

DOI: 10.12264/JFSC2025-0060

獐子岛邻近海域生态系统中鲸类与渔业的交互作用

王志林^{1,2}, 魏旭^{1,2}, 司立伟^{1,2}, 李溢^{1,2}, 刘航^{1,2}, 安文聪^{1,2}, 张琰超^{1,2}, 徐龙飞^{1,2},
李青霞^{1,2}, 高东奎^{1,2,3}, 田涛^{1,2,3}, 吴忠鑫^{1,2,3*}

1. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116023;
2. 辽宁省海洋牧场工程技术研究中心, 辽宁 大连 116023;
3. 大连海洋大学设施渔业教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023

摘要: 近年来, 獐子岛邻近海域小鳮鲸(*Balaenoptera acutorostrata*)、江豚(*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*)等鲸类数量逐渐增加, 但鲸类与渔业在食物网内的相互作用及其对近海生态系统结构和功能的影响目前尚不明确。本研究基于 Ecopath 软件构建了獐子岛邻近海域食物网模型, 评价该生态系统的结构和功能特征并分析鲸类在食物网中的营养作用及其与主要渔业之间的相互作用关系。研究结果表明: 獐子岛邻近海域生态系统中各功能组营养级范围为 1.00~4.24, 其中小鳮鲸营养级为 3.74, 江豚为最高营养级物种(4.24), 江豚的关键度指数(-0.53)及相对总影响值(0.33)均高于小鳮鲸(-0.82、0.17)。混合营养效应(MTI)分析表明, 小鳮鲸及江豚对第 IV 和第 III 营养级物种的消极影响均大于其积极影响, 其中江豚对食物网造成的消极影响最大(7.5%), 其对第 III 营养级物种影响最为强烈, 分别造成 14.5%积极影响和 22.2%的消极影响; 渔业方式中, 中上层拖网(30.8%)及休闲垂钓(26.7%)对食物网造成的消极影响最大。该生态系统中鲸类消费量仅占各物种总消费量的 0.3%, 潜水捕捞(39.2%)及中上层拖网(24.5%)渔获量占总消费流量比例最高。此外, 生态位重叠指数显示, 江豚与中上层拖网之间的资源竞争程度较高(0.75), 而小鳮鲸和江豚与总渔业之间的生态位重叠指数仅分别为 0.03 和 0.33。两种鲸类中江豚与渔业的作用强度更高, 但两者捕食对研究区域的食物网影响均远低于渔业开发。研究结果为实现区域海洋哺乳动物保护与渔业资源的协同管理提供参考。

关键词: 鲸类; 基于生态系统的渔业管理; 营养交互; 资源竞争; 生态位

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)07-1019-14

鲸类是重要的海洋生物, 它们提供了如气候调节、增加生物多样性、促进旅游业发展以及食物供给等生态系统服务功能^[1-2]。鲸类在海洋中上层生态系统中的生态作用一直是渔业管理和生态保护的科学辩论焦点, 多种鲸类通过营养级联效应对中层营养级生物发挥自上而下的控制作用, 保证了海洋食物网的稳定性^[3]。在过去几十年中, 包括鲸类在内的海洋哺乳动物和渔业之间的相互作用受到越来越多的关注^[4]。对于海洋哺乳动物

来说, 渔业影响可分为作业影响和生态影响。作业影响是渔业造成的直接影响, 指与渔具的物理接触导致的海洋哺乳动物受伤或死亡^[5]。生态影响主要体现在渔业通过与海洋哺乳动物直接竞争食物资源, 以及通过影响食物网动态或栖息地质量产生的间接作用^[6]。与作业影响相比, 生态影响更加难以准确地进行评估, 主要原因是对受影响生态系统的食物网动态缺乏足够的认识。鲸类与渔业对生物资源的竞争可能是当前和未来二者产生

收稿日期: 2025-03-21; **修订日期:** 2025-05-05.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2401803, 2023YFD2401102); 辽宁省联合基金项目面上项目(2023-MSLH-018); 辽宁省教育厅 2022 年度高校基本科研项目(LJKMZ20221120).

作者简介: 王志林(2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事渔业资源生态学研究. E-mail: 1361725343@qq.com

通信作者: 吴忠鑫, 副教授, 主要从事渔业资源养护和海洋牧场研究. E-mail: wuzhongxin@dlou.edu.cn

冲突的主要原因,减少他们之间的相互冲突是海洋生态系统管护策略的重要目标^[7]。

鲸类生态作用的研究大多是以单一捕食者与饵料生物之间的相互作用角度进行的,只有少数的多物种研究^[8-9]。然而,鲸类与渔业或其他海洋生物之间的营养作用是极其复杂的,并且往往是间接的,因此应在生态系统框架内进行评估。基于生态系统的渔业管理(ecosystem-based fisheries management, EBFM)代表了渔业管理的新方向,它突破了以往最大限度利用单一目标物种的管理方式,从生态系统角度出发,考虑到目标种群与捕食者、竞争者以及饵料生物之间的相互作用关系,旨在重建和维持非目标物种和保护物种的种群^[10]。伴随 EBFM 理念的深入,一些国际组织建议在渔业管理中采用基于生态系统的方法量化渔业与濒危鲸类的营养与空间利用重叠程度^[11]。而生态系统模型可用于评价海洋哺乳动物在生态系统中的营养作用以及它们与渔业之间的潜在关系。

獐子岛邻近海域位于黄海北部,地处海洋岛渔场之中,历史上北黄海海域是我国近海鲸类资源最丰富的区域,包括小须鲸(*Balaenoptera acutorostrata*)、江豚(*Neophocaena asiaorientalis sunameri*)、长须鲸(*Balaenoptera physalus*)、座头鲸(*Megaptera novaeangliae*)、灰鲸(*Eschrichtius robustus*)在内的主要鲸类十余种^[12]。近年来,随着北黄海渔业资源养护力度的加强,鲸类数量逐渐增加,其中小须鲸和江豚是研究海域最为常见的鲸类^[13-15]。小须鲸作为黄海海域丰度最高的鲸类^[16-18],隶属鲸目须鲸科须鲸属,是一种小型须鲸,在北黄海主要以太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*)、玉筋鱼(*Ammodytes personatus*)和日本鳀(*Engraulis japonicus*)等小型鱼类为食^[16]。江豚作为小型齿鲸类,在我国沿海水域中分布广泛,种群数量丰富^[19-20],在研究区域的食物来源主要以日本鳀、斑鲆(*Konosirus punctatus*)、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)等鱼类为主^[21]。小须鲸和江豚均已被列入世界自然保护联盟(IUCN)易危等级的水生野生动物,是我国国家级重点保护野生动物,而目前两种鲸类在獐子岛邻近海域生态系统中的营养作用

尚不明确。与此同时,近年来以主钓黄条鲷(*Seriola aureovittata*)、五条鲷(*Seriola quinqueradiata*)、蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)等大型中上层目标鱼类的休闲海钓产业在獐子岛快速发展,初步统计表明,獐子岛目前拥有各类休闲海钓船 200 余艘。休闲海钓的目标鱼类与小须鲸等共同竞争饵料生物,然而休闲垂钓等渔业方式与鲸类之间的相互作用关系目前仍尚不明确。

为此,本研究基于多年来对獐子岛海域生物资源与环境的调查数据,利用 Ecopath with Ecosim 6.6 (EWE 6.6)软件构建獐子岛邻近海域生态系统模型,定量评估鲸类在食物网中的营养作用,分析探讨鲸类与主要渔业之间的相互作用关系。研究结果旨在为加强獐子岛邻近海域鲸类资源保护与开展基于生态系统的渔业管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究地点为黄海北部獐子岛邻近海域(图 1),该区域位于 38.8°N—39.1°N、122.6°E—123.1°E 之间,面积约 1443.57 km²,平均水深 40 m,为獐子岛海洋牧场增殖区,水文主要受黄海冷水团、对马暖流的分支黄海暖流以及辽南沿岸流等影响^[22],水质条件优越,初级生产力较高。

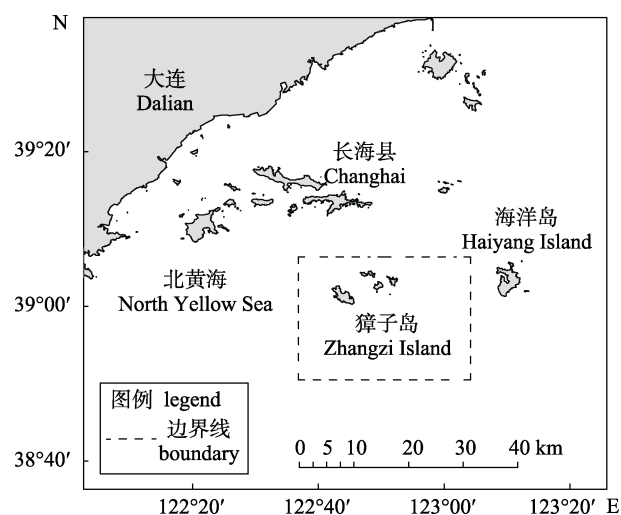


图 1 獐子岛邻近海域生态系统模型区域示意图

Fig. 1 Diagram of study area for ecosystem modeling in the adjacent waters of Zhangzi Island

1.2 模型构建

1.2.1 Ecopath 模型原理 本文通过 EWE 6.6 软件构建獐子岛邻近海域 Ecopath 模型, Ecopath 模型以能量守恒和物质平衡为原理, 量化了生态系统中各功能组间的能量流动。该模型基于 2 个核心方程^[23]。

第一个核心方程表示给定的功能组生产量等于消费量、捕捞量、净迁移量、生物量积累量和其他死亡率的总和。

$$(P/B)_i \times B_i \times EE_i = \sum_{j=1}^n (Q/B)_j \times B_j \times DC_{ji} + Y_i + BA_i + E_i \quad (1)$$

式中, B_i 和 B_j 分别表示功能组 i 和 j 的生物量; $(P/B)_i$ 代表功能组 i 的生产量与生物量的比值; EE_i 为功能组 i 的生态营养效率; $(Q/B)_j$ 代表功能组 j 的消耗量与生物量的比值; DC_{ji} 为饵料生物 i 在捕食者 j 的食物组成中所占的比例; Y_i 为功能组 i 的渔获量; BA_i 为生物量累积; E_i 为功能组 i 的净迁移量。

第二个核心方程表示每个消费群体的消费量等于生产量、呼吸量和非同化食物量之和。

$$(Q/B)_i \times B_i = (P/B)_i \times B_i + R_i + U_i \quad (2)$$

式中, R_i 为功能组 i 的呼吸量, U_i 代表功能组 i 的非同化食物量。

1.2.2 功能组划分 本研究根据獐子岛邻近海域报道出现的主要海洋生物种类, 将具有相似生态或营养特征的种类划分为同一功能组, 共划分了 31 个功能组(表 1), 基本涵盖了研究海域食物网能量流动的主要环节。考虑到部分优势种类在渔业和生态功能方面的重要作用, 将其划分为单物种功能组, 包括 2 个海洋哺乳动物群: 分别为小须鲸和江豚; 5 个硬骨鱼类群: 分别为蓝点马鲛、许氏平鲉(*Sebastes schlegelii*)、日本鳀、玉筋鱼、方氏云鲷(*Enedrias fangi*); 3 个大型无脊椎动物类群: 仿刺参(*Apostichopus japonicus*)、虾夷扇贝(*Mizuhopecten yessoensis*)、皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)(表 1)。

表 1 獐子岛邻近海域生态系统 Ecopath 模型的功能组及种类组成
Tab. 1 Functional groups and their corresponding species composition considered in the Ecopath model of the ecosystem in adjacent waters around the Zhangzi Island

编号 No.	功能组 functional group	划分依据 classification rationale	种类组成 species
1	小须鲸 <i>Balaenoptera acutorostrata</i>	海洋保护动物 marine protected animals	小须鲸 <i>Balaenoptera acutorostrata</i>
2	江豚 <i>Neophocaena asiaeorientalis sunameri</i>	海洋保护动物 marine protected animals	江豚 <i>Neophocaena asiaeorientalis sunameri</i>
3	鲨鱼 sharks	保护/生态重要类群 protected or ecologically important taxa	路氏双髻鲨 <i>Sphyrna lewini</i> 、皱唇鲨 <i>Triakis scyllium</i> 、噬人鲨 <i>Carcharodon carcharias</i>
4	海鸟 seabirds	保护/生态重要类群 protected or ecologically important taxa	海鸥 <i>Larus canus</i>
5	鲷鱼 yellowtail	休闲渔业目标种 targets of recreational fisheries	黄条鲷 <i>Seriola aureovittata</i> 、五条鲷 <i>Seriola quinqueradiata</i>
6	许氏平鲉 <i>Sebastes schlegelii</i>	休闲渔业目标种 targets of recreational fisheries	许氏平鲉 <i>Sebastes schlegelii</i>
7	六线鱼 greenling	休闲渔业目标种 targets of recreational fisheries	大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i> 、斑头鱼 <i>Hexagrammos agrammus</i>
8	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	重要饵料鱼类 important forage fish	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>
9	玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>	重要饵料鱼类 important forage fish	玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>
10	中上层浮游动物食性鱼类 pelagic zooplanktivores fishes	聚合功能组 aggregated functional group	鲈 <i>Scomber japonicus</i> 、斑鲷 <i>Konosirus punctatus</i> 、沙氏下鱈鱼 <i>Hyporhamphus sajori</i> 、青鳞小沙丁 <i>Sardinella zunasi</i> 、银鲱 <i>Pampus argenteus</i>
11	蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	休闲渔业目标种 targets of recreational fisheries	蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>
12	方氏云鲷 <i>Enedrias fangi</i>	重要饵料鱼类 important forage fish	方氏云鲷 <i>Enedrias fangi</i>

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

编号 No.	功能组 functional group	划分依据 classification rationale	种类组成 species
13	底层底栖生物食性鱼类 demersal benthivores fishes	聚合功能组 aggregated functional group	细纹狮子鱼 <i>Liparis tanakae</i> 、石鲈 <i>Platichthys bicoloratus</i> 、棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i> 、大头鳕 <i>Gadus macrocephalus</i> 、白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i> 、孔鲷 <i>Raja porosa</i> 、高眼鲈 <i>Cleisthenes herzensteini</i> 、钝吻黄盖鲈 <i>Pseudopleuronectes yokohamae</i> 、绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys kumu</i> 、红鳍东方鲀 <i>Takifugu rubripes</i> 、绿鳍马面鲀 <i>Thamnaconus modestus</i> 、缝鲷 <i>Azuma emmion</i> 、小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>
14	底层游泳生物食性鱼类 demersal piscivores fishes	聚合功能组 aggregated functional group	带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i> 、黄鲛鳕 <i>Lophius litulon</i> 、褐牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i> 、星康吉鳗 <i>Conger myriaster</i> 、绒杜父鱼 <i>Hemitripterus villosus</i>
15	大型头足类 large cephalopods	聚合功能组 aggregated functional group	短蛸 <i>Octopus ocellatus</i> 、长蛸 <i>Octopus variabilis</i> 、金乌贼 <i>Sepia esculenta</i>
16	其他头足类 other cephalopods	聚合功能组 aggregated functional group	日本枪乌贼 <i>Loligo japonica</i>
17	蟹类 crabs	聚合功能组 aggregated functional group	三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i> 、日本蟳 <i>Charybdis japonica</i> 、泥脚隆背蟹 <i>Carcinoplax vestita</i> 、隆背黄道蟹 <i>Cancer gibbosulus</i> 、寄居蟹 <i>Paguridae</i> 、枯瘦突眼蟹 <i>Oregonia gracilis</i> 、四齿矶蟹 <i>Pugettia quadridens</i>
18	虾类 shrimps	聚合功能组 aggregated functional group	鹰爪虾 <i>Trachypenaeus curvirostris</i> 、中国明对虾 <i>Fenneropenaeus chinensis</i> 、口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i> 、脊腹褐虾 <i>Crangon affinis</i> 、戴氏赤虾 <i>Metapenaeopsis dalei</i> 、细巧仿对虾 <i>Parapenaeopsis tenella</i> 、太平洋磷虾 <i>Euphausia pacifica</i> 、细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>
19	腹足类 gastropoda	聚合功能组 aggregated functional group	脉红螺 <i>Rapana venosa</i> 、香螺 <i>Neptunea arthritica</i> 、皮氏蛾螺 <i>Buccinum perryi</i>
20	仿刺参 <i>Apostichopus japonicus</i>	增殖目标种 group for enhancement	仿刺参 <i>Apostichopus japonicus</i>
21	皱纹盘鲍 <i>Haliotis discus hannai</i>	增殖目标种 group for enhancement	皱纹盘鲍 <i>Haliotis discus hannai</i>
22	虾夷扇贝 <i>Mizuhopecten yessoensis</i>	增殖目标种 group for enhancement	虾夷扇贝 <i>Mizuhopecten yessoensis</i>
23	海胆 sea urchin	增殖目标种 group for enhancement	海刺猬 <i>Glyptocidaris crenularis</i> 、光棘球海胆 <i>Mesocentrotus nudus</i> 、虾夷马粪海胆 <i>Strongylocentrotus intermedius</i>
24	软体动物 mollusc	聚合功能组 aggregated functional group	紫贻贝 <i>Mytilus edulis</i> 、栉孔扇贝 <i>Chlamys farreri</i> 、菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i> 、加州扁鸟蛤 <i>Clinocardium californiense</i> 、薄索足蛤 <i>Thyasira tokunagai</i> 、江户明樱蛤 <i>Moerella jedoensis</i> 、东方缝栖蛤 <i>Hiatella orientalis</i>
25	海星 starfish	聚合功能组 aggregated functional group	海燕 <i>Asterinidae pectinifera</i> 、罗氏海盘车 <i>Asierias rollestoni</i> Bell、多棘海盘车 <i>Asterias amurensis</i> 、陶氏太阳海星 <i>Solaster dawsoni</i> Verrill、砂海星 <i>Luidia quinaria</i>
26	蛇尾 brittle star	聚合功能组 aggregated functional group	紫蛇尾 <i>Ophiopholis mirabilis</i> 、浅水萨氏真蛇尾 <i>Ophiura sarsii vadicola</i> 、司氏盖蛇尾 <i>Siegophiura sladeni</i> 、马氏刺蛇尾 <i>Ophrothrix marenzelleri</i> 、日本倍棘蛇尾 <i>Amphioplus japonicus</i>
27	其他底栖动物 other benthos	聚合功能组 aggregated functional group	多毛类 Polychaete、端足类 Amphipoda、介形类 Ostracoda、枝角类 Cladocera
28	浮游动物 zooplankton	次级生产力 secondary productivity	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i> 、小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> 、强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> 、拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i> 、短角长腹剑水蚤 <i>Oithona brevicornis</i> 、克氏纺锤水蚤 <i>Acartia clausii</i>

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

编号 No.	功能组 functional group	划分依据 classification rationale	种类组成 species
29	底栖藻类和海草 benthic algae and seagrass	初级生产力 primary productivity	鼠尾藻 <i>Sargassum thunbergii</i> 、孔石莼 <i>Ulva pertusa</i> 、鳗草 <i>Zostera marina</i> 、海带 <i>Laminaria japonica</i> 、裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i> <i>Suringar</i> 、海黍子 <i>Sargassum miyabei</i> 、羊栖菜 <i>Hizikia fusiforme</i>
30	浮游植物 phytoplankton	初级生产力 primary productivity	硅藻 Bacillariophyta、甲藻 Pyrrophyta
31	有机碎屑 detritus	能量循环 energy cycle	有机碎屑 detritus

1.2.3 模型参数化 以下 Ecopath 模型中所用数据的样品采集与分析均按《海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)执行^[24]。其中鱼类以及大型无脊椎动物生物量主要来自 2022—2023 年间进行的渔业资源与生态环境调查数据, 非礁区采用拖网方式, 利用扫海面积法估算, 礁区内采用潜水样方结合地笼网等方式进行估算。底栖动物生物量通过抓斗式采泥器采样估算获得, 鲸类生物量根据长海县当地海洋哺乳动物保护研究人员长期观测结果估算所得, 浮游植物生物量通过调查所得叶绿素 a 含量进行转化^[25], 碎屑生物量根据 Pauly 等^[26]提出的线性模型进行计算, 其余功能组中鲨鱼和海鸟生物量参考邻近海域模型及相关生物丰度报道文献^[27]进行估算。

模型中鱼类 P/B 值及 Q/B 值由经验公式计算获得^[28-29], 其中鱼类 P/B 值等于总瞬时死亡率 Z , 即捕捞死亡率与自然死亡率之和, Q/B 值根据鱼鳍外形比多元回归模型计算。大型底栖无脊椎动物 P/B 值根据 Bery^[30]经验公式进行估算。其余功能组 P/B 、 Q/B 值参考当地及邻近生态特征相似海域文献获得^[31-35]。

功能组中鲸类食性数据基于长海县本地研究人员的长期观测并结合该区域前期进行的胃含物分析研究以及稳定同位素估算的食性分析结果输入^[21,36], 鱼类的食性数据依据采样生物的胃含物分析进行, 其他生物食性信息则主要来源于当地及邻近生态特征相似海域中物种食性分析的相关研究^[37-41]。

该海域渔业方式主要包括休闲垂钓、潜水捕捞、虾夷扇贝拖网和中上层拖网等, 其中休闲垂钓数据通过实地调研进行估算, 其余渔业方式渔获量数据来自长海渔业统计年鉴。

1.3 模型质量调控

在模型平衡前, 采用预平衡(PREBAL)诊断分析评价输入数据的有效性。PREBAL 诊断提供了一系列参数调优技术分析各功能组生物量、生产量和消费量与营养级之间的斜率关系^[42]。根据 PREBAL 诊断原则, 模型生物量估计值应跨越 5~7 个数量级, >7 表示分类或年龄结构组过多, <5 表示模型过于关注某些特定的营养级^[42]。此外, 在所有按营养级排列的类群中, 生物量(在对数尺度上)的斜率应随营养级的增加而下降 5%~10%, 且 P/B 和 Q/B 比值同样应在较高营养级处降低^[42]。经过 PREBAL 诊断后, 初步得到一个符合生态和渔业原理的 Ecopath 模型。在对模型进行平衡检验时, 须遵循热力学和生态学规律^[43], 模型应实现生态营养效率(EE)值小于 1, 生产量与消费量(P/Q)的比值应在 0.1 至 0.3 之间, 即大多数群体的消费量大约是其生产量的 3~10 倍, 且呼吸与同化(R/A)比值小于 1。最后使用 Pedigree 指数分析 Ecopath 模型输入参数的不确定性, 进而对模型质量进行整体评价。

1.4 数据处理及生态网络指标分析

基于生态网络分析指标探讨獐子岛邻近海域鲸类与渔业之间的相互作用关系。鲸类动物与渔业的生态指标包括:

关键种主要运用 Libralato 等^[44]提出的判定理论, 将关键类群归因于既具有高整体效果又具有低生物量比例的功能组。采用 Ecopath 模型中的混合营养影响指数和关键度指数来识别生态系统中的关键种。

混合营养影响(mixed trophic impact analysis, MTI)是基于敏感性分析下, 水域生态系统各功能组之间生物量的轻微增加对其他功能组的相对影

响^[45]。混合营养影响表示如下:

$$MTI_{ij}=DC_{ij}-FC_{ji} \quad (3)$$

式中, MTI_{ij} 为被影响的功能组 i 与影响功能组 j 的交互作用; DC_{ij} 为功能组 j (作为被捕食者) 在功能组 i (作为捕食者) 食物中的比例; FC_{ji} 为一个宿主成分项, 表示功能组 i 作为捕食者占功能组 j 被捕食的比例。

功能组 j 的总体混合影响(ε_j)表示如下:

$$\varepsilon_j = \sqrt{\sum_{i \neq j}^n MTI_{ji}^2} \quad (4)$$

功能组 j 的关键度指数(KS_j)根据以下公式计算:

$$KS_j = \log_{10}[\varepsilon_j(1-p_j)] \quad (5)$$

式中, p_j 为功能组 j 的生物量占全食物网生物量的比例。

生态位重叠指数(niche overlap index, O_{jk})是根据 Pianka^[46]所提出公式估算, 并将渔业作为捕食者评估鲸类与渔业之间的重叠水平^[47]。

$$O_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ji} \times P_{ki}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{ji}^2 \times P_{ki}^2)}} \quad (6)$$

式中, P_{ji} 和 P_{ki} 分别是鲸类功能组 j 和渔业 k 利用资源功能组 i 的比例, 其值位于 0~1 之间, 0 表示二者之间资源不重叠, 1 表示资源完全重叠。

此外, 采用 R 程序中的 ggplot2 和 ggalluvial

程序包分析了饵料生物流向鲸类的消费流量, 并比较了渔业与鲸类之间获取渔获物与饵料生物的消费流量。

2 结果与分析

2.1 模型质量评估

獐子岛邻近海域食物网模型 Pedigree 指数值为 0.56, 通过 PREBAL 预平衡诊断, 该生态系统中物种生物量量级跨度为 6 个数量级, 生物量从最高到最低营养级的斜率在对数尺度上下降 7.4%, P/B 值和 Q/B 值随着营养级升高呈下降趋势。热力学一致性定律检验表明, R/A 值在低营养级处相对较低, 但在顶级捕食者处接近 1, 且各营养级间呈正斜率分布。 P/Q 值除低生长率的小鳊鲸、江豚及海鸟外均位于 0.1~0.3 之间, 该模型符合热力学限制。

2.2 食物网特征及鲸类在食物网中的作用

Ecopath 模型输入和输出参数如表 2 所示, 该海域各功能组的营养级分布在 1.00~4.24 之间, 其中江豚及鲨鱼的营养级分别为 4.24、4.21, 为该食物网中的顶级捕食者。小鳊鲸的营养级相对较低 (trohic level, $TL=3.74$)。獐子岛邻近海域食物网如图 2 所示, 该生态系统中生物量及总流通量分布在 4 个营养级, 主要包括以浮游植物、底栖藻类和海草为初级生产者的牧食食物链以及以碎屑为主的碎屑食物链。

表 2 獐子岛邻近海域生态系统 Ecopath 模型功能组估算参数

Tab. 2 Estimated parameters of the Ecopath model functional groups of Zhangzi Island adjacent waters ecosystem

编号 No.	功能组 functional group	营养级 TL	生物量/ (t/km ²) biomass	生产量/ 生物量 P/B	消费量/ 生物量 Q/B	渔获量/ [t/(km ² ·a)] catch	生态营 养效率 EE
1	小鳊鲸 <i>Balaenoptera acutorostrata</i>	3.74	0.039	0.04	8.14	—	0.000
2	江豚 <i>Neophocaena asiaeorientalis sunameri</i>	4.24	0.022	0.02	13.11	—	0.000
3	鲨鱼 sharks	4.21	0.002	0.59	5.20	—	0.000
4	海鸟 seabirds	4.10	0.001	0.06	67.02	—	0.000
5	鳊鱼 yellowtail	4.12	0.393	0.70	2.50	0.163	0.593
6	许氏平鲉 <i>Sebastes schlegelii</i>	4.01	0.187	1.42	5.70	0.032	0.231
7	六线鱼 greenling	3.53	0.520	1.20	4.50	0.046	0.277
8	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	3.13	1.470	2.86	11.39	0.477	0.712
9	玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>	3.05	1.370	2.10	15.50	0.425	0.689
10	中上层浮游动物食性鱼类 pelagic zooplanktivores fishes	3.15	2.140	1.80	13.97	0.310	0.518
11	蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	3.98	0.590	1.15	5.50	0.153	0.268

(待续 to be continued)

(续表 2 Tab. 2 continued)

编号 No.	功能组 functional group	营养级 TL	生物量/ (t/km ²) biomass	生产量/ 生物量 P/B	消费量/ 生物量 Q/B	渔获量/ [t/(km ² ·a)] catch	生态营 养效率 EE
12	方氏云鳚 <i>Enedrias fangi</i>	3.15	0.950	3.26	18.10	—	0.463
13	底层底栖生物食性鱼类 demersal benthivores fishes	3.49	0.760	2.50	8.90	0.011	0.657
14	底层游泳生物食性鱼类 demersal piscivores fishes	4.02	0.250	0.87	3.00	0.015	0.190
15	大型头足类 large cephalopods	3.69	0.487	3.00	10.75	—	0.168
16	其他头足类 other cephalopods	3.34	0.525	3.50	15.00	—	0.467
17	蟹类 crabs	2.79	2.550	6.00	22.80	—	0.518
18	虾类 shrimps	2.56	3.138	9.80	34.00	—	0.830
19	腹足类 Gastropoda	2.45	0.780	6.00	27.00	0.380	0.767
20	仿刺参 <i>Apostichopus japonicus</i>	2.09	0.642	0.60	3.36	0.310	0.805
21	皱纹盘鲍 <i>Haliotis discus hannai</i>	2.04	0.520	2.20	9.90	0.230	0.683
22	虾夷扇贝 <i>Mizuhopecten yessoensis</i>	2.17	3.830	6.20	25.60	1.120	0.230
23	海胆 sea urchin	2.24	0.758	5.50	20.80	0.400	0.553
24	软体动物 molluscs	2.17	6.675	7.50	25.50	0.850	0.745
25	海星 starfish	2.45	0.560	2.20	9.50	—	0.439
26	蛇尾 brittle star	2.33	0.520	2.00	10.67	—	0.827
27	其他底栖动物 other benthos	2.05	5.200	10.50	36.00	—	0.829
28	浮游动物 zooplankton	2.05	7.520	37.50	160.10	—	0.691
29	底栖藻类和海草 benthic algae and seagrass	1.00	179.530	10.00	—	—	0.036
30	浮游植物 phytoplankton	1.00	20.253	78.50	—	—	0.609
31	碎屑 detritus	1.00	130.000	—	—	—	0.218

注: 加粗值为 Ecopath 模型估算, —表示无数值。
Note: Estimated parameters by the Ecopath model are in bold, — represents no value.

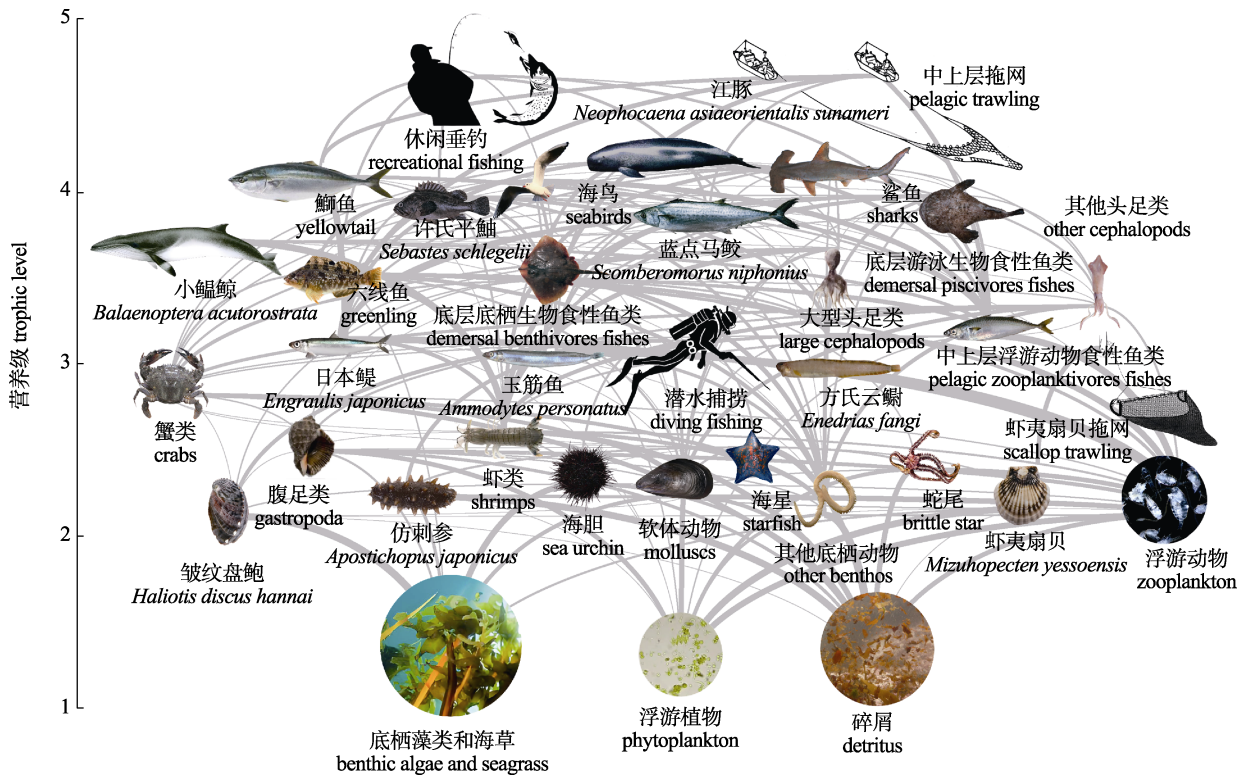


图 2 獐子岛邻近海域生态系统食物网
Fig. 2 Food web of the Zhangzi Island adjacent waters ecosystem

獐子岛邻近海域生态系统各功能组关键度指数与相对总影响值如图 3 所示,在该食物网中虾类、底层底栖生物食性鱼类、蓝点马鲛和浮游动物群体的关键度指数较高,分别为-0.05、-0.05、-0.08、-0.09,相对总影响值排在前 4 位的为虾类(1.00)、

底层底栖生物食性鱼类(0.99)、蓝点马鲛(0.93)以及浮游植物(0.93),由于虾类具有最高的关键度指数和相对总影响值,因此将其判定为该食物网中的关键类群。而鲸类动物中江豚的关键度指数(-0.53)和相对总影响值(0.33)均高于小鳁鲸(-0.82、0.17)。

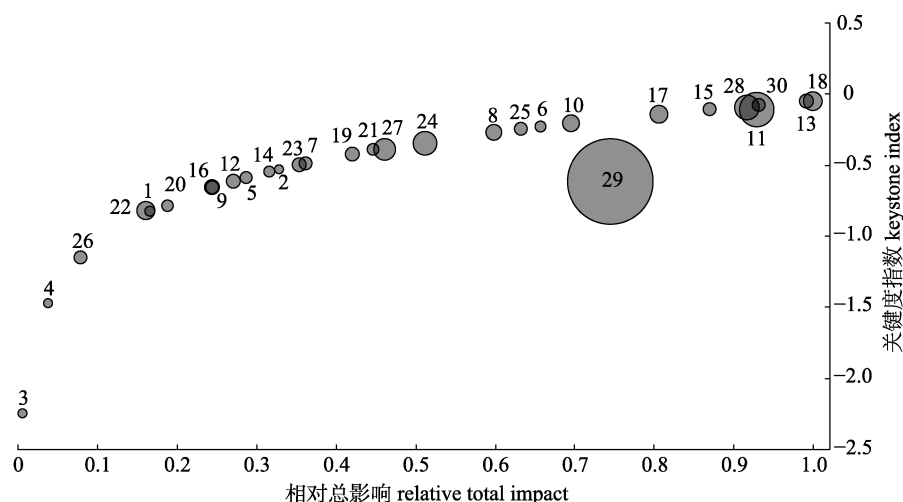


图 3 獐子岛邻近海域生态系统关键度指数分布图

图中数字 1~30 表示功能组编号,各功能组详细信息见表 1。圆圈大小与生物量成正比。

Fig. 3 Distribution of the keystone index in the adjacent waters ecosystem of Zhangzi Island

Integers 1–30 represent the identification number of biological functional groups in the bait of cetacean. Detailed information of corresponding groups can be found in Tab. 1. The size of the circle is proportional to the biomass of functional groups.

獐子岛邻近海域食物网中鲸类动物的消费量占食物网总消费量的不到 1%,其中小鳁鲸及江豚对饵料生物的消费量占比分别为 52%和 48%。小鳁鲸主要摄食虾类(78%)和中上层浮游动物食性鱼类(12%),江豚则对中上层浮游动物食性鱼类(20%)、日本鳁(18%)、底层底栖生物食性鱼类(12%)、大型头足类(10%)以及玉筋鱼(10%)的消费量较高(图 4)。

MTI 分析表明,鲸类对食物网中所有功能组共造成 33.8%的积极影响和 66.2%的消极影响,江豚表现出最高的积极和消极影响,分别为 22.6%和 40.7%,其中江豚对第 III 营养级的影响最为强烈,分别表现出 14.5%的积极影响和 22.2%的消极影响。此外,小鳁鲸与江豚对第 IV 和第 III 营养级的消极影响均大于积极影响(图 5)。

2.3 渔业对獐子岛邻近海域食物网的影响

獐子岛邻近海域总渔获量为 4.922 t/(km²·a),其中中上层拖网渔获量占总渔获量约 27.6%,主

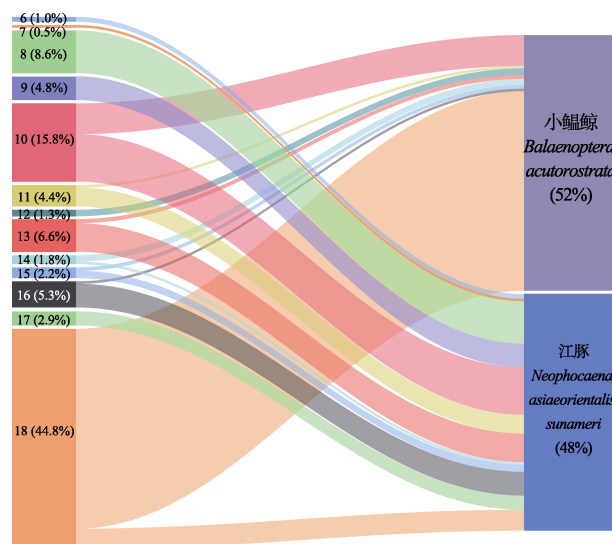


图 4 饵料生物流向鲸类的消费流量

左侧数字 6~18 代表鲸类饵料生物功能组编号,各功能组详细信息见表 1。

Fig. 4 Consumption flow of bait organisms to cetaceans
Integers 6–18 represent the identification number of biological functional groups in the bait of cetacean, and please find detailed information of corresponding groups in Tab. 1.

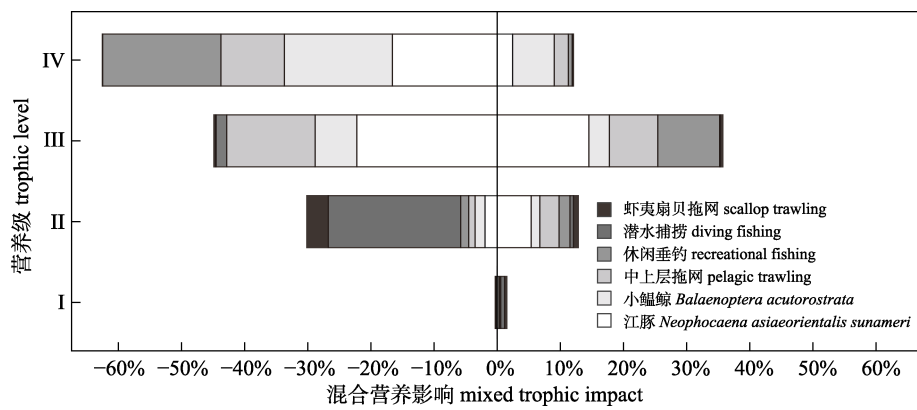


图 5 鲸类及渔业对各营养级功能组影响
Fig. 5 Effects of cetaceans and fisheries on trophic functional groups

要以日本鳁、鲈等中上层鱼类为主，潜水捕捞渔获量占比最大(44.1%)，主要以采捕仿刺参(6.3%)、皱纹盘鲍(4.7%)以及海胆(8.1%)等海珍品为主，休闲垂钓渔获量占总渔获量的 5.5%，主要渔获物为黄条鲷、五条鲷以及蓝点马鲛等，虾夷扇贝拖网采捕占总渔获量的 22.8%。总渔获物平均营养级为 2.57，其中休闲垂钓的渔获物平均营养级最高为 3.75，潜水捕捞平均营养级最低为 2.21，而中上层拖网渔获物平均营养级为 3.24。

渔业对獐子岛邻近海域食物网中各功能组共造成 28.3%的积极影响和 71.7%的消极影响，这些消极影响主要来源于中上层拖网(25.2%)、休闲

垂钓(21.8%)以及潜水捕捞(21.1%)，其中中上层拖网的消极影响主要集中在营养级 IV 和 III，分别为 10%和 14%，而休闲垂钓对营养级 IV 的消极影响最大(18.8%)，潜水捕捞的消极影响主要在第 II 营养级(21%)(图 5)。

2.4 鲸类与渔业的相互作用及对食物网的影响

小鳁鲸及江豚与总渔业之间的生态位重叠指数分别为 0.03 和 0.33，鲸类与各渔业方式之间的生态位重叠指数在江豚与中上层拖网之间值最高为 0.75，其次为江豚与休闲垂钓之间的生态位重叠指数 0.42，而潜水捕捞及虾夷扇贝拖网与鲸类之间均未产生资源重叠(表 3)。

表 3 獐子岛邻近海域鲸类动物与渔业之间生态位重叠指数
Tab. 3 Niche overlap index between cetaceans and fisheries in the adjacent waters of Zhangzi Island

功能组 functional group	总船队 overall fleet	中上层拖网 pelagic trawling	休闲垂钓 recreational fishing	潜水捕捞 diving fishing	虾夷扇贝拖网 scallop trawling
小鳁鲸 <i>Balaenoptera acutorostrata</i>	0.03	0.06	0.08	0.00	0.00
江豚 <i>Neophocaena asiaeorientalis sunameri</i>	0.33	0.75	0.42	0.00	0.00

在鲸类摄食饵料生物的消费量和渔业捕捞物种的渔获量中，潜水捕捞与中上层拖网占总消费流量的比值最高，分别为 39.2%和 24.5%，而休闲垂钓、小鳁鲸以及江豚的消费量及渔获量占比均在 5%左右，鲸类摄食饵料生物的总消费量远低于总渔获量(图 6)。

MTI 分析显示，对獐子岛邻近海域食物网造成最大消极影响的是中上层拖网(30.8%)，其次为休闲垂钓(26.7%)、潜水捕捞(25.9%)和江豚(7.5%)，

小鳁鲸(4.7%)及虾夷扇贝拖网(4.4%)对该食物网造成的消极影响最低(图 6)。

3 讨论

3.1 鲸类在食物网中的作用

本研究基于 Ecopath 模型估算的江豚营养级为 4.24，为该食物网中的顶级捕食者，而小鳁鲸营养级为 3.74。两者营养级均略高于以往全球范围内齿鲸类及须鲸类物种营养级的平均估计值

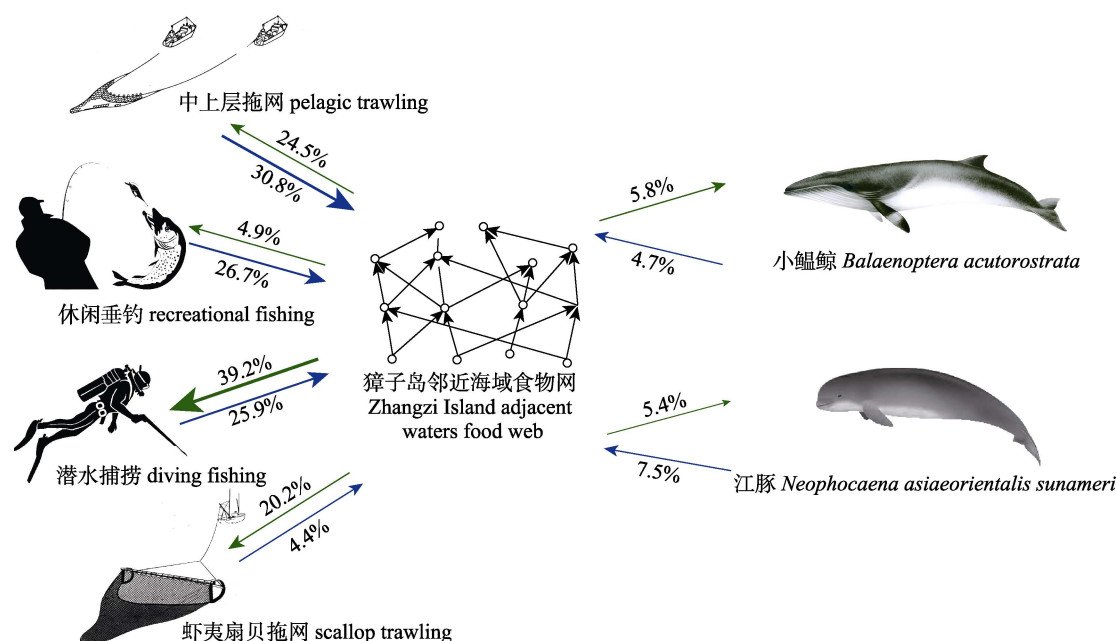


图 6 鲸类与渔业在獐子岛邻近海域食物网中的消费流量(绿色)与消极混合影响(蓝色)分析

Fig. 6 Analysis of consumption flow (green) and negative impact (blue) of cetaceans and fisheries in the food web of Zhangzi Island adjacent waters

(4.23、3.35)^[48], 以及田甲申等^[49]采用稳定同位素技术估算的大连海域同样两种鲸类的营养级结果(4.11、3.16)。这种差异可能反映了两种营养级估算方法的不同, 本研究中 Ecopath 模型主要基于胃含物分析获得的瞬时摄食信息, 而稳定同位素分析则反映了目标生物一段时间内的平均营养信息。另外, 本研究中鲸类的高营养级值也可能与研究海域内日本鳁、玉筋鱼以及磷虾类等多样的饵料生物的组成动态有关。

在獐子岛邻近海域食物网中, 江豚作为顶级捕食者, 参与了该食物网中的主要营养途径, 主要影响中上层鱼类以及营养级 III 和 IV 的类群, 较高的关键度指数也表明其可能通过直接摄食或间接营养作用对食物网内的关键能量环节如参与“蜂腰”控制的物种日本鳁等产生重要影响^[27]。此外, 该食物网中江豚的关键度指数也高于小鳁鲸, 这表明不同海洋哺乳动物的营养影响取决于其在食物网中的所处的位置。Haro 等^[50]对麦哲伦海峡座头鲸(*Megaptera novaeangliae*)的营养作用模拟表明, 须鲸科物种的营养影响相对于顶级捕食者如齿鲸类的影响较低。综合关键度指数及相对总影响分析, 顶级捕食者江豚在该食物网中发挥着

自上而下的控制作用, 维持着生态系统的健康与稳定。江豚和小鳁鲸在生态系统中的营养作用, 除体现在直接捕食和营养级联效应外, 体型相对较大的小鳁鲸通过水体垂直运动将深层水体中的营养物质带到表层水域, 促进了水体中能量的垂直交换以及初级生产力的改变, 另外鲸类死亡后产生的“鲸落效应”也是对海洋底层生态系统物质和能量循环的重要作用过程。

3.2 鲸类与渔业的相互作用

与以往研究发现相似^[47,51], 獐子岛邻近海域鲸类饵料生物与该地区渔业开发资源之间的重叠程度总体较低。其中, 江豚的摄食与中上层拖网和休闲垂钓的资源利用重叠度较高, 这是由于中上层拖网的主要渔获物为小型中上层饵料鱼类, 同时休闲垂钓的目标鱼种也以中上层鱼类为主。江豚作为顶级捕食者, 摄食范围较广且主要集中在中上层食物链^[21], 因此与这两种渔业方式在资源利用上存在较高重叠, 这与 Bearzi 等^[52]对地中海拖网渔业与短吻真海豚(*Delphinus delphis*)及宽吻海豚(*Tursiops truncatus*)摄食之间的重叠度指数的观察结果一致, 均是因为鲸类摄食与渔业开发在区域上重叠。相比之下, 小鳁鲸除摄食小型

鱼类外, 主要以大型浮游动物如太平洋磷虾为食, 因此与中上层拖网和休闲垂钓的资源竞争程度较低。此外, 潜水捕捞以及虾夷扇贝拖网与鲸类之间并未产生资源重叠, 这是由于两种渔业方式主要采捕第 II 营养级中的仿刺参、虾夷扇贝等海珍品, 与海洋哺乳动物的摄食范围无直接竞争关系。此前研究表明, 海洋哺乳动物群体摄食的食物中, 仅有约 1% 来自与渔业有明显空间重叠的区域, 而超过 85% 的渔业渔获量来自二者重叠度较低的区域^[53], 这进一步表明鲸类摄食与渔业开发之间的总体重叠程度较低。

通过综合考虑消费流量和混合营养效应, 在鲸类和渔业对食物网造成的影响中, 鲸类的总消费量远低于渔业的渔获量, 且渔业对食物网的消极影响显著高于鲸类, 这表明渔业开发对獐子岛邻近海域食物网的影响远高于鲸类摄食的影响, 其中中上层拖网是渔业中对该食物网造成最大消极影响的捕捞方式。总体而言, 獐子岛邻近海域鲸类的摄食对渔业的影响较小, 不会导致该海域渔业资源量的大幅下降, 相反, 渔业开发对食物网的负面影响可能导致鲸类的饵料生物减少, 进而对鲸类的生存产生不利影响。Morissette 等^[51]通过对加勒比海鲸类与渔业相互作用的模拟研究表明, 在鲸类数量下降的生态系统中, 重要商业鱼种的生物量并不会大幅增加, 而在某些情况下, 鲸类的存在将会导致渔业产量的提高, 这是由于鲸类不仅摄食商业鱼种, 还会摄食其捕食者, 从而降低商业鱼种的被捕食压力, 间接对渔业产生积极影响^[54], 这一特征也证明了为何当顶级捕食者从食物网中移除后, 其首选饵料生物的数量并不一定会增加。然而, 当渔业资源被过度捕捞时, 鲸类与渔业之间的竞争可能加剧, 这不仅威胁鲸类的生存, 还可能破坏海洋生态系统的功能完整性^[55]。为此, 对獐子岛邻近海域渔业的开发管理, 应从生态系统的角度出发, 既要考虑关键类群的资源保护, 同时也要合理控制捕捞强度, 实现两者之间的有效权衡。通过历年来对獐子岛及其邻近海域的研究发现, 该海域生态系统的成熟度及稳定性正逐渐增强^[34,56], 这可能与鲸类数量的增加及其对食物网自上而下的控制作用增强有关,

Apollonio^[57]曾研究指出, 具有长寿命的 K 选择者鲸类能够通过调控捕食、初级生产力等因素为生态系统的稳定性提供支撑。因此, 鲸类不应被视为渔业的竞争者, 而应将其看作衡量生态系统健康的重要指标和当地海洋生物多样性的关键组成部分。

参考文献:

- [1] Cook D, Malinauskaite L, Davíðsdóttir B, et al. Reflections on the ecosystem services of whales and valuing their contribution to human well-being[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 186: 105100.
- [2] Farella G, Menegon S, Fadini A, et al. Incorporating ecosystem services conservation into a scenario-based MSP framework: An Adriatic case study[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 193: 105230.
- [3] Spitz J, Ridoux V, Trites A W, et al. Prey consumption by cetaceans reveals the importance of energy-rich food webs in the Bay of Biscay[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 166: 148-158.
- [4] Ricci P, Manea E, Cipriano G, et al. Addressing cetacean-fishery interactions to inform a deep-sea ecosystem-based management in the gulf of Taranto (northern Ionian Sea, central Mediterranean Sea)[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(8): 872.
- [5] Hamilton S, Baker G B. Technical mitigation to reduce marine mammal bycatch and entanglement in commercial fishing gear: Lessons learnt and future directions[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2019, 29(2): 223-247.
- [6] Díaz López B. "Hot deals at sea": Responses of a top predator (Bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*) to human-induced changes in the coastal ecosystem[J]. *Behavioral Ecology*, 2019, 30(2): 291-300.
- [7] Savoca M S, Kumar M, Sylvester Z, et al. Whale recovery and the emerging human-wildlife conflict over Antarctic krill[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 7708.
- [8] Morissette L, Christensen V, Pauly D. Marine mammal impacts in exploited ecosystems: Would large scale culling benefit fisheries?[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e43966.
- [9] Giralt Paradell O, Methion S, Rogan E, et al. Modelling ecosystem dynamics to assess the effect of coastal fisheries on cetacean species[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112175.
- [10] Long R D, Charles A, Stephenson R L. Key principles of marine ecosystem-based management[J]. *Marine Policy*, 2015, 57: 53-60.

- [11] Jusufovski D, Saavedra C, Kuparinen A. Competition between marine mammals and fisheries in contemporary harvested marine ecosystems[J]. Marine Ecology Progress Series, 2019, 627: 207-232.
- [12] Jiang D W. Color Atlas of Marine Fish and Animals in Northern China[M]. Shenyang: Liaoning People's Publishing House, 2001. [姜大为. 中国北方海水鱼及海兽彩色图集[M]. 沈阳: 辽宁人民出版社, 2001.]
- [13] Qu F Y, Li S Y, Zhao L L, et al. Conservation gap analysis for the Yellow Sea ecoregion[J]. Biodiversity Science, 2021, 29(3): 385-393. [曲方圆, 李淑芸, 赵林林, 等. 黄海生态区保护空缺分析[J]. 生物多样性, 2021, 29(3): 385-393.]
- [14] Li Y T, Cheng Z L, Zuo T, et al. Distribution and abundance of the East Asian finless porpoise in the coastal waters of Shandong Peninsula, Yellow Sea, China[J]. Fishes, 2023, 8(8): 410.
- [15] Gao X G, Yu Z A, Xia Y, et al. The present situation, problems and countermeasures for sustainable development of sea fishery industry in Changhai County[J]. Fishery Information & Strategy, 2020, 35(4): 257-261. [高祥刚, 于佐安, 夏莹, 等. 长海县渔业现状、问题及可持续发展对策[J]. 渔业信息与战略, 2020, 35(4): 257-261.]
- [16] Wang P L. Studies on the baleen whales in the Yellow Sea[J]. Acta Zoologica Sinica, 1978, 24(3): 269-277. [王丕烈. 黄海须鲸类的研究[J]. 动物学报, 1978, 24(3): 269-277.]
- [17] Wang P L. Preliminary exploration of *Balaenoptera edeni* edeni population distribution in surrounding waters of Weizhou Island based on environmental DNA[J]. Chinese Journal of Zoology, 1984, 19(6): 52-56. [王丕烈. 中国近海鲸类的分布[J]. 动物学杂志, 1984, 19(6): 52-56.]
- [18] Song K J. Current stock situation and measures for the management and conservation of minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) in Korean waters[J]. Ocean & Coastal Management, 2016, 119: 164-168.
- [19] Wang P L. Chinese Cetaceans[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. [王丕烈. 中国鲸类[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.]
- [20] Wang P L, Xiang F C, Liu X S. A study on finless porpoise from Bohai Sea and Yellow Sea[J]. Fisheries Science, 1989, 8(4): 17-22. [王丕烈, 项福椿, 刘锡山. 黄渤海江豚的调查研究[J]. 水产科学, 1989, 8(4): 17-22.]
- [21] Lu Z C, Tian J S, Wang Z H, et al. Using stable isotope technique to study feeding habits of the finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 69-76. [鹿志创, 田甲申, 王召会, 等. 应用碳氮稳定同位素技术研究江豚(*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*)食性[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 69-76.]
- [22] Zang L. The research of biogenic elements' seasonal characteristics in the north Yellow Sea and the contribution of the north Yellow Sea cold water mass[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [臧璐. 北黄海生源要素的季节特征及冷水团对其影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
- [23] 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.
- [24] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2007. [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. 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, 2007]
- [25] Wang R, Li C L, Wang K, et al. Feeding activities of zooplankton in the Bohai Sea[J]. Fisheries Oceanography, 1998, 7(3-4): 265-271.
- [26] Pauly D, Soriano-Bartz M L, Palomares M L. Improved construction, parametrization and interpretation of steady-state ecosystem models[C]// James A E, Daniel P D, Douglas F D, et al. Trophic models of aquatic ecosystems. Kuwait: ICLARM Conference Proceedings, 1993: 1-13.
- [27] Lin Q, Jin X S, Zhang B. Trophic interactions, ecosystem structure and function in the southern Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(1): 46-58.
- [28] Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks[J]. Journal Du Conseil, 1980, 39(2): 175-192.
- [29] Palomares M L D, Pauly D. Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity[J]. Marine and Freshwater Research, 1998, 49(5): 447.
- [30] Brey T. Estimating productivity of macrobenthic invertebrates from biomass and mean individual weight[J]. Meeresforsch, 1990, 32: 329-343.
- [31] Bentley J W, Serpetti N, Heymans J J. Investigating the potential impacts of ocean warming on the Norwegian and Barents Seas ecosystem using a time-dynamic food-web model[J]. Ecological Modelling, 2017, 360: 94-107.
- [32] Lee S I, Zhang C I. Evaluation of the effect of marine ranching activities on the tongyeong marine ecosystem[J]. Ocean Science Journal, 2018, 53(3): 557-582.

- [33] Yin J, Xue Y, Xu B D, et al. Potential impacts of ocean warming on energy flow and fisheries production in an overexploited ecosystem: Implication for effective fisheries management[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111433.
- [34] 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. [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.]
- [35] Wu Z X, Zhang X M, Zhang L, et al. Predicting the ecological carrying capacity of the Lidao artificial reef zone of Shandong Province for the sea cucumber, *Apostichopus japonicus*, (Selenck) and the abalone, *Haliotis discus Hannai*, using a linear food web model[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(2): 327-337. [吴忠鑫, 张秀梅, 张磊, 等. 基于线性食物网模型估算荣成俚岛人工鱼礁区刺参和皱纹盘鲍的生态容纳量[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(2): 327-337.]
- [36] Song K J, Zhang C I. Stomach contents of bycaught minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) in Korean waters[J]. *Marine Biology Research*, 2014, 10(4): 400-406.
- [37] Yang J M. A study on food and trophic levels of Baohai Sea fish[J]. *Modern Fisheries Information*, 2001, 16(10): 10-19. [杨纪明. 渤海鱼类的食性和营养级研究[J]. *现代渔业信息*, 2001, 16(10): 10-19.]
- [38] Sui H Z, Xue Y, Li Y K, et al. Feeding ecology of Japanese Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) along the eastern coastal waters of China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(8): 98-107.
- [39] Yang J M. A study on food and trophic levels of Bohai Sea invertebrates[J]. *Modern Fisheries Information*, 2001, 16(9): 8-16. [杨纪明. 渤海无脊椎动物的食性和营养级研究[J]. *现代渔业信息*, 2001, 16(9): 8-16.]
- [40] Peng Z R. Food source of sea urchin *Mesocentrotus nudus* and its potential predator's predation strategies[D]. Yantai: Yantai University, 2022. [彭子睿. 光棘球海胆食源组成及其潜在捕食者的捕食策略[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.]
- [41] Yu N. Study on the mechanism of quantity variations of brittle stars in the Zhangzi Island area[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2020. [于楠. 獐子岛海域蛇尾数量变动机理研究[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2020.]
- [42] Link J S. Adding rigor to ecological network models by evaluating a set of pre-balance diagnostics: A plea for PREBAL[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(12): 1580-1591.
- [43] Darwall W R T, Allison E H, Turner G F, et al. Lake of flies, or lake of fish? A trophic model of Lake Malawi[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(4): 713-727.
- [44] Libralato S, Christensen V, Pauly D. A method for identifying keystone species in food web models[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 195(3-4): 153-171.
- [45] R E Ulanowicz C J P. Mixed trophic impacts in ecosystems[J]. *Coenoses*, 1990, 5(1): 7-16.
- [46] Pianka E R. The structure of lizard communities[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 53-74.
- [47] Carlucci R, Capezzuto F, Cipriano G, et al. Assessment of cetacean-fishery interactions in the marine food web of the Gulf of Taranto (Northern Ionian Sea, Central Mediterranean Sea)[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2021, 31(1): 135-156.
- [48] Trites A W. Marine Mammal Trophic Levels and Trophic Interactions[M]//*Encyclopedia of Ocean Sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 589-594.
- [49] Tian J S, Han J B, Lu Z C, et al. The continuous trophic spectrum of food web in Dalian marine area, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 300-308. [田甲申, 韩家波, 鹿志创, 等. 大连海域食物网连续营养谱[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 300-308.]
- [50] Haro D, Sabat P, Arreguin-Sánchez F, et al. Trophic role of the humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) in the feeding area of Magellan Strait, Chile[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 109: 105796.
- [51] Morissette L, Kaschner K, Gerber L R. 'Whales eat fish'? Demystifying the myth in the Caribbean marine ecosystem[J]. *Fish and Fisheries*, 2010, 11(4): 388-404.
- [52] Bearzi G, Agazzi S, Gonzalvo J, et al. Biomass removal by dolphins and fisheries in a Mediterranean Sea coastal area: Do dolphins have an ecological impact on fisheries?[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2010, 20(5): 549-559.
- [53] Kaschner K. Modelling and mapping resource overlap between marine mammals and fisheries on a global scale [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2005.
- [54] Parsons T R. The removal of marine predators by fisheries and the impact of trophic structure[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1992, 25(1-4): 51-53.
- [55] Jennings S, Stentiford G D, Leocadio A M, et al. Aquatic food security: Insights into challenges and solutions from an analysis of interactions between fisheries, aquaculture, food safety, human health, fish and human welfare, economy and environment[J]. *Fish and Fisheries*, 2016, 17(4): 893-938.
- [56] Xu Z X, Chen Y, Tian T, et al. Structure and function of an

artificial reef ecosystem in Zhangzi Island based on Ecopath model[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2016, 31(1): 85-94. [许祯行, 陈勇, 田涛, 等. 基于 Ecopath 模型的獐子岛人工鱼礁海域生态系统结构和功能变化[J]. 大连海

洋大学学报, 2016, 31(1): 85-94.]

[57] Apollonio S. Hierarchical Perspectives on Marine Complexities: Searching for Systems in the Gulf of Maine[M]. New York: Columbia University Press, 2002.

Interactions between cetaceans and fisheries in the ecosystem of adjacent waters around Zhangzi Island

WANG Zhilin^{1,2}, WEI Xu^{1,2}, SI Liwei^{1,2}, LI Yi^{1,2}, LIU Hang^{1,2}, AN Wencong^{1,2}, ZHANG Yanchao^{1,2}, XU Longfei^{1,2}, LI Qingxia^{1,2}, GAO Dongkui^{1,2,3}, TIAN Tao^{1,2,3}, WU Zhongxin^{1,2,3*}

1. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. Center for Marine Ranching Engineering Science Research of Liaoning, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

3. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture, Ministry of Education, Dalian 116023, China

Abstract: Exploring the interactions between marine mammals and fisheries is essential for ecosystem-based fisheries management. In recent years, the conservation of fishery resources in the adjacent waters of Zhangzi Island has continuously improved, leading to a gradual increase in the number of cetaceans such as minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) and finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*). However, activities such as pelagic trawling and offshore recreational fishing continue to impact the prey resources of these cetaceans. Despite this, the broader ecological interactions between cetaceans and fisheries, particularly their roles in the food web and their impacts on the structure and function of offshore ecosystems, remain unclear. To address this gap, a food web model was developed using Ecopath for the coastal waters adjacent to the Zhangzi Island. This model allowed to assess the ecosystem's structural and functional characteristics, examine the trophic roles of cetaceans, and analyze their interactions with fisheries. The results indicated that trophic levels (TL) within the ecosystem ranged from 1.00 to 4.24, with minke whales at 3.74 and finless porpoises at the highest level (4.24). The keystone index and relative total impact of finless porpoises (−0.53 and 0.33, respectively) was greater in magnitude than those of minke whales (−0.82, 0.17). Mixed trophic impact (MTI) analysis revealed that both the minke whale and finless porpoise exerted greater negative than positive impacts on trophic levels IV and III species. Notably, the finless porpoise showed the strongest negative influence on the food web (7.5%), with particularly pronounced effects on trophic level III species (14.5% positive vs 22.2% negative impacts). Among fishing activities, pelagic trawling (30.8%) and recreational fishing (26.7%) demonstrated the highest negative impacts on the food web. In this ecosystem, cetacean consumption accounted for merely 0.3% of total species consumption, while diving fishing (39.2%) and pelagic trawling (24.5%) dominated the total consumption flows. Furthermore, niche overlap index indicated substantial resource competition between finless porpoises and pelagic trawling (0.75), whereas overlap indices between both cetaceans (minke whale: 0.03; finless porpoise: 0.33) and overall fisheries remained relatively low. Although the finless porpoise exhibited stronger interactions with fisheries, the food web impacts from cetaceans' predation were significantly lower than those caused by fishery exploitation. These findings provide valuable references for achieving coordinated management of local marine mammal conservation and fishery resources.

Key words: cetacean; ecosystem-based fisheries management; trophic interaction; resource competition; ecological niche

Corresponding author: WU Zhongxin. E-mail: wuzhongxin@dlou.edu.cn