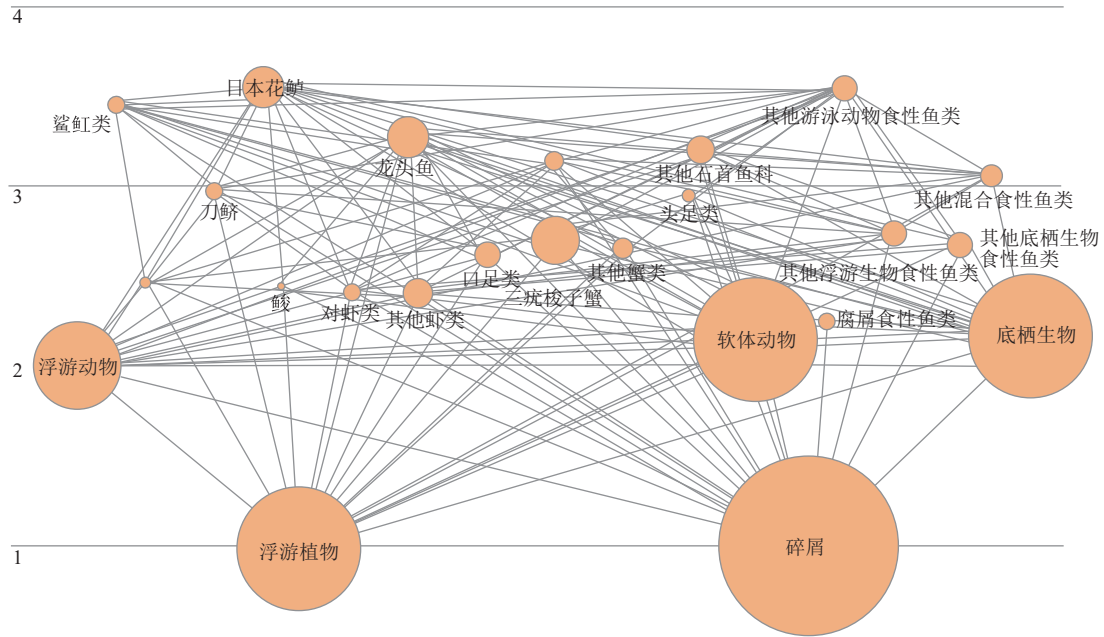


图3 瓯江口生态系统食物网

Fig. 3 Food web of Oujiang estuary ecosystem

类；另一条是开始于有机碎屑的碎屑食物链，有机碎屑→底栖动物→小型鱼虾蟹→大型鱼类。

2.4 能流分布和转换效率

将瓯江口生态系统的24个功能组的能量流聚合并为4个整合营养级(表3)，系统能量主要在这4个营养级间流动和传递。营养级I为浮游植物和碎屑，它们作为生态系统能量和物质的来源，被摄食占被摄食总量的93.49%，流向碎屑量占流向碎屑总量73.49%，营养级I总流量占总流量总量72.19%，营养级II总流量占总流量总量的26.01%’改为‘被摄食占总量的93.49%，流向碎屑量占总量73.49%，营养级I总流量占总量72.19%，营养级II总流量占总量的26.01%，营养级III~IV共占1.80%，表明瓯江口生态系统的能流主要来自初级生产者，随着营养级的升高，总流量呈现显著降低，符合生

态学能量金字塔规律。

瓯江口系统总转化效率为6.882%，初级生产者转化效率7.000%，略高于有机碎屑(6.699%)(表4)；系统能量流动直接来源于碎屑的占总能流的44%，来源于初级生产者的则占56%，表明当前瓯江口生态系统主要以牧食食物链为主导。在2条能量传递路径中，营养传递效率最高为7.903%，来自碎屑的营养级IV→V，其总流量为7.739%；营养传递效率最低为5.664%，来自碎屑的营养级II→III，其总流量为6.487%，说明在这些营养级之间的能量传递不畅，存在阻塞现象。

2.5 功能组间混合营养效应

混合营养效应图(图4)代表一个生态系统中不同功能组间的相互关系，反映某个功能组生物量的变化对其他功能组的影响大小和影响

表3 瓯江口生态系统能流分布

营养级 trophic level	被摄食量 consumption by predation	输出量 export	流向碎屑量 flow to detritus	呼吸量 respiration	总流量 throughput
IV	0.21	0.00	0.79	0.87	1.64
III	1.63	0.00	9.21	14.23	25.06
II	25.06	0.00	118.60	242.70	386.30
I	386.30	329.00	356.50	0.00	1072.00
总合 total	413.20	329.00	485.10	257.80	1485.00

表 4 瓯江口生态系统营养级的转化效率

Tab. 4 Transfer efficiency of discrete trophic levels in the Oujiang estuary ecosystem

来源 source	营养级 trophic level		
	II	III	IV
生产者 producer	7.044%	6.370%	7.645%
碎屑 detritus	5.664%	6.715%	7.903%
总流量 all flows	6.487%	6.492%	7.739%
碎屑占总能流比 proportion of total flow originating from detritus	44%		
初级生产者转化效率 from primary producers	7.000%		
有机碎屑转化效率 from detritus	6.699%		
系统转化效率 total transfer efficiencies	6.882%		

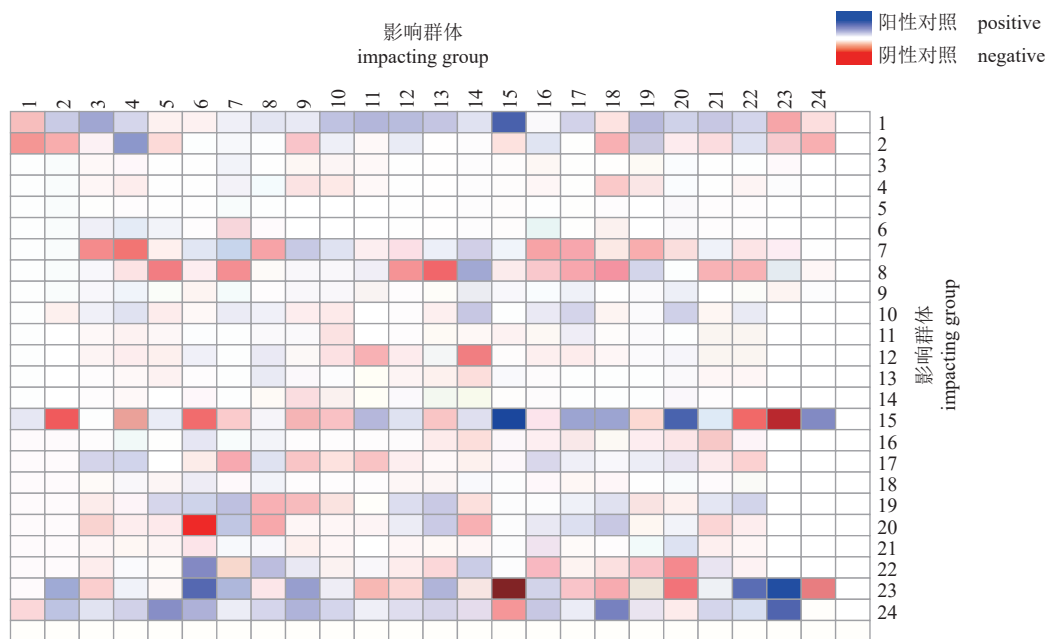


图 4 瓯江口生态系统功能组的混合营养效应

Fig. 4 Mixed trophic impact of functional groups in Oujiang estuary ecosystem

方向。蓝色代表积极效应，表示二者不存在捕食竞争或前者为后者所捕食，该功能组生物量的增加有利于另一功能组。红色代表消极效应，表示二者存在捕食竞争或后者为前者所捕食，该功能组的增加不利于另一功能组，颜色的深浅表示影响效应的强弱。从图中可以看出，瓯江口放流物种斑鲦、刀鲚的增加，对其他虾类功能组会起到一定程度上的消极效应，这是因为它们之间存在捕食关系。放流物种鲟生物量的增加对其他功能组的影响并不大，这可能是因为鲟主要以碎屑为食，瓯江口碎屑的量较大，因此在一定程度上鲟生物量的增加并不会影响平衡。

2.6 斑鲦、刀鲚和鲟的生态容量估算

应用 ecopath 模型对斑鲦、刀鲚、鲟进行

增殖容量估算。以斑鲦为例，斑鲦是浮游生物食性鱼类，主要以浮游植物和浮游动物为食，食物营养级低，与虾类、软体动物和其他浮游生物食性鱼类存在食物竞争关系。从本研究的结果看(表 5)，放流前瓯江口斑鲦的现存生物量为 0.0189 t/km²，利用模型逐步扩大斑鲦的生物量，会增加对浮游生物的捕食压力，同时影响虾类、软体动物和其他浮游生物食性鱼类的竞争压力。当斑鲦的生物量增加到原来的 3.7 倍时，其他虾类功能组的 EE 值达到了 1，若继续增加斑鲦生物量，将导致其他虾类功能组的 EE 值大于 1，势必影响模型平衡，因此斑鲦的生态容量约为 0.070 t/km²，具有一定的增殖潜力。应用模型逐一增加刀鲚、鲟的生物量，最

表 5 放流种类在瓯江口生态系统中的最大生态容纳量

序号 no.	放流种类 release species	当前生物量/ (t/km ²) current biomass	增殖倍数 multiplier	最大容纳量/ (t/km ²) maximum capacity
1	斑鲮 <i>K. punctatus</i>	0.0189	3.7	0.070
2	刀鲚 <i>C. nasus</i>	0.0379	1.7	0.065
3	鲟 <i>L. haematocheila</i>	0.0055	24	0.132

终确定刀鲚的生态容量为 0.065 t/km², 鲟的生态容量为 0.132 t/km²。

当前和放流物种达到生态容量时的瓯江口生态系统总体特征参数见表 6。当前系统状态下, 总消耗量为 423.001 t/km², 总输出量为 329.006 t/km², 总呼吸量为 257.794 t/km², 流向碎屑总量为 485.061 t/km², 分别占系统总流量的 28.30%、22.01%、17.25% 和 32.45%, 系统连接指数 (CI) 为 0.367, 系统杂食性指数 (SOI) 为 0.217。对比 Ecopath 模型当前状态与斑鲮、刀鲚和鲟分别达到生态容量时所得到的生态系统特征参数, 大部分参数无明显变化, 说明放流物种生物量增加至生态容量时, 瓯江口生态

系统基本稳定。

3 讨论

3.1 瓯江口水域生态系统特征评价

本研究基于瓯江口海域现场调查数据, 构建瓯江口生态系统 Ecopath 模型, 分析瓯江口生态系统的营养结构和能量流动, 探讨增殖放流对瓯江口生态系统总体特征参数的影响。总初级生产量/总呼吸量 (TPP/TR) 是 Ecopath 模型中衡量系统成熟度和稳定性的重要指标, 在系统发育初期, 大部分能量用于系统内生物的生长发育, 因此生产量大于呼吸量, 即 TPP/TR>1, 反之, 如果 TPP/TR<1, 则说明该生态系统受到了污染, 而 TPP/TR 的数值越接近 1, 则说明该系统生产量等于呼吸量, 此时生态系统的生物量接近最大值, 生态系统最为稳定^[25-26]。瓯江口生态系统的 TPP/TR 值为 2.276>1 (表 6), 这说明瓯江口生态系统中有大部分营养物质未被利用, 处于“幼态化”阶段, 初级生产力利用效率低下^[27]。CI 是食物网中实际连接与可能连接的比例, SOI 是所有消费者的摄食量的对数加

表 6 瓯江口水域生态系统的总体特征参数

Tab. 6 Summary statistics of net flow in Oujiang estuary ecosystem by Ecopath

特征参数 attribute parameter	当前数值 value	数值1 value1	数值2 value2	数值3 value3
总消耗量/[t/(km ² ·a)] total consumption	423.001	423.456	423.234	424.456
总输出量/[t/(km ² ·a)] total export	329.006	328.798	328.902	328.272
总呼吸量/[t/(km ² ·a)] total respiratory flow	257.794	258.002	257.898	258.528
流向碎屑总量/[t/(km ² ·a)] total flows into detritus	485.061	484.935	484.975	485.112
系统总流量/[t/(km ² ·a)] total system throughput	1494.861	1495.190	1495.009	1496.368
总生产量/[t/(km ² ·a)] total production	667.406	667.562	667.489	667.837
总初级生产力/[t/(km ² ·a)] calculated total net primary production	586.800	586.800	586.800	586.800
总初级生产力/总呼吸量 total primary production/total respiration	2.276	2.274	2.275	2.270
净系统生产量/[t/(km ² ·a)] net system production	329.006	328.798	328.902	328.272
总初级生产力/总生物量 total primary production/total biomass	46.472	46.284	46.372	46.011
总生物量/总通量/(a ⁻¹) total biomass/total throughput	0.008	0.008	0.008	0.009
总生物量/[t/(km ² ·a)] total biomass (excluding detritus)	12.627	12.678	12.654	12.754
联结指数(CI) connectance index	0.367	0.367	0.367	0.367
系统杂食性指数(SOI) system omnivory index	0.217	0.220	0.217	0.217

注: “当前数值”代表当前的系统状态; “数值1”代表斑鲮最大生态容纳量后的系统特征参数; “数值2”代表刀鲚最大生态容纳量后的系统特征参数; “数值3”代表鲟最大生态容纳量后的系统特征参数。

Notes: "value" indicates current status of the system, "value 1" indicates status at ecological carrying capacity of *K. punctatus*, "value 2" indicates status at ecological carrying capacity of *C. nasus*, "value 3" indicates status at ecological carrying capacity of *L. haematocheila*.

权平均值^[10], 这 2 个值的大小越接近 1, 就代表食物网结构越复杂, 功能组之间的联系越紧密, 系统抵抗外界环境干扰的能力越强。瓯江口生态系统的 CI 值为 0.439, SOI 值为 0.184, 二者的值均小于 1, 说明该生态系统食物网结构相对简单, 系统成熟度不高, 系统稳定性及抵抗外界干扰能力较差。

将本研究与近年来其他河口、海湾的 Eco-path 模型运算结果进行对比。各海域生态模型的营养级介于 1.0~4.5, 差异较小。2019 年莱州湾^[28]的 TPP/TR 值最接近 1, 系统的成熟度和稳定性高于其他河口海湾; 2020 年厦门湾^[16]成熟度最差; 瓯江口生态系统的 TPP/TR 值优于长江口^[29]、厦门湾^[16]、海州湾^[21]、三门湾^[19](表 7)。各海域生态系统模型的 CI 值和 SOI 值均小于 1, 表明各生态系统内部连接较弱, 食物网结构相对简单, 系统均处于不稳定状态, 瓯江口生态系统的 CI 值优于厦门湾^[16], SOI 值优于厦门湾^[16]、莱州湾^[30]和海州湾^[21]。总的来说, 瓯江口水域 Eco-path 模型运算结果与其他未成熟生态系统相似, 食物网简单, 系统成熟度不高, 分析原因, 可能是近年来人类捕捞活动和滩涂围垦工程等因素的影响, 使得鱼类生境遭到破坏, 鱼类多样性降低, 瓯江口单拖网渔获物的计算结果也表现出鱼类资源量的下降趋势^[30], 这些都导致瓯江口食物网结构简单。

3.2 斑鲦、刀鲚和鲟的生态容量

增殖放流是修复瓯江口水域生态系统的有效手段之一, 基于 Eco-path 生态容量评估技术可量化放流水域营养结构和能量流动^[31], 确保放流的规模大小, 以此来恢复渔业资源的质量和数量, 实现可持续增殖放流^[32]。斑鲦、刀鲚

和鲟是瓯江口主要增殖放流物种, 现存生物量分别为 0.0189、0.0379 和 0.0055 t/km², 应用 Eco-path 估算的生态容量分别为 0.070、0.065 和 0.132 t/km², 均有较大的增殖潜力。本研究结果表明, 斑鲦和刀鲚生物量的增加对虾类有较大的负向效应, 其增殖容量主要受到种间竞争的制约, 鲟主要以碎屑为食, 瓯江口碎屑资源量大, 因此具有较大的增殖潜力, 其增殖容量主要受到食物的限制。

研究评估了仅增加一种放流种时的生态容量, 考虑增殖放流实际是多物种同步放流, 因此探讨同时增加斑鲦、刀鲚和鲟功能组的生物量时模型的变动情况。参考单一物种放流达到生态容量时的增殖倍数, 将斑鲦、刀鲚和鲟以 3.7 : 1.7 : 24.0 的比例同步增加生物量, 从表 8 可知, 当斑鲦生物量增加 2.59 倍、刀鲚生物量增加 1.19 倍、鲟增加 16.8 倍时, 虾类功能组营养转换效率接近 1, 模型即将不平衡。虾类功能组 EE 的变动主要受斑鲦和刀鲚生物量的影响, 鲟主要以水底泥土中的有机物为食, 对虾类功能组 EE 的影响较小, 因此模型平衡状况主要由斑鲦和刀鲚共同决定。对比分析多物种同步放流与单一放流的结果发现, 放流物种若存在食性重叠的情况, 多物种同步放流时的增殖容量会明显小于单一放流。

Eco-path 模型为瓯江口增殖放流的容量评估提供了一种方法, 它从物质能量平衡的角度对特定时间和空间内的系统数据作出较好的反馈^[9], 但由于该模型属于静态模型, 存在一定的局限性, 模型暂未考虑系统内各功能组的生长变化和空间变化、功能组间食性的变化, 以及水域的环境变化等因素, 计算出的增殖生态容量处在理论值水平。增殖容量并非为确定的

表 7 瓯江口生态系统与其他模型系统特征参数的比较

Tab. 7 Comparison of characteristic parameters of Oujiang estuary ecosystem model with other models

生态系统 ecosystem	年份/年 year	营养级 trophic level	TPP/TR	CI	SOI
瓯江口 Oujiang estuary	2021	1.000~3.545	2.276	0.367	0.217
长江口 Yangtze estuary ^[29]	2020	1.000~4.438	3.200	0.388	0.234
厦门湾 Xiamen Bay ^[16]	2020	1.000~3.850	18.300	0.316	0.175
莱州湾 Laizhou Bay ^[28]	2019	1.000~3.978	1.454	0.402	0.211
海州湾 Haizhou Bay ^[21]	2018	1.000~4.190	7.096	0.429	0.204
三门湾 Sanmen Bay ^[19]	2017	1.000~3.800	13.590	0.400	0.240

表 8 同步增加放流种生物量时模型变动情况

Tab. 8 Changes in the model with simultaneous increases in biomass

序号 no.	放流种类 release species	增殖倍数 multiplier	生物量/(t/km ²) biomass	平衡情况 mass-balance change
1	斑鲈 <i>K. punctatus</i>	0.37	0.0019	平衡
	刀鲚 <i>C. nasus</i>	0.17	0.0038	
	鲮 <i>L. haematocheila</i>	2.40	0.0132	
2	斑鲈 <i>K. punctatus</i>	1.85	0.0350	平衡
	刀鲚 <i>C. nasus</i>	0.85	0.0322	
	鲮 <i>L. haematocheila</i>	12.00	0.0660	
3	斑鲈 <i>K. punctatus</i>	2.59	0.0490	其他虾类 功能组 EE=0.998
	刀鲚 <i>C. nasus</i>	1.19	0.0451	
	鲮 <i>L. haematocheila</i>	16.80	0.0924	

数值, 会随着环境的变化而改变, 因此在应用中要考虑实际动态变化以及经济和社会效益, 进一步优化模型。总的来说, 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^[30], 虽然存在不足, 但依旧可以为瓯江口增殖放流工作提供借鉴和参考。

参考文献 (References):

- [1] 徐兆礼. 夏秋季瓯江口海域鱼类数量的时空分布 [J]. 动物学学报, 2008, 54(6): 981-987.
Xu Z L. Spatial-temporal distribution of fish density in the Oujiang estuary during summer and autumn[J]. Current Zoology, 2008, 54(6): 981-987 (in Chinese).
- [2] 胡成业, 徐衡, 水柏年, 等. 温州瓯飞滩邻近海域春季游泳动物群落结构及多样性 [J]. 南方水产科学, 2015, 11(3): 7-15.
Hu C Y, Xu H, Shui B N, et al. Community structure and biodiversity of nekton near Oufei Beach of Wenzhou[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(3): 7-15 (in Chinese).
- [3] 黄梦仪. 基于 Ecopath 模型的大亚湾增殖种类生态容量评估 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
Huang M Y. Assessment of ecological carrying capacity of stock enhancement species in Daya Bay based on Ecopath model[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [4] 曹占旺, 王大鹏, 何安尤, 等. 流沙湾、营盘珍珠养殖区马氏珠母贝养殖容量的研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2011(4): 106-114.
Cao Z W, Wang D P, He A Y, et al. Carrying capacity of *Pinctada martensii* in Liusha Bay and Yingpan pearl-cultured zones[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2011(4):

106-114 (in Chinese).

- [5] Parsons T R, Takahashi M. Biological oceanographic processes[M]. New York: Pergamon Press, 1973: 186.
- [6] 卢振彬, 杜琦, 钱小明, 等. 福建围头湾贝类的养殖容量 [J]. 南方水产, 2006, 2(6): 31-38.
Lu Z B, Du Q, Qian X M, et al. Carrying capacity of shellfish culture in Weitou Bay of Fujian[J]. South China Fisheries Science, 2006, 2(6): 31-38 (in Chinese).
- [7] 刘学海, 王宗灵, 张明亮, 等. 基于生态模型估算胶州湾菲律宾蛤仔养殖容量 [J]. 水产科学, 2015, 34(12): 733-740.
Liu X H, Wang Z L, Zhang M L, et al. Carrying capacity of manila clam *Ruditapes philippinarum* in Jiaozhou Bay estimated by an ecosystem model[J]. Fisheries Science, 2015, 34(12): 733-740 (in Chinese).
- [8] Heymans J J, Coll M, Link J S, et al. Best practice in Ecopath with Ecosim food-web models for ecosystem-based management[J]. Ecological Modelling, 2016, 331: 173-184.
- [9] 范泽宇, 白雪兰, 徐聚臣, 等. 基于 Ecopath 模型的淡水水库生态系统特征及鲢、鳙生态容量分析 [J]. 中国水产科学, 2021, 28(6): 773-784.
Fan Z Y, Bai X L, Xu J C, et al. Analysis of ecological system characteristics and ecological capacity of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* in the Weishui reservoir based on Ecopath model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(6): 773-784 (in Chinese).
- [10] 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 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1131-1140.
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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1131-1140 (in Chinese).
- [11] 杨彬彬. 基于 Ecopath 模型的三沙湾能量流动分析及大黄鱼试验性增殖放流 [D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
Yang B B. Studies on energy flows of Sansha Bay ecosystem and stock enhancement of large yellow croaker based on Ecopath model[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017 (in Chinese).
- [12] 黄梦仪, 徐姗楠, 刘永, 等. 基于 Ecopath 模型的大亚湾黑鲷生态容量评估 [J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 1-13.
Huang M Y, Xu S N, Liu Y, et al. Assessment of ecological carrying capacity of *Sparus macrocephalus* in Daya Bay based on an Ecopath model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(1): 1-13 (in Chinese).
- [13] 徐雪. 东海典型海域三疣梭子蟹增殖容量估算及捕捞策略评

- 价 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
- Xu X. Releasing capacity assessment and fishing strategy evaluation of *Portunus trituberculatus* in the typical area of the East China Sea[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [14] Christensen V, Pauly D. A guide to the ECOPATH II software system (Version 2.1)[M]. ICLARM Software, 1992.
- [15] 杨林林, 姜亚洲, 袁兴伟, 等. 象山港生态系统结构与功能的 Ecopath 模型评价 [J]. 海洋渔业, 2015, 37(5): 399-408.
- Yang L L, Jiang Y Z, Yuan X W, *et al.* Evaluation on the ecosystem structure and function of Xiangshan Bay based on Ecopath model[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(5): 399-408 (in Chinese).
- [16] 张新艳, 陈彬, 丁少雄, 等. 基于 Ecopath 模型的厦门湾生态系统结构与功能变化分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(2): 217-224.
- Zhang X Y, Chen B, Ding S X, *et al.* Analysis of ecosystem structure and function changes in Xiamen Bay in the past 10 years based on Ecopath model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(2): 217-224 (in Chinese).
- [17] Ke Z X, Tan Y H, Hung L M, *et al.* Spatial distribution patterns of phytoplankton biomass and primary productivity in six coral atolls in the central South China Sea[J]. *Coral Reefs*, 2018, 37(3): 919-927.
- [18] Pauly D, Soriano-Bartz M L. Improved construction, parametrization and interpretation of steady-state ecosystem models[M]//Christensen V, Pauly D. Trophic models of aquatic ecosystems. Makati City: ICLARM Conference Proceeding, 1993: 26.
- [19] 孔业富, 尹成杰, 王林龙, 等. 基于 Ecopath 模型的三门湾生态系统结构与功能 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 829-836.
- Kong Y F, Yin C J, Wang L L, *et al.* Ecosystem structure and function of Sanmen Bay based on Ecopath model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 829-836 (in Chinese).
- [20] 张紫轩, 张继红, 吴文广, 等. 獐子岛海域虾夷扇贝底播增殖生态容量评估 [J]. 中国水产科学, 2021, 28(7): 878-887.
- Zhang Z X, Zhang J H, Wu W G, *et al.* Ecological carrying capacity assessment of bottom-culture Yesso scallops, *Patinopecten yessoensis*, in Zhangzi Island[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(7): 878-887 (in Chinese).
- [21] 任晓明, 刘阳, 徐宾铎, 等. 基于 Ecopath 模型的海州湾及邻近海域生态系统结构研究 [J]. 海洋学报, 2020, 42(6): 101-109.
- Ren X M, Liu Y, Xu B D, *et al.* Ecosystem structure in the Haizhou Bay and adjacent waters based on Ecopath model[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(6): 101-109 (in Chinese).
- [22] 全龄. Ecopath——一种生态系统能量平衡评估模式 [J]. 海洋水产研究, 1999, 20(2): 103-107.
- Tong L. Ecopath model——a mass-balance modeling for ecosystem estimation[J]. Marine Fisheries Research, 1999, 20(2): 103-107 (in Chinese).
- [23] 洪小帆, 陈作志, 张俊, 等. 基于 Ecopath 模型的七连屿礁栖性生物的生态承载力分析 [J]. 热带海洋学报, 2022, 41(1): 15-27.
- Hong X F, Chen Z Z, Zhang J, *et al.* Analysis of ecological carrying capacity of reef organisms in Qilianyu Islands based on Ecopath model[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2022, 41(1): 15-27 (in Chinese).
- [24] 刘岩, 吴忠鑫, 杨长平, 等. 基于 Ecopath 模型的珠江口 6 种增殖放流种类生态容纳量估算 [J]. 南方水产科学, 2019, 15(4): 19-28.
- Liu Y, Wu Z X, Yang C P, *et al.* Ecological carrying capacity of six species of stock enhancement in Pearl River estuary based on Ecopath model[J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(4): 19-28 (in Chinese).
- [25] 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.
- [26] Odum E P. The strategy of ecosystem development[J]. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [27] 李云凯. 东海大陆架渔业生态系统模型研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- Li Y K. Ecological modeling of the East China Sea shelf ecosystem[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009 (in Chinese).
- [28] 丁夏阳, 孙昕, 董建宇, 等. 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 [J]. 渔业科学进展, 2023, 44(1): 13-23.
- Ding X Y, Sun X, Dong J Y, *et al.* Assessment of ecosystem energy flow and ecological capacity of *Apostichopus japonicus* in the Furong Island artificial reef, Laizhou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(1): 13-23 (in Chinese).
- [29] 王殿常, 吴兴华, 丁玲, 等. 基于 Ecopath 模型的长江口生态系统结构与功能分析 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 417-425.
- Wang D C, Wu X H, Ding L, *et al.* A preliminary analysis of

- the ecosystem structure and function of the Yangtze estuary based on Ecopath model[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(2): 417-425 (in Chinese).
- [30] 陈伟峰, 叶深, 秦松, 等. 瓯江口海域鱼类群落结构及优势种 RDA 分析 [J]. *中国水产科学*, 2021, 28(12): 1536-1547.
- Chen W F, Ye S, Qin S, *et al.* Assessment of fish community structure and redundancy analysis of dominant species in the Oujiang River estuary[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(12): 1536-1547 (in Chinese).
- [31] 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鳀、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*, 2016, 46(11): 168-177.
- 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[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(11): 168-177 (in Chinese).
- [32] De Schryver P, Crab R, Defoirdt T, *et al.* The basics of bioflocs technology: the added value for aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2008, 277(3-4): 125-137.

Ecological carrying capacity of *Konosirus punctatus*, *Coilia nasus*, *Liza haematocheila* of stock enhancement in Oujiang estuary based on Ecopath model

ZHANG Xinyi^{1,2,3}, ZHENG Chunfang², QIN Song^{1,3}, LIU Weicheng^{1,3*},
ZHANG Chuan^{1,2,3}, FAN Qingsong^{1,3}

1. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China;

2. College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

3. Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bioresource, Wenzhou 325005, China

Abstract: Ecological capacity assessment is an important prerequisite for fishery resource restoration and conservation. Based on the survey data of the Oujiang estuary fishery resources and ecological environment survey in March, May, August and November 2021, the Ecopath model consisting of 24 functional groups was constructed to analyze the trophic level structure and energy flow and calculated the ecological carrying capacity for *Konosirus punctatus*, *Coilia nasus* and *Liza haematocheila*. The results showed that the trophic level of the Oujiang estuary ecosystem ranged from 1.00 to 3.55, the trophic level of *K. punctatus* (2.46), *C. nasus* (2.97) and *L. haematocheila* (2.44) were lower than other fish. The evaluation of the ecosystem structure and function showed that the total primary production/total respiration (TPP/TR) was 2.276, connectance index (CI) and system omnivory index (SOI) were 0.367 and 0.217, respectively. The results indicated that most of the trophic in the ecosystem were not utilized, the primary productivity utilization efficiency was low, and the system was still immature. The current ecological carrying capacity for *K. punctatus*, *C. nasus* and *L. haematocheila* was 0.0189, 0.0379 and 0.0055 t/km², and the potential ecological carrying capacity, based on the Ecopath model, was estimated at 0.070, 0.065 and 0.132 t/km². When reaching the ecological carrying capacity, the TPP/TR, CI and SOI changed marginally. The stability and structure of the ecosystem of Oujiang estuary were not altered significantly, the system has a potential for continuous enhancement.

Key words: ecological capacity; ecosystem structure; food webs; Ecopath model; Oujiang estuary

Corresponding author: LIU Weicheng. E-mail: lwch80@126.com

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2020YFD0900805)