

基于Ecopath模型的飞云江口生态系统特征及斑鲈增殖容量评估

李尚清^{1,2,3}, 秦松^{1,2}, 王雨航^{1,2}, 叶深^{1,2}, 范青松^{1,2}, 郑春芳⁴, 刘伟成^{1,2}

(1. 浙江省海洋水产养殖研究所 全省近岸生物种质资源保护与利用重点实验室, 浙江 温州 325000; 2. 浙江省海洋水产养殖研究所 浙江-泰国海洋技术联合实验室, 浙江 温州 325000; 3. 亳州市气象局, 安徽 亳州 236800; 4. 温州大学 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 为了解飞云江口生态系统在鱼类资源衰退和水体富营养化等因素影响下的结构现状, 评估该水域净水型鱼类斑鲈(*Konosirus punctatus*)的增殖容量。本研究基于2022—2023年飞云江口4个航次的生物资源调查数据, 应用Ecopath模型分析了生态系统特征, 并结合食物网结构和能量流动估算了斑鲈的增殖容量。该模型功能组涵盖26组, 基本覆盖生态系统能量流动的全过程。结果显示: (1) 飞云江口海域生态系统营养级为1.00~3.84, 总转化效率为8.623%; (2) 生态系统的总初级生产量(Total primary production, TPP)/总呼吸量(Total respiration, TR)为1.629>1, 系统连接指数(Connectance index, CI)为0.413<1, 系统杂食性指数(System omnivory index, SOI)为0.234<1; (3) 斑鲈的现存生物量为0.040 5 t/km², 增殖生态容量为0.0810 t/km², 增殖后生态系统的TPP/TR、CI和SOI值均更接近于1。研究表明: (1) 飞云江口海域生态系统的能量流动基本符合能量金字塔规律, 食物网结构以牧食食物链为主; (2) 生态系统的成熟度不高, 食物网结构相对简单, 抗外界干扰能力较弱, 生态系统的能量利用率不够; (3) 斑鲈进行科学的增殖放流, 对飞云江口海域生态系统的成熟与稳定有一定的促进作用。本研究可为飞云江口海域的渔业资源养护和生态环境保护工作提供参考。

关键词: 斑鲈; 生态系统结构; 增殖容量; Ecopath模型; 飞云江口

中图分类号: S 931.5

文献标志码: A

飞云江位于浙江省南部, 是浙江省八大水系之一, 飞云江口及其毗邻海域(以下简称“飞云江口海域”)是传统浙南渔场的重要组成部分^[1]。该海域作为飞云江、东海以及近岸陆地之间的过渡水域, 其外海岛屿众多, 海底地形复杂, 同时受飞云江径流、浙闽沿岸流及台湾暖流等影响, 加上水团季节变化的影响, 构成了含有大量的营养盐和有机碎屑的独特水域环境, 支撑着飞云江口及附近海域丰富的渔业资源^[2-3]。随着经济社会发展对河口生境的侵占和前期过度捕捞行为, 导致河口渔业资源种群结构发生巨大变化, 以往常见的大型经济种资源衰退严重, 取而代之的是低龄化、低值化和小型化的鱼类, 这对渔业资源的养护产生了不利影响^[4-5]。增殖放流是恢复渔业资源的一种根本的、有效的科学方法^[6]。通过增殖

放流, 不但可以补充渔业资源, 而且能够改善生态群落结构、提高生物多样性, 从而实现渔业资源的可持续发展^[7-8]。

相较于其他管理与养护措施, 基于生态容量的增殖放流是科学增殖放流的前提, 是解决海洋生态保护与生物资源可持续问题的关键途径^[9]。目前, 国内外关于生态容量的研究主要包括: 能量/饵料收支模型^[10]、食物限制因子指标法^[11]、化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)收支平衡法^[12]、Tait沿岸海域能流分析模型^[13]和Ecopath模型^[9]等。Ecopath模型能够从种群营养限制和生态系统营养平衡的角度出发, 既考虑生态系统中评估物种的捕食和竞争关系, 又考虑生态系统物质能量的流动, 相对于其他方法而言, 具有更全面的系统性, 被认为是新一代水域生态

收稿日期: 2024-07-12 修回日期: 2025-01-09

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFD0900805); 温州河口渔业资源养护试点专项(JS2022071)

作者简介: 李尚清(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态渔业。E-mail: lisq19980227@163.com

通信作者: 刘伟成, E-mail: lwch80@126.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

系统研究的核心工具^[13]。目前,该模型已被广泛应用于各个水域的渔业资源生态容量和增殖放流评估中,如南湾水库^[14]、大亚湾^[15]、长江口^[16]、白洋淀^[17]和翻阳湖^[18]等。

近年来,关于飞云江口海域渔业资源的研究多集中于水环境污染因子^[19]、海水表层沉积物^[20]、浮游生物^[3,21]及底栖生物^[22]等,而针对飞云江口海域渔业资源评估及相关物种的增殖策略研究甚少。本研究以飞云江口海域生态系统修复为出发点,基于2022—2023年飞云江口4个航次的资源环境调查数据,分析水域生态系统基本特征,并选取净水型鱼类斑鲚(*Konosirus punctatus*)作为放流物种,应用Ecopath模型估算其在飞云江口海域的生态容量,以期为飞云江口海域的渔业资源养护和生态环境保护工作提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 采样方法

本研究于2022年8月、11月和2023年3月、5月在飞云江口海域开展4个航次的渔业资源底拖

网和生态环境调查。调查范围为27°36.687'N~27°44.714'N和120°39.102'E~121°01.898'E,共设置8个站位(图1)。调查船为“浙瑞渔休00322”(船长27 m、主机功率为186 kW)。样品采集及调查方法严格按照GB 17378.3—2007《海洋监测规范》^[23]和GB/T 12763.6—2007《海洋调查规范》^[24]进行。其中,渔业资源采用底拖网(网具网口规格为500目×60 mm,囊网网目尺寸20 mm)在8:00~15:00时逐站进行底层拖网采样,平均拖速为3.5 kn,每站拖网时间为0.5~1.0 h,采集的渔获样品经冷冻保存后带回实验室分析。浮游植物和浮游动物分别采用浅水Ⅲ型浮游生物网(网口面积为0.1 m²)和浅水Ⅰ型浮游生物网(网口面积为0.2 m²)垂直采样,在网口用绳子绑定生物网口流量计(Hydro-Bios D-Flow,德国),分别记录放网前后流量计的转数,二者的差值为流量计的转数 L ,用于计算流量(流量=流量计转数 L ×网口面积 S ×流量计校正系数 M)的大小。样品采集至1 000 mL白色聚乙烯瓶后,在浮游动物样品中加入5%的中性甲醛溶液现场固定保存,以便带回实验室分析。

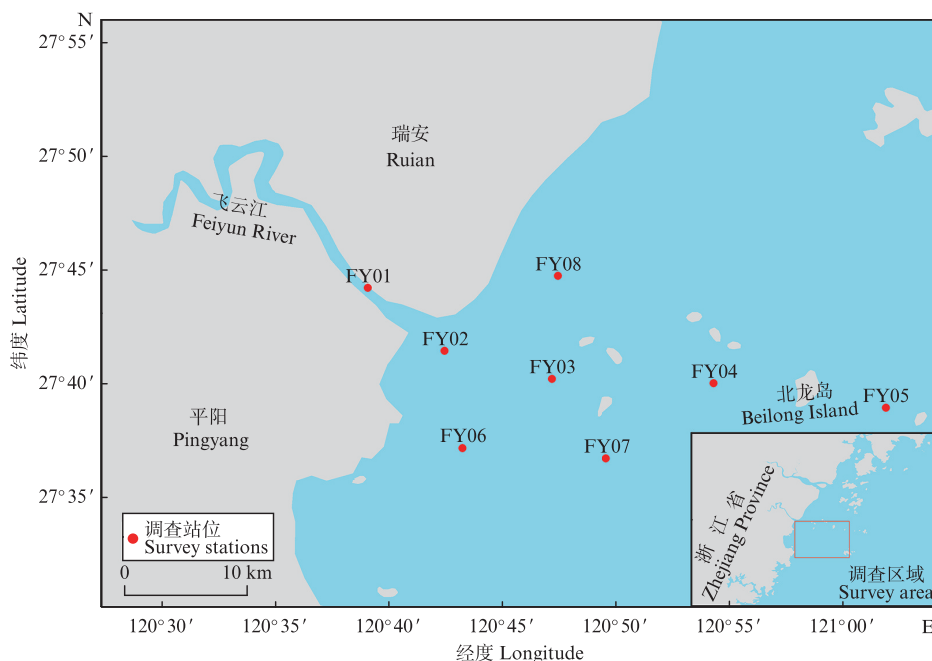


图1 飞云江口海域调查站位图
Fig. 1 Sampling stations in Feiyun River Estuary

1.2 研究方法

1.2.1 模型原理

Ecopath模型由能够反映生态系统的营养级

结构和能量流动过程的浮游植物、浮游动物、鱼类、底栖生物和碎屑等一系列生态关联的功能群组成^[25]。根据热力学原理,生态系统中的物质交

换过程遵循物质能量守恒,使得生态系统的能量流入和流出保持平衡,即产出量等于生产量减去死亡量,其中死亡量又包括捕捞死亡和自然死亡。该模型以1组线性方程来定义生态系统,其中各线性方程代表1个功能组:

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

式中: B_i 为功能组*i*的生物量(Biomass); $(P/B)_i$ 为功能组*i*的生产量和生物量的比值(Production/Biomass); $(Q/B)_j$ 为功能组*j*的消耗量和生物量的比值(Consumption/Biomass); EE_i 为功能组*i*的营养转换效率(Ecotrophic efficiency); D_{ij} 为被捕食者功能组*i*与捕食者功能组*j*的比例; E_{xi} 为功能组*i*的产出量; n 为功能组数量^[26]。其中, B_i 、 $(P/B)_i$ 、 $(Q/B)_j$ 和 EE_i 等4个参数中至少有3个为已知,则可通过模型定量计算出其他未知的生物学参数。

1.2.2 功能组划分

功能组一般由单个物种或多个物种组成,划分原则是从生态学或分类学的角度上对物种进行分组划分,一些优势种或特有种也可单独划分为功能组^[27]。依据调查结果,共设置26个功能组。其中,斑鲽为增殖放流物种,刀鲚(*Coilia nasus*)是温州海域特色的洄游性鱼类,中国花鲈(*Lateolabrax maculatus*)所处营养级较高,棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)、龙头鱼(*Harpodon nehereus*)、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)和三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)为调查中确定的优势种,因此将以上7种生物设为独立的功能组,其余物种根据相应生态特征划分功能组,26个功能组基本覆盖了飞云江水域生态系统结构和能量流动过程,模型各功能组主要物种组成见表1。

1.2.3 功能组参数来源

本研究的能量流动形式以生物量(t/m^2)的湿重表示,时间设定为1年。其中渔业资源生物量*B*通过扫海面积法计算^[28],其公式为

$$B = G/[S(1 - E)] \quad (2)$$

式中: B 为渔业资源的生物量, t/km^2 ; G 为每小时捕捞的渔获物质量, t ; S 为每小时网口的扫海面积, km^2 ; E 为逃逸率。

浮游植物生物量的大小通过叶绿素a质量浓

度换算来实现^[29];而浮游动物生物量大小的估算,则是采用浅水I型浮游生物网对特定水体进行定量采集后计算得到的;底栖生物采用箱式采泥器采集,并将淤泥样品通过0.5 mm的套筛进行冲洗过滤,在获得单位为 mg/m^3 的浮游动物和底栖动物生物量数据后,再根据调查区域平均水深换算成单位为 t/km^2 的生物量;有机碎屑量根据Paulya经验公式计算得到^[30];各个功能组的*P/B*和*Q/B*参考FishBase及邻近水域的Ecopath模型所对应功能组的数据^[26-27,31];各功能组的食物组成矩阵(Diet composition, DC)数据在参照飞云江口海域及相邻海域鱼类胃含物分析文献数据的同时,还借鉴了国际水生资源管理中心网站(<https://fishbase.se/search.php>)的相关鱼类食性数据等。

1.2.4 Ecopath模型的调试及生态容量估算

Ecopath模型的调试是指将*B*、*P/B*和*Q/B*等基本参数输入模型后,为确保各功能组输入和输出的平衡,需要对“饮食结构”部分的参数进行反复调试,以期达到生态学和热力学平衡状态的过程^[32];生态系统平衡的基本条件是使每个功能组的*EE*值均在0~1,当*EE*值大于1时,说明模型不平衡,该功能组受到的捕食压力较大^[13];Ecopath模型中的混合营养效应图能够反映出生态系统中不同功能组之间的相互作用关系,映射一个功能组生物量的变化对其他功能组的影响状况^[15];总初级生产量(Total primary production, TPP)/总呼吸量(Total respiration, TR)能够反映生态系统的成熟度,同时系统连接指数(Connectance index, CI)和杂食性指数(System omnivory index, SOI)能够反映系统内部的复杂程度。除此之外,模型其余指标的适宜范围见表2。

生态容量是指在一定时间和特定区域范围内,生态系统对某一物种的最大生态承载量^[33]。在Ecopath模型中,改变某一功能组的生物量会对其*EE*值和其余食性相关的功能组参数产生影响^[34]。将Ecopath模型调试平衡后,采用控制变量法,在保持其他功能组参数不变的情况下,将放流种功能组的生物量以10%的比例逐步增加,直到系统中任一功能组的*EE*接近或等于1时为止,此时放流种功能组的生物量即为生态容量^[26]。

表 1 飞云江口生态系统功能组及主要种类
Tab. 1 Functional groups and main species in Feiyun River Estuary

序号 No.	功能组 Functional group	主要种类 Main species
1	浮游植物 Phytoplankton	琼氏圆筛藻(<i>Coscinodiscus jonesianus</i>)、蛇目圆筛藻(<i>Coscinodiscus argus</i>)、夜光藻(<i>Ceratium tripos</i>)、中肋骨条藻(<i>Skeletonema costatum</i>)等
2	浮游动物 Zooplankton	太平洋纺锤水蚤(<i>Acartia pacifica</i>)、百陶箭虫(<i>Sagitta bedoti</i>)、肥胖箭虫(<i>Sagitta enflata</i>)、精致真刺水蚤(<i>Euchaeta concinna</i>)、中华胸刺水蚤(<i>Centropages sinensis</i>)等
3	斑鲦 <i>Konosirus punctatus</i>	斑鲦(<i>Konosirus punctatus</i>)
4	刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	刀鲚(<i>Coilia nasus</i>)
5	三疣梭子蟹 <i>Portunus tritubercula</i>	三疣梭子蟹(<i>Portunus tritubercula</i>)
6	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	棘头梅童鱼(<i>Collichthys lucidus</i>)
7	龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>	龙头鱼(<i>Harpodon nehereus</i>)
8	口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	口虾蛄(<i>Oratosquilla oratoria</i>)
9	中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	中国花鲈(<i>Lateolabrax maculatus</i>)
10	虾虎鱼类 Gobiidae	拉氏狼牙虾虎鱼(<i>Odontamblyopus lacepedii</i>)、矛尾虾虎鱼(<i>Chaeturichthys stigmatias</i>)、中华栉孔虾虎鱼(<i>Ctenotrypauchen chinensis</i>)等
11	鲆鲽类 Flatfish	长吻红舌鲷(<i>Cynoglossus lighti</i>)、焦氏舌鲷(<i>Cynoglossus joyneri</i>)、褐斑三线舌鲷(<i>Cynoglossus trigrammus</i>)等
12	其他石首鱼科 Other Sciaenidae	小黄鱼(<i>Larimichthys polyactis</i>)、黄姑鱼(<i>Nibea albiflora</i>)、大黄鱼(<i>Larimichthys scrocea</i>)、大头白姑鱼(<i>Pennahia macrocephalus</i>)等
13	大型虾类 Large-scale shrimp	哈氏仿对虾(<i>Parapenaeopsis hardwickii</i>)、周氏新对虾(<i>Metapenaeus joyneri</i>)、刀额新对虾(<i>Metapenaeus ensis</i>)、细巧仿对虾(<i>Penaeus tenellus</i>)等
14	长臂虾科 Palaemonidae	脊尾白虾(<i>Exopalaemon carinicauda</i>)、安氏白虾(<i>Exopalaemon annandalei</i>)等
15	大型蟹类 Large-scale crab	日本鲟(<i>Charybdis japonica</i>)、双斑鲟(<i>Charybdis bimaculate</i>)、矛形梭子蟹(<i>Portunus hastatoides</i>)、远海梭子蟹(<i>Portunus pelagicus</i>)等
16	头足类 Cephalopods	曼氏无针乌贼(<i>Sepiella maindroni</i>)、火枪乌贼(<i>Loligo beka</i>)、长蛸(<i>Octopus variabilis</i>)、短蛸(<i>Octopus ocellatus</i>)、剑尖枪乌贼(<i>Uroteuthis edulis</i>)
17	小型虾类 Small-scale shrimp	日本鼓虾(<i>Alpheus japonicus</i>)、中华管鞭虾(<i>Solenocera crassicornis</i>)、鲜明鼓虾(<i>Alpheus distinguend</i>)、中国毛虾(<i>Acetes chinensis</i>)
18	小型蟹类 Small-scale crab	隆线强蟹(<i>Eucrate crenata</i>)、豆形拳蟹(<i>Philyra pisumdeHaan</i>)等
19	其他口足类 Other Stomatopoda	窝纹网虾蛄(<i>Dictyosquilla foveolate</i>)、断脊小口虾蛄(<i>Oratosquillina interrupta</i>)、园尾绿虾蛄(<i>Clorida rotundicauda</i>)
20	软体动物 Mollusca	棒锥螺(<i>Turritella terebra bacillum</i>)、钩棘骨螺(<i>Murex aduncospinosus</i>)、习见蛙螺(<i>Bufo naria rana</i>)、白龙骨乐飞螺(<i>Lophiotoma leucotropis</i>)等
21	其他浮游生物食性鱼类 Other planktivorous fishes	凤鲚(<i>Coilia mystus</i>)、鳙(<i>Ilisha elongate</i>)、中颌棱鯮(<i>Thryssa mystax</i>)、锤氏小沙丁鱼(<i>Sardinella zunasi</i>)等
22	其他游泳动物食性鱼类 Other piscivorous fish	海鳗(<i>Muraenesox cinereus</i>)、褐菖鲈(<i>Sebastiscus marmoratus</i>)、高鳍带鱼(<i>Trichiurus lepturus</i>)、沙带鱼(<i>Lepturacanthus savala</i>)等
23	其他底栖生物食性鱼类 Other benthivores fishes	华髭鲷(<i>Hapalogenys analis</i>)、卵鲷(<i>Solea ovata</i>)、中华粒鲷(<i>Akysis sinensis</i>)、带纹鲷鱼(<i>Antennarius striatus</i>)等
24	其他杂食性鱼类 Other omnivorous fishes	银鲳(<i>Pampus argenteus</i>)、镰鲳(<i>Pampus echinogaster</i>)、黄鳍东方鲀(<i>Takifugu xanthopterus</i>)、六指马鲛(<i>Polydactylus sexfilis</i>)等
25	其他底栖生物 Other zoobenthos	日本倍棘蛇尾(<i>Amphioplus japonicus</i>)、寡鳃齿吻沙蚕(<i>Nephtys oligobranchia</i>)、丝异须虫(<i>Heteromastus filiformis</i>)、细丝鳃虫(<i>Cirratulus filiformis</i>)等
26	有机碎屑 Detritus	有机碎屑

表2 Ecopath模型指标适宜范围
Tab. 2 Range of suitability of Ecopath model indicators

指标 Indicators	适宜范围 Scope of suitability
食物总转化效率GE	0.1~0.3
净效率NE	大于GE
呼吸量/同化量RA/AS	小于1
鱼类呼吸量/生物量RA/B	1~10
转化率较高群体呼吸量/生物量RA/B	50~100
生产量/呼吸量P/RA	小于1

2 结果

2.1 Ecopath模型功能组参数

表3反映了飞云江口海域生态系统的Ecopath模型基本的能量流入和流出情况。从模型输出结果可以看出,飞云江口海域生态系统各功能组的营养转换效率(EE)为0.114~0.896,其中虾虎鱼科功能组的营养转换效率最高为0.896,且大型虾类功能组、小型虾类功能组和其他口足类功能组的EE值也均在0.8以上。棘头梅童鱼功能组和中国花鲈功能组的EE为0.1~0.2,营养转换效率较低。

从营养级的角度来看,飞云江口海域生态系统的营养级为1.00~3.84。其中,浮游植物和碎屑作为饵料,在营养级上处于最低位置,营养级均为1.00。营养级最高的功能组是中国花鲈,其次为其他石首鱼科功能组和其他游泳动物食性鱼类功能组,营养级均为3.80。放流物种斑鲈功能组的营养级为2.52,主要经济鱼类的功能组营养级为2.52~3.52,均值为3.24。虾类功能组的营养级为2.48~2.64,均值为2.57。蟹类功能组的营养级为2.92~3.07,均值为3.01。口足类功能组营养级均值为2.92,头足类功能组营养级为3.14。

2.2 食物网结构

图2为2023年飞云江口生态系统的食物网结构,图中蓝色的圆圈代表不同类型的功能组,圆圈面积大小代表生物量的多少,圆圈之间的连线代表不同功能组之间存在捕食或竞争关系。根据生态系统的能量来源不同,可以把食物网划分成2条不同的食物链^[15],即:始于浮游植物,止于大型鱼类的牧食食物链(浮游植物→浮游动物和底栖动物→小型鱼类→大型鱼类);始于有机碎屑,止于大型鱼类的碎屑食物链(有机碎屑→底栖动物→小型鱼虾蟹→大型鱼类)。

2.3 能流分布和转换效率

通过营养级聚合,把飞云江口海域生态系统的26个功能组的能量流合并为6个整合营养级(表4),系统间各营养级之间的营养传递效率如图3所示。随着营养级的升高,能量流动开始出现显著下降,其中营养级Ⅰ和Ⅱ流量较高,营养级Ⅴ和Ⅵ的流量较低,整个生态系统的能量流动基本符合能量金字塔规律。生态系统的总能量达到了479.4 t/(km²·a),其中,营养级Ⅰ主要由浮游植物和碎屑生态构成,作为整个生态系统的能量和物质基石,营养级Ⅰ的被摄食能量达到了437.8 t/(km²·a),占据了被摄食总量的91.32%,不过该营养级流向碎屑的能量也达到了359.6 t/(km²·a),占流向碎屑总量的86.63%。这表明浮游植物和碎屑功能组中的大部分能量并未得到有效利用,而是以碎屑的形式沉积下来,这为后续进一步了解生态系统的能量流动和物质循环提供了重要线索。

由表5可知,整个生态系统的总转化效率为8.623%。其中,初级生产者的转化效率为8.611%,略低于有机碎屑的8.640%。从营养级Ⅱ至Ⅵ的传递过程中,初级生产者的转化效率普遍高于有机碎屑。然而,在营养级Ⅱ至Ⅲ的传递过程中,初级生产者的转化效率为6.442%,稍低于有机碎屑的6.694%。系统总能量、初级生产者以及有机碎屑的转化效率最高值均在营养级Ⅲ至Ⅳ之间,均大于11%,但三者的转化效率最低值又均在营养级Ⅱ至Ⅲ之间,分别为6.541%、6.442%和6.694%。

2.4 功能组间混合营养效应

图4为该生态系统的混合营养效应图,白色方形区域代表正效应,表示两个功能组之间不存在捕食或竞争关系,即增加该功能组生物量能够对另一功能组生物量起积极或促进作用,方形越大说明促进作用越明显;黑色方形区域则相反,代表负效应,表示两个功能组之间存在捕食或竞争关系,两者之间主要起消极或抑制作用,方形越大代表抑制作用越显著。

由图4可以看出,在所有功能组中,当中国花鲈功能组的生物量增加时,对其他游泳动物食性鱼类功能组的抑制作用最为显著,同时对其他石首鱼科功能组的促进作用也最明显。从增殖放流角度来看,当放流物种斑鲈的生物量增加时,对小型蟹类功能组和浮游动物功能组的抑制作用最明显。

表 3 飞云江口海域生态系统 Ecopath 模型各功能组特征
Tab. 3 Characteristics of functional groups in the Ecopath model of the Feiyun River Estuary

功能组 Group name	营养级 Trophic level	生物量 Biomass/(t/km ²)	生产量/生物量 P/B	消耗量/生物量 Q/B	营养转化效率 EE/%
浮游植物 Phytoplankton	1.00	3.460	180.00	0	0.423
浮游动物 Zooplankton	2.00	2.130	25.00	180.00	0.663
斑鲽 <i>Konosirus punctatus</i>	2.52	0.041	2.65	16.50	0.619
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	3.17	0.035	1.48	8.60	0.578
三疣梭子蟹 <i>Portunus tritubercula</i>	2.92	0.238	2.53	7.80	0.297
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	3.33	0.165	4.28	5.40	0.151
龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>	3.24	0.304	0.72	5.50	0.374
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	2.91	0.076	4.54	20.20	0.675
中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	3.84	0.097	0.48	3.42	0.114
虾虎鱼类 Gobiidae	3.03	0.014	1.78	6.00	0.896
鲆鲽类 Flatfish	3.52	0.012	2.34	7.56	0.622
其他石首鱼科 Other Sciaenidae	3.80	0.082	1.69	4.20	0.366
大型虾类 Large-scale shrimp	2.48	0.020	5.32	20.00	0.856
长臂虾科 Palaemonidae	2.58	0.010	8.20	22.40	0.758
大型蟹类 Large-scale crab	3.07	0.119	2.10	7.20	0.485
头足类 Cephalopods	3.14	0.038	3.12	9.00	0.565
小型虾类 Small-scale shrimp	2.64	0.005	7.80	27.00	0.813
小型蟹类 Small-scale crab	3.04	0.027	3.50	13.00	0.529
其他口足类 Other Stomatopoda	2.93	0.014	5.80	19.20	0.881
软体动物 Mollusca	2.22	0.076	6.80	32.00	0.609
其他浮游生物食性鱼类 Other planktivorous fishes	2.69	0.020	3.20	12.80	0.545
其他游泳动物食性鱼类 Other piscivorous fish	3.80	0.074	1.40	4.79	0.456
其他底栖生物食性鱼类 Other benthivores fishes	3.44	0.011	2.60	8.20	0.449
其他杂食性鱼类 Other omnivorous fishes	3.46	0.038	2.89	8.40	0.419
其他底栖生物 Other zoobenthos	2.39	2.902	7.20	28.40	0.226
有机碎屑 Detritus	1.00	28.000			0.421

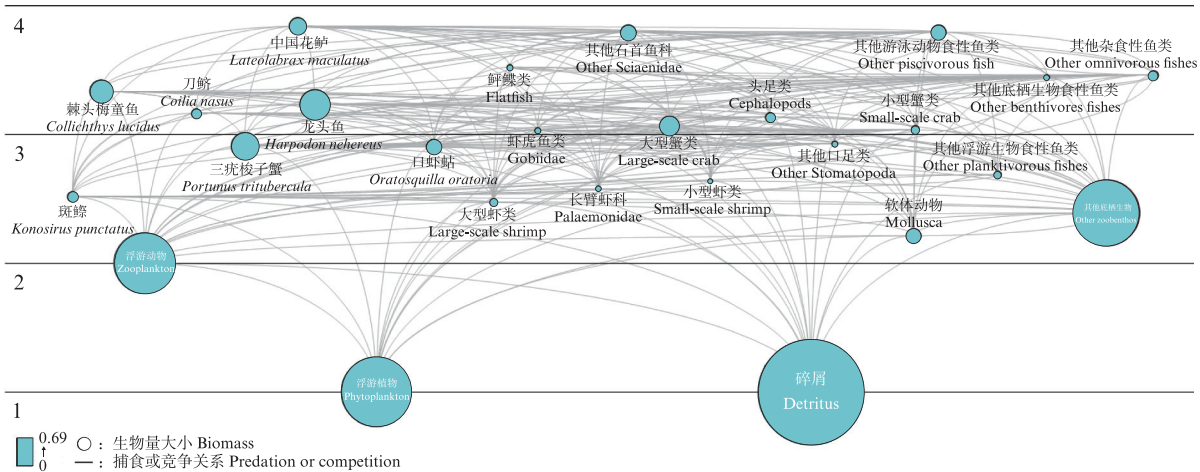
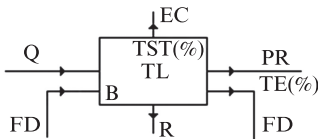
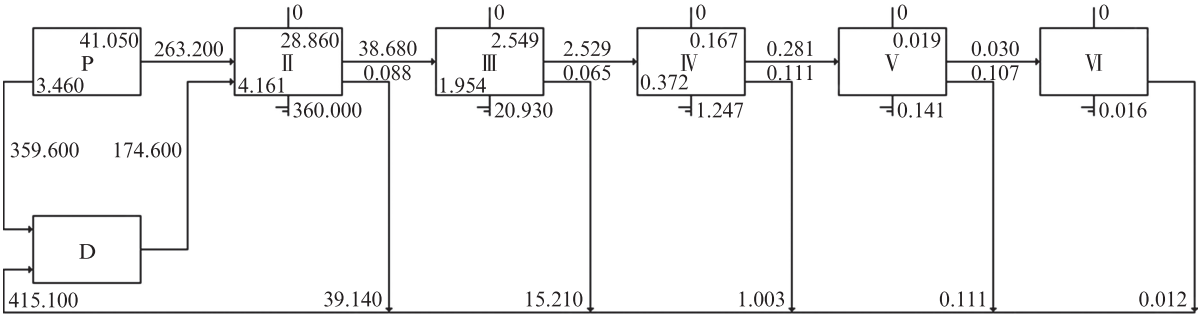


图 2 飞云江口生态系统食物网
Fig. 2 Food web of Feiyun River Estuary ecosystem

表 4 飞云江口生态系统各营养级能量流动分布
Tab. 4 Distribution of energy flow by trophic level in Feiyun River Estuary ecosystem $t/(km^2 \cdot a)$

营养级 Trophic level	被捕食量 Consumption by predators	输出量 Export	流向碎屑量 Flow to detritus	呼吸量 Respiration	总流量 Throughput
VI	0.003	0	0.013	0.017	0.033
V	0.030	0	0.111	0.141	0.282
IV	0.281	0	1.003	1.247	2.531
III	2.529	0	15.210	20.930	38.670
II	38.680	0	39.140	360.000	437.800
I	437.800	240.400	359.600	0	1 038.000
合计 Sum	479.323	240.400	415.077	382.335	1 517.316



P. 初级生产者; D. 碎屑; TL. 营养级; Q. 消费量; EC. 输出与捕捞量; R. 呼吸量; B. 生物量; PR. 被捕食量; FD. 流向碎屑量; TST. 每个营养级在系统总流量中的占比; TE. 转换效率。
P. Primary producer; D. Detritus; TL. Trophic level; Q. Consumption; EC. Export and catch; R. Respiration; B. Biomass; PR. Predation; FD. Flow to detritus; TST. Ratio of each integrated nutrient level to the total system flow; TE. Transfer efficiency.

图 3 飞云江口生态系统各营养级间的能量流动效率

Fig. 3 Efficiency of energy flow between trophic levels in the Feiyun River Estuary

表 5 飞云江口生态系统营养级的转化效率
Tab. 5 Transfer efficiency of discrete trophic levels in the Feiyun River Estuary ecosystem

来源/营养级 Source/Trophic level	II	III	IV	V	VI
生产者 Producer/%	8.924	6.442	11.11	10.68	9.963
碎屑 Detritus/%	8.697	6.694	11.08	10.63	9.936
总流量 Total flows/%	8.834	6.541	11.10	10.66	9.952
有机碎屑占总流量比重 Proportion of total flow originating from detritus			0.400		
初级生产者转化效率 From primary producers transfer efficiency/%			8.611		
有机碎屑转化效率 From detritus transfer efficiency/%			8.640		
系统转化效率 Total transfer efficiency/%			8.623		

2.5 斑鲈生态容量评估

斑鲈是飞云江口海域典型的增殖放流物种,营养级为2.52,生物量为0.040 5 t/km²,主要能量来源为浮游动植物及碎屑。将Ecopath模型调试平衡后,采用控制变量法,在保持其他功能组参数不变的情况下,将斑鲈功能组的生物量以10%

的比例逐步增加(表6),当斑鲈的生物量增至原先的2.0倍时,小型虾类的营养转换效率恰好达到1.000。然而,如果进一步增加斑鲈的生物量,使其达到原始数量的2.1倍时,小型虾类的EE值便会超过1,这标志着整个生态系统开始偏离平衡状态。

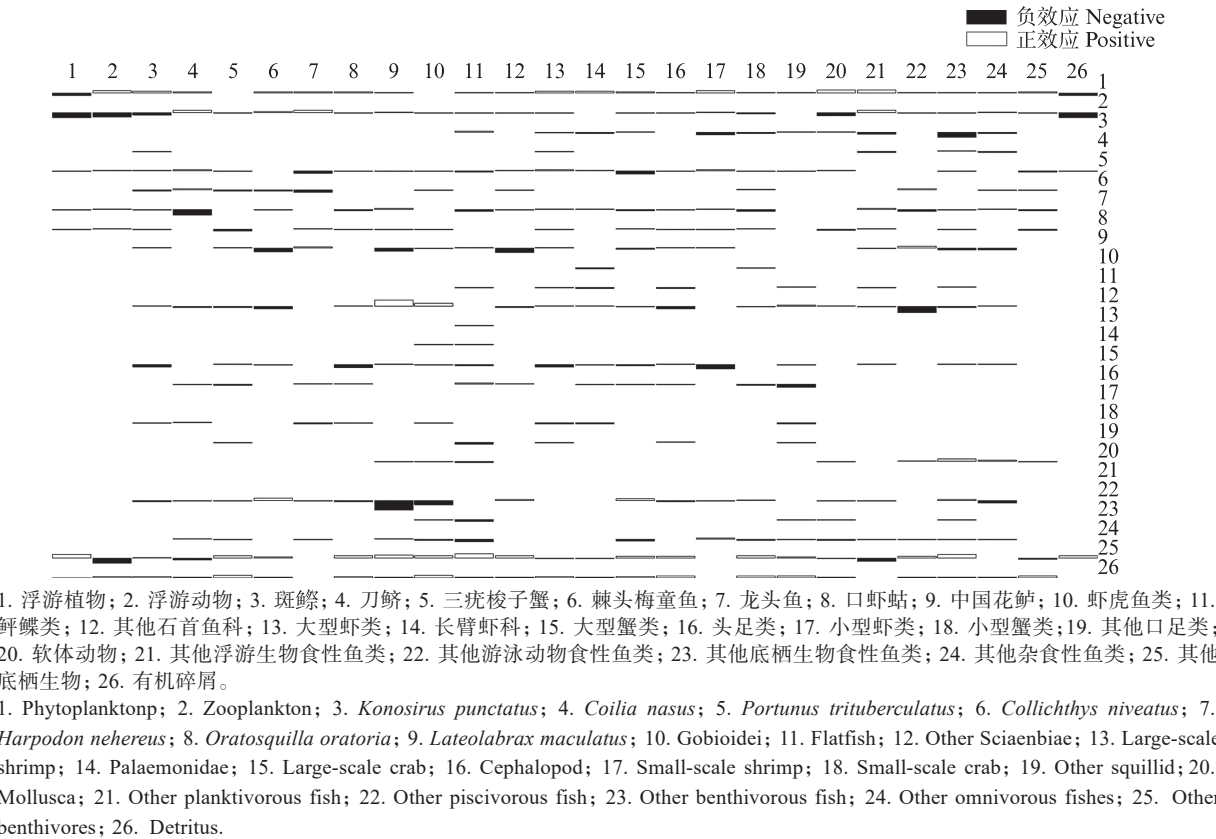


图4 飞云江口生态系统功能组的混合营养效应
Fig. 4 Mixed trophic impact of functional groups in Fei Yun River Estuary ecosystem

表6 斑鲈生物量增加对小型虾类功能组EE的影响
Tab. 6 Effects of increasing *Konosirus punctatus* biomass on EE values of other shrimps

增殖倍数 Multiple	斑鲈生物量 Biomass/(t/km ²)	小型虾类生物量 Biomass of shrimps/(t/km ²)	小型虾类EE EE of shrimps
1.0	0.040 5	0.004 6	0.813
1.1	0.044 6	0.004 6	0.832
1.2	0.048 6	0.004 6	0.851
1.3	0.052 7	0.004 6	0.869
1.4	0.056 7	0.004 6	0.888
1.5	0.060 8	0.004 6	0.907
1.6	0.064 8	0.004 6	0.925
1.7	0.068 9	0.004 6	0.944
1.8	0.072 9	0.004 6	0.963
1.9	0.077 0	0.004 6	0.982
2.0	0.081 0	0.004 6	1.000
2.1	0.085 1	0.004 6	1.019

2.6 斑鲈达到生态容量前后生态系统特征对比

2023年飞云江口海域生态系统总体特征和斑鲈功能组达到生态容量时系统的总体特征的参数对比如表7所示。当前生态系统的系统总流量为1 517.491 t/(km²·a),系统总消耗量、总输出量、总呼吸量和流向有机碎屑总流量分别为479.619、240.434、382.367和415.071 t/(km²·a),各自占系统总流量的31.61%、15.84%、25.20%和27.35%。斑鲈增殖后系统总流量为1 517.892 t/(km²·a),系统总消耗量、总输出量、总呼吸量和流向有机碎屑总流量占比分别为31.64%、15.81%、25.22%和

27.33%,增殖前后变化幅度较小,均小于0.03 t/(km²·a)。当前生态系统的TPP/TR为1.629,CI值和SOI值分别为0.413和0.234,斑鲈达到生态容量时的TPP/TR、CI值和SOI值分别为1.627、0.413和0.236,前后变化均在0.002以内,且增殖后三者的值均更接近于1。

从Ecopath模型的前后对比结果来看,斑鲈达到生态容量时所得到的生态系统特征参数与增殖前参数相比无明显变化,这表明斑鲈的生物量达到生态容量时,飞云江口海域生态系统的稳定性基本不受影响。

表7 飞云江口海域生态系统的总体特征参数
Tab. 7 Characteristic parameters of the Feiyun River Estuary ecosystem

生态系统特征参数 Parameter	增殖前 Before	增殖后 After
系统总消耗量 Sum of all consumption/[t/(km ² ·a)]	479.619	480.287
系统总输出量 Sum of all exports/[t/(km ² ·a)]	240.434	240.006
系统总呼吸量 Sum of all respiratory flows/[t/(km ² ·a)]	382.367	382.794
流向有机碎屑总流量 Sum of all flows into detritus/[t/(km ² ·a)]	415.071	414.805
系统总流量 Total system throughput/[t/(km ² ·a)]	1 517.491	1 517.892
总生产量 Sum of all production/[t/(km ² ·a)]	700.809	700.916
总初级生产量 Calculated total net primary production/[t/(km ² ·a)]	622.800	622.800
总初级生产量/总呼吸量 Total primary production/Total respiration	1.629	1.627
系统净生产量 Net system production/[t/(km ² ·a)]	240.434	240.006
总初级生产量/总生物量 Total primary production/Total biomass	62.241	61.990
总生物量/总流量 Total biomass/Total throughput	0.007	0.007
总生物量 Total biomass/(t/km ²)	10.006	12.654
系统连接指数 Connectance index	0.413	0.413
系统杂食性指数 System omnivory index	0.234	0.236

3 讨论

3.1 飞云江口海域生态系统特征

从能流分布和转换效率的角度来看,飞云江口海域生态系统营养级Ⅰ的被摄食能量占被摄食总量的91.32%,但流向碎屑的能量也占流向碎屑总量的86.63%。这表明浮游植物和碎屑功能组中的大部分能量并未得到有效利用,而是以碎屑的形式沉积下来。研究还发现飞云江口海域生态系统的能量主要源自浮游植物和有机碎屑,其中浮游植物贡献了总能流的60%,而有机碎屑则占据了剩余的40%,浮游植物的贡献度大于有机碎屑,表明飞云江口海域生态系统的能量流动以牧食食物链为主导;同时,该生态系统总能量、初级生产

者以及有机碎屑的转化效率最高值均在营养级Ⅲ至Ⅳ之间,但三者的转化效率最低值,均在营养级Ⅱ至Ⅲ之间,这说明在该生态系统中,营养级之间的能量传递不畅,存在阻塞的情况。因此,飞云江口海域生态系统需要加大对浮游植物和有机碎屑的能量利用,提高Ⅱ至Ⅲ营养级的能量转化效率,避免水体富营养化现象的发生。

由图4可以看出,当放流物种斑鲈的生物量增加时,对小型蟹类功能组和浮游动物功能组的抑制作用最明显。对于小型蟹类功能组来说,可能因为斑鲈与该功能组之间的食性有部分重合,存在捕食竞争关系。而对于浮游动物功能组来说,浮游动物为斑鲈的主要饵料,因此增加斑鲈的生物量会对其产生较大的消极影响。

从衡量生态系统成熟度的总初级生产量/总呼吸量(TPP/TR)来看,TPP/TR越趋近于1,说明生态系统越稳定。当TPP/TR>1时,总初级生产量大于总呼吸量,表明该生态系统处于发育初期,反之则表明该生态系统受到了有机污染^[35-37]。从表7可以看出,当前飞云江水域生态系统的TPP/TR为1.629,说明飞云江口海域生态系统尚处于发育阶段,有较多的能量未被充分利用。从能够反映系统内部复杂程度的系统连接指数(CI)和系统杂食性指数(SOI)来看,这两个值越趋近于1,说明食物网结构越复杂,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^[38]。飞云江口生态系统的CI值和SOI值分别为0.413和0.234,两者

均小于1,说明该生态系统食物网结构较为简单,且系统成熟度不高,各功能组之间联系紧密度不够,系统稳定性及抵抗外界干扰能力较差。本研究结果与近5年来我国厦门湾^[27]、海州湾^[38]、莱州湾^[39]、舟山海域^[40]和长江口^[16]等水域的生态系统特征类似。从各水域Ecopath模型参数对比结果来看(表8),各水域生态模型的营养级为1.00~4.44,其中长江口的营养级范围最宽,飞云江口的营养级范围最窄。2023年飞云江口海域生态系统的TPP/TR和SOI较其他水域最趋近于1,CI值与最高的海州湾差值仅为0.016,这说明与其他水域相比,飞云江水域生态系统的成熟度更高,稳定性更好,抗干扰能力更强。

表8 飞云江口与其他水域系统特征参数对比
Tab. 8 Characteristic parameters of Feiyun River Estuary compared to other water systems

水域 Water	年份 Year	营养级 Trophic level	TPP/TR	CI	SOI
飞云江口 Feiyun River Estuary	2023	1.00~3.84	1.629	0.413	0.234
舟山海域 Zhoushan Sea Area	2021	1.00~4.28	2.260	0.372	0.222
长江口 Yangtze River Estuary	2020	1.00~4.44	3.200	0.388	0.234
厦门湾 Xiamen Bay	2020	1.00~3.85	18.300	0.316	0.175
莱州湾 Laizhou Bay	2019	1.00~3.98	1.454	0.402	0.211
海州湾 Haizhou Bay	2018	1.00~4.19	7.096	0.429	0.204

综合来看,虽然飞云江口海域生态系统状况较其他水域稍好,但都表现出生态系统成熟度不高,食物网简单,各营养级之间联系不密切,抗外界干扰能力较弱的特点。分析原因可能是由多方面因素共同作用的结果,如:渔业过度捕捞、滩涂围垦及涉海工程等人类活动对鱼类种群造成了破坏,导致鱼类种群数量减少,多样性降低^[9];另一方面,以全球变暖为代表的全球性气候变化对生态系统的影响也尤为显著,温度变化使得许多物种的地理分布和洄游模式发生改变,进而导致生物多样性的减少,使生态系统的稳定性受损^[41];同时,水源污染、土壤侵蚀、植被破坏等环境问题也会严重影响生态系统的平衡^[19]。这些因素共同导致了飞云江口食物网的结构简单,对生态系统的稳定性和功能产生了不良影响。

3.2 斑鲈生态容量分析

基于生态容量的增殖放流是科学增殖放流的前提,是修复飞云江口海域生态系统、解决生物资源可持续问题的关键手段。斑鲈为近海暖水型中上层小型鱼类,主要以浮游生物为食,其生长迅速且性成熟较快,营养级较低,与刀鲚、头

足类、虾类、蟹类、软体动物及其他浮游生物食性鱼类等均存在食物竞争。2022—2023年飞云江水域斑鲈的现存生物量为0.041 t/km²,经Ecopath模型估算后发现,当增殖倍数为2倍时,小型虾类功能组的EE为1,继续增大斑鲈生物量会破坏生态系统的平衡,因此飞云江口水域斑鲈的生态容量为0.081 t/km²,有较大的增殖空间。

本研究结果表明,增加斑鲈的生物量会对小型虾类功能组有较大的负向效应。从功能组间混合营养关系来看(图4),斑鲈对小型虾类功能组的负效应影响仅次于大型蟹类功能组,斑鲈的生物量变化会对小型虾类功能组造成较大的消极影响。从食物网结构来看(图2),斑鲈与小型虾类功能组的营养级水平类似,增加斑鲈的生物量,会同步使中国花鲈、石首鱼科鱼类和其他游泳动物食性鱼类等存在饵料竞争关系鱼类的生物量增加,进而间接对小型虾类功能组造成捕食压力。因此,为减小存在饵料竞争关系鱼类对小型虾类所造成的影响,放流时可考虑一并放流这些受到较大影响的生物种类。从当前的生态系统总体特征和斑鲈功能组达到生态容量时的系

系统总体特征对比结果来看,增殖后生态系统的 TPP/TR 由 1.629 变为 1.627, CI 值不变, SOI 值由 0.234 增至 0.236, 三者的值均更加趋近于 1, 这表明对斑鲈进行科学的增殖放流, 对飞云江口海域生态系统的成熟与稳定有一定的促进作用。同时, 若要增加系统杂食性指数, 进一步提升生态系统的稳定性, 在实施增殖放流活动时, 可以并行考虑投放斑鲈所需的饵料物种, 同时借鉴当地其他放流物种的放流经验, 确保放流活动符合“生态友好型”原则。

4 展望

本研究所采用的 Ecopath 模型属于静态模型, 在对生态系统的模拟过程中, 暂未考虑空间分布、生长阶段及环境变化等因素导致的各功能组物种的食性变化, 这会造成估算结果与实际相比有一定的差异性。因此, 在后续研究中, 应考虑物种生长的实际动态变化, 尽可能的细分功能组, 并减少相关数据的引用, 使模型评估结果更加准确。

感谢外业调查中为本研究数据和资料的获付出辛勤劳动的所有工作人员。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 李尚清, 叶深, 王雨航, 等. 瓯江口海域鱼类早期资源群落结构及优势种相关性分析[J]. 水生生物学报, 2024, 48(6): 898-909.
- LI S Q, YE S, WANG Y H, et al. Community structure and correlation of dominant species in early fish resources in the Oujiang Estuary [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(6): 898-909.
- [2] BAROILLER J F, D'COTTA H, SAILLANT E. Environmental effects on fish sex determination and differentiation [J]. Sexual Development, 2009, 3(2/3): 118-135.
- [3] 董开兴, 徐兆礼. 飞云江口附近海域浮游动物群落特征 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 744-752.
- DONG K X, XU Z L. Characteristics of zooplankton communities off the Feiyun River estuary [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 744-752.
- [4] 马孟磊, 陈作志, 许友伟, 等. 基于 Ecopath 模型的胶州湾生态系统结构和能量流动分析 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 462-470.
- MA M L, CHEN Z Z, XU Y W, et al. Analysis of structure and energy flow in Jiaozhou Bay ecosystem based on Ecopath model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(2): 462-470.
- [5] 林群. 黄渤海典型水域生态系统能量传递与功能研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- LIN Q. Studies on the ecosystem energy transfer and function in the typical waters of Yellow and Bohai Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [6] 李继龙, 王国伟, 杨文波, 等. 国外渔业资源增殖放流状况及其对我国的启示 [J]. 中国渔业经济, 2009, 27(3): 111-123.
- LI J L, WANG G W, YANG W B, et al. Fish resource enhancement abroad [J]. Chinese Fisheries Economics, 2009, 27(3): 111-123.
- [7] MORVEZEN R, BOUDRY P, LAROCHE J, et al. Stock enhancement or sea ranching? Insights from monitoring the genetic diversity, relatedness and effective population size in a seeded great scallop population (*Pecten maximus*) [J]. Heredity, 2016, 117(3): 142-148.
- [8] 水柏年. 海洋渔业资源增殖放流反思及优化探讨 [J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(5): 737-743.
- SHUI B N. Rethinking and optimization of releasing stock enhancement for marine fishery resources: a review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2023, 38(5): 737-743.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 张继红. 滤食性贝类养殖活动对海域生态系统的影响及生态容量评估 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2008.
- ZHANG J H. Effect of filter feeding shellfish mariculture on the ecosystem and the evaluation of ecology carrying capacity [D]. Qingdao: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2008.
- [12] 詹力扬, 郑爱榕, 陈祖峰. 厦门同安湾牡蛎养殖容量的估算 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2003, 42(5): 644-647.
- ZHAN L Y, ZHENG A R, CHEN Z F. Estimation of

- carrying capacity of the oyster in Xiamen Tongan Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2003, 42(5): 644-647.
- [13] 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.
- [14] 王瑞, 米玮洁, 李睿, 等. 基于 Ecopath 模型的南湾水库生态系统结构与功能定量分析[J]. 三峡生态环境监测, 2018, 3(4): 37-46.
WANG R, MI W J, LI R, et al. Quantitative analysis of the ecosystem structure and function of the Nanwan reservoir based on Ecopath model [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, 3(4): 37-46.
- [15] 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, LIUY, 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.
- [16] 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.
- [17] 陈泽豪, 王颖, 王乔, 等. 基于习性和食物网的白洋淀大型底栖动物群落恢复研究[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(5): 136-147.
CHEN Z H, WANG Y, WANG Q, et al. Restoration of macrozoobenthos community in Baiyangdian Lake based on habit and food web [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(5): 136-147.
- [18] 吴斌, 贺刚, 王伟萍. 基于 Ecopath 模型的鄱阳湖通长江水道长江江豚环境容纳量初步估算[J]. 江西农业学报, 2022, 34(5): 155-159.
WU B, HE G, WANG W P. Preliminary estimation of environmental capacity of Yangtze finless porpoise in Poyang lake through Yangtze River waterway based on Ecopath model[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(5): 155-159.
- [19] 张哲宣, 厉子龙, 叶虹, 等. 近岸海域水质污染因子空间特征和来源研究-以浙南瑞安市近岸海域为例[J]. 浙江大学学报(理学版), 2023, 50(3): 332-345.
ZHANG Z X, LI Z L, YE H, et al. Spatial characteristics and sources of water pollution in nearshore area: a case study on the nearshore area of Ruian in southern Zhejiang [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2023, 50(3): 332-345.
- [20] 吴创收, 黄世昌, 罗向欣, 等. 瓯飞浅滩及附近海域表层沉积物粒度特征及其水动力响应[J]. 海洋通报, 2015, 34(4): 399-406.
WU C S, HUANG S C, LUO X X, et al. Characteristics of surface sediment grain size in Oufei Shoal and adjacent sea area and hydrodynamic responses[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(4): 399-406.
- [21] 刘述锡, 孙淑艳, 王真良, 等. 飞云江与鳌江口海域夏、秋季环境因子与浮游生物的分布变化[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 430-437.
LIU S X, SUN S Y, WANG Z L, et al. Change in distribution of plankton as affected by environmental factors in the estuaries of Feiyunjiang River and Aojiang River in summer and autumn[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(4): 430-437.
- [22] 王航俊, 张钊, 周时强, 等. 瓯江口与飞云江口附近海岛潮间带大型底栖动物群落结构研究[J]. 海洋湖沼通报, 2016(3): 62-67.
WANG H J, ZHANG Z, ZHOU S Q, et al. Community structure of the intertidal macrobenthos in islands near the Oujiang estuary and Feiyunjiang estuary [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2016(3): 62-67.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB17378.3—2007 海洋监测规范第3部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.3-2007 The specification for marine monitoring, Part 3: sample collection storage and transportation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T12763.6—2007 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6-2007 Specifications for oceanographic survey-Part 6: marine biological survey [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [25] 胡高宇, 张翔, 黄晓林, 等. 基于 Ecopath 模型的海水池塘主要养殖模式比较分析[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(4): 716-729.
HU G Y, ZHANG X, HUANG X L, et al. Comparative

- analysis of main breeding models of seawater pond based on Ecopath model [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(4): 716-729.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- ZHAN B Y. Fisheries resource assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [29] 孙军. 海洋浮游植物细胞体积和表面积模型及其转换生物量[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- SUN J. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for marine phytoplankton and its relative conversion biomass [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [30] CHRISTENSEN V, PAULY D. ECOPATH II-a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics [J]. Ecological Modelling, 1992, 61(3/4): 169-185.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 徐姗楠, 陈作志, 郑杏雯, 等. 红树林种植-养殖耦合系统的养殖生态容量[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 393-403.
- XU S N, CHEN Z Z, ZHENG X W, et al. Assessment of ecological carrying capacity of intertidal mangrove planting-aquaculture ecological coupling system [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(3): 393-403.
- [35] ODUM E P. The strategy of ecosystem development[J]. Science, 1969, 164(3877): 262-270.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 林群, 袁伟, 马玉洁, 等. 基于Ecopath模型的海州湾三疣梭子蟹增殖生态容量研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(6): 131-138.
- LIN Q, YUAN W, MA Y J, et al. Evaluation of project to enhance the ecological carrying capacity of swimming crab (*Portunus trituberculatus*) in Haizhou Bay [J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(6): 131-138.
- [39] 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.
- [40] 郝辉攀, 蒋日进, 兰丹, 等. 基于Ecopath模型的舟山海域褐菖鲉(*Sebastes marmoratus*)生态容量评估[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(6): 1672-1681.
- HAO H B, JIANG R J, LAN D, et al. Assessment of ecological carrying capacity of *Sebastes marmoratus* in Zhoushan sea area in the Ecopath model[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(6): 1672-1681.
- [41] 王婷, 祝从文, 马双梅. 东亚夏季风和中国雨季的趋势变化和关键区气温和海温的影响[J]. 大气科学, 2024, 48(3): 1217-1232.
- WANG T, ZHU C W, MA S M. Changes in the East Asian summer monsoon and rainy season in China and critical impacts of regional air and sea surface temperature anomalies[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, 48(3): 1217-1232.

Assessment of ecosystem characteristics and the proliferation capacity of *Konosirus punctatus* in the Feiyun River Estuary based on the Ecopath model

LI Shangqing^{1,2,3}, QIN Song^{1,2}, WANG Yuhang^{1,2}, YE Shen^{1,2}, FAN Qingsong^{1,2}, ZHENG Chunfang⁴, LIU Weicheng^{1,2}

(1. Zhejiang Key Laboratory of Coastal Biological Germplasm Resources Conservation and Utilization, Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325000, Zhejiang, China; 2. Sino-Thai Joint Laboratory of Marine Science and Technology, Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325000, Zhejiang, China; 3. Bozhou Meteorological Bureau, Bozhou 236800, Anhui, China; 4. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China)

Abstract: To investigate the current structural status of the Feiyun River Estuary ecosystem under the influence of factors such as fish stock decline and eutrophication, and to evaluate the proliferation capacity of the water-purifying fish species *Konosirus punctatus* in this area, this study analyzed ecosystem characteristics using the Ecopath model based on biological resource survey data collected from four voyages in the Feiyun River Estuary between 2022 and 2023. The study also estimated the proliferation capacity of *Konosirus punctatus* by considering food web structure and energy flow. The model's functional groups encompassed 26 categories, essentially covering the entire process of energy flow within the ecosystem. The results revealed: (1) The trophic levels in the Feiyun River Estuary ranged from 1.00 to 3.84, with a total conversion efficiency of 8.623%. (2) The ratio of total primary production (TPP) to total respiration (TR) in the ecosystem was 1.629, which is greater than 1; the connectance index (CI) was 0.413, which is less than 1; and the system omnivory index (SOI) was 0.234, also less than 1. (3) The existing biomass of *Konosirus punctatus* was 0.040 5 t/km², with a proliferation ecological capacity of 0.081 0 t/km². After proliferation, the TPP/TR, CI, and SOI values of the ecosystem all approached 1 more closely. The research indicated that: (1) The energy flow in the Feiyun River Estuary ecosystem generally adhered to the laws of the energy pyramid, with a food web structure dominated by grazing food chains. (2) The ecosystem's maturity was relatively low, its food web structure was simple, its resistance to external disturbances was weak, and its energy utilization efficiency was insufficient. (3) Scientific stock enhancement and release of *Konosirus punctatus* could promote the maturity and stability of the Feiyun River Estuary ecosystem. This study provides valuable insights for the conservation of fishery resources and ecological environment protection in the Feiyun River Estuary.

Key words: *Konosirus punctatus*; ecosystem structure; accretion capacity; Ecopath model; Feiyun River Estuary