

彭谦, 王啟芳, 宋普庆, 等. 秋季涠洲岛珊瑚礁主要鱼类营养关系的初步研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 91–104, doi:10.12284/hyxb2023128
Peng Qian, Wang Qifang, Song Puqing, et al. Preliminary study on the trophic relationship of dominant fishes in coral reefs of Weizhou Island in autumn[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(9): 91–104, doi:10.12284/hyxb2023128

秋季涠洲岛珊瑚礁主要鱼类营养关系的初步研究

彭谦^{1,2}, 王啟芳², 宋普庆², 黄丁勇², 张涵², 王建佳², 郑新庆^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 自然资源部第三海洋研究所 北部湾滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 广西 北海 536007; 3. 自然资源部第三海洋研究所 海洋生态保护和修复重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 本研究利用碳、氮稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) 技术, 估算了秋季涠洲岛珊瑚礁主要鱼类的营养级 (TL) 和主要碳源, 结合 6 个群落营养结构量化指标, 初步分析秋季涠洲岛珊瑚礁主要鱼类的营养关系。结果表明, 不同鱼类之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异显著 ($p < 0.01$), 其中, $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-18.3\text{‰} \sim -15.4\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值介于 $12.9\text{‰} \sim 16.3\text{‰}$ 。鱼类 TL 介于 2.5~3.4, 平均 TL 为 3.0 ± 0.8 , 显示涠洲岛的鱼类以肉食性为主。涠洲岛鱼类的有机碳源比较复杂, 但大型海藻和底栖微藻是驱动鱼类食物网的关键碳源。鱼类群落的食源多样性水平和营养级长度 (CR 和 NR) 分别为 2.35 和 3.09。凸多边形总面积 (TA)、平均离心距离 (CD)、平均最近相邻距离 (MNND) 和最近相邻距离的标准差 (SDNND) 分别为 4.48、0.89、0.40 和 0.29, 表明涠洲岛珊瑚礁鱼类群落的营养结构具有营养冗余程度较高, 但食物链较短和营养多样性低等特征。以上结果表明, 涠洲岛珊瑚礁生态系统食物网结构不完整, 未来有必要开展适当的管控和修复措施恢复涠洲岛珊瑚礁生态系统的结构和功能。

关键词: 珊瑚礁鱼类; 营养关系; 碳氮稳定同位素; 涠洲岛

中图分类号: P714⁺.4; P714⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)09-0091-14

1 引言

珊瑚礁中复杂的环境和高度多样的生物构成了珊瑚礁生态系统, 它被誉为“海洋中的热带雨林”, 为人类社会提供丰富的生物资源, 具有巨大的经济效益和生态系统服务功能^[1]。珊瑚礁复杂的空间三维结构, 是众多海洋生物的栖息地, 为许多鱼类和海洋无脊椎动物提供产卵、繁殖和躲避敌害的场所。然而, 由于珊瑚礁生态系统生物多样性很高, 碳源来源复杂且组成多样, 珊瑚礁生态系统的食物网营养结构往往非常复杂^[2]。因此, 如何有效地追踪驱动珊瑚礁食物网流转的碳源基础以及构建栖息其内的关键生物之间的营养关系仍然是一个极大的挑战。

稳定碳、氮同位素技术可以有效解析生态系统不同生物之间的营养关系, 被广泛应用于河流、湖泊和海洋等不同类型的生态系统之中^[3-5]。尽管当前总体上珊瑚礁生态系统营养生态学的研究比较少^[6-7], 但近年来该技术也逐渐被应用于礁栖鱼类的食性和有机碳来源分析^[8-13]、营养生态位^[14]及其群落营养结构特征^[15]和食物网营养结构研究^[2]当中。在国内, 也陆续在大亚湾^[16]、蜈支洲岛^[17]以及永兴岛^[18]珊瑚礁生态系统等地开展过相关的工作。

涠洲岛位于北部湾海域中部, 是广西最大的海岛。地处热带气候区, 拥有分布岸线长约 20 km 的浅海珊瑚礁, 是广西沿海唯一的珊瑚礁群。从 20 世纪 50 年代以来, 针对涠洲岛珊瑚礁生态系统已经开展

收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2023-05-04。

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3102001); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费 (2020017)。

作者简介: 彭谦 (1997—), 男, 湖北省荆州市人, 主要从事珊瑚礁生态学研究。E-mail: gavin_pengqian@163.com

* 通信作者: 郑新庆, 男, 研究员, 主要从事珊瑚礁生态学研究。E-mail: zhengxinqing@tio.org.cn

了包括礁栖生物多样性^[19]、珊瑚礁骨骼年代记^[20]、环境污染生态评估^[21]等方面的研究。也有研究针对珊瑚礁的框架生物——造礁珊瑚,开展其营养策略研究^[22]。但是,很少有研究涉及涠洲岛珊瑚礁生态系统结构与功能。

近年来,台风、风暴潮等极端天气频发、人为影响不断加剧,涠洲岛海域珊瑚礁退化严重^[23]。通过研究涠洲岛珊瑚礁区的食物网营养结构及其变动特征,有助于揭示其退化机制,同时也对认识、保护和恢复当地的珊瑚礁生态系统具有重要的指导意义。因此,本研究利用稳定同位素技术,确定涠洲岛主要鱼类消费者的营养级(Trophic Levels, TL)以及主要碳源,初步分析涠洲岛鱼类群落的营养结构特征,为珊瑚礁保护和修复提供基础数据参考。

2 材料与方法

2.1 研究区域概况

涠洲岛珊瑚礁生态系统位于热带海域,珊瑚基本分布在 8 m 以浅的岩石上。本研究调查区域位于广西涠洲岛珊瑚礁区,该区域鱼类资源丰富。根据该区域造礁珊瑚群落的分布特征^[24],筛选北港(21°04'59.01"N, 109°07'30"E)、坑仔(21°01'47.25"N, 109°08'18.96"E)和竹蔗寮(21°01'14.64"N, 109°04'59.25"E)3 个具有不同珊瑚礁健康状况的珊瑚礁区为研究区域(图 1)。其中,北港造礁珊瑚覆盖率为 25.4%;坑仔覆盖率为 16.4%;竹蔗寮覆盖率为 14.7%。

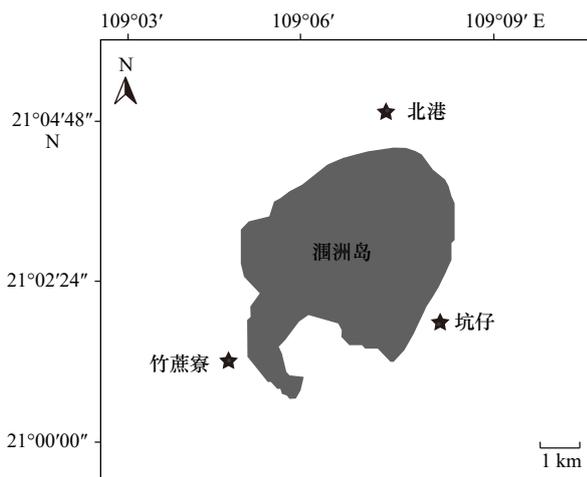


图 1 涠洲岛珊瑚礁区域采样站位

Fig. 1 Sampling stations in coral reefs of the Weizhou Island

2.2 样品采集与处理

于 2021 年 9 月在涠洲岛珊瑚礁各站位采集了鱼类样品及其潜在碳源。在珊瑚礁附近放置流刺网(网长: 200 m; 网高: 1 m; 网径: 100 mm)采集鱼类样品,

放网时间为 8:00–17:00, 连续放置 3 d。主要参考刘静等^[25]编著的《北部湾鱼类图鉴》、赖廷和和何斌源^[26]编著的《广西北部湾海洋硬骨鱼类图鉴》和世界渔业资源数据库(www.fishbase.org)等资料进行鱼类鉴定。

鱼类潜在碳源包括悬浮颗粒有机物(Particulate Organic Matter, POM)、沉积颗粒有机物(Sedimentary Organic Matter, SOM)、大型海藻和底栖微藻 4 大类。其中,通过使用采水器在距水面 0.5 m 深处采集 20 L 海水来获得 POM 所需的水样,然后过滤到预灼烧(450°C, 6 h)的 GF/F 膜上。通过水肺潜水在珊瑚礁区底部收集表层 5 cm 的泥样获得沉积物以及大型海藻样品[包括团扇藻(*Padina* spp.)、钙化红藻和藻席等]。其中,将采集的沉积物装入自封袋,倒入过滤海水充分振荡 5 min 后,将上清液倒入 2 L 烧杯,静置沉淀 15 min 后将烧杯中上清液转移至另一个干净烧杯继续静置沉淀 10 min,然后过滤到灼烧过的 GF/F 膜上,即可得到 SOM 样品^[27];大型海藻样品用屈臣氏纯净水清洗备用;底栖微藻主要通过潜水员在珊瑚礁海底放置 24 h 的 5 m 长、1 m 宽、网目为 0.5 cm 的聚乙烯网获取,用海水反复冲洗附着有底栖微藻的聚乙烯网后,将底栖微藻冲洗液过滤到灼烧过的 GF/F 膜上。同时,为了准确估算涠洲岛鱼类的营养级,本文参照 Lin 等^[28]的研究,采用滤食性双壳类作为涠洲岛鱼类营养级估算的基线生物。所有样品避光低温保存带回实验室后进行后续处理。

将清洗干净的大型海藻烘干后使用锡箔纸包裹备用。用 1 mol/L 的盐酸对底栖微藻、POM、SOM 以及钙化红藻等含有碳酸钙组分的样品进行酸化处理,待充分反应至无气泡产生后,用去离子水润洗至中性,烘干备用;上述有机碳源样品 60°C 烘干 48 h 至恒重,置于干燥箱中保存。鱼类样品,采集背部肌肉,经去离子水洗净后装入 10 mL 离心管中;双壳类样品,取其闭壳肌,经去离子水洗净后装入 10 mL 离心管中。经过上述预处理的鱼类和双壳类样品置于-50°C 真空冷冻干燥机中冷冻干燥 48 h 至恒重,经球磨机研磨成细粉末后用 100 目筛绢过滤以保证样品的均匀性,随后置于干燥箱中保存,待后续同位素分析。

2.3 稳定同位素测定

所有样品均在自然资源部第三海洋研究所科学仪器共享平台测定,使用英国 Sercon 公司的稳定同位素质谱仪(Sercon HS2022)测定碳、氮稳定同位素比值。美洲拟箭石(PDB)和纯化大气中的氮气(N₂)分别作为碳、氮稳定同位素测定的标准物质,样品

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的分析精度分别为 $\pm 0.2\%$ 和 $\pm 0.3\%$ 。碳、氮稳定同位素比值用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 表示, 计算公式为

$$\delta X = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 10^3, \quad (1)$$

式中, X 为 ^{13}C 或 ^{15}N ; R 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或者 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 的丰度比值; sample 为样品; standard 为标准物。

2.4 数据处理及分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析, 使用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验涠洲岛珊瑚礁 3 个站位之间鱼类稳定同位素比值

的差异, 显著水平为 $p < 0.05$, 并通过 Turkey-HSD 分析进行多重比较。使用 R 语言 (R Core Team, 2018) 中的 ggplot2 包绘制碳、氮稳定同位素值为横纵坐标的双位图。因为不是每个站位都有足够样品, 而一些鱼类的稳定同位素信息具有相似性, 因此根据世界渔业资源数据库 (www.fishbase.org) 和相关文献资料^[29-30] 确定鱼类的摄食类型, 将涠洲岛珊瑚礁鱼类划分为杂食性鱼类、浮游生物食性鱼类、底栖肉食性鱼类和鱼食性鱼类 4 个营养类群 (表 1)。

表 1 涠洲岛珊瑚礁鱼类的 4 个营养类群

Table 1 Four trophic guilds of fishes in coral reefs of the Weizhou Island

营养类群	摄食类型	鱼类物种	平均营养级
1	杂食性鱼类	褐篮子鱼 (<i>Siganus fuscus</i>)、中华单角鲀 (<i>Monacanthus chinensis</i>)、黄尾新雀鲷 (<i>Neopomacentrus azysron</i>)	2.7 ± 0.2
2	浮游生物食性鱼类	日本竹筴鱼 (<i>Trachurus japonicus</i>)、鳍鲷 (<i>Atule mate</i>)	3.2 ± 0.2
3	底栖肉食性鱼类	四带牙鲷 (<i>Pelates quadrilineatus</i>)、二长棘型齿鲷 (<i>Eyynnus cardinalis</i>)、大鳞舌鲷 (<i>Cynoglossus arel</i>)、纵带绯鲤 (<i>Upeneus subvittatus</i>)、截尾银姑鱼 (<i>Pennahia anea</i>)、细纹辐 (<i>Leiognathus berbis</i>)、线尾锥齿鲷 (<i>Pentapodus setosus</i>)、点带棘鳞鱼 (<i>Sargocentron rubrum</i>)、十棘银鲈 (<i>Gerres decacanthus</i>)、尖鼻箱鲀 (<i>Rhynchostracion nasus</i>)、四线天竺鲷 (<i>Apogon quadrifasciatus</i>)、多鳞鳢 (<i>Sillago sihama</i>)	3.1 ± 0.1
4	鱼食性鱼类	珍鲷 (<i>Pampus minor</i>)、日本金线鱼 (<i>Nemipterus japonicus</i>)	3.0 ± 0.2

营养级的计算采用单源双同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 贝叶斯同位素混合模型, 通过 “tRophicPosition” 包在 R 4.2.2 中实现^[31]。这种方法的优势在于在建模方法和参数的后验估计中, 明确地考虑了个体差异性和抽样误差的传递效应 (如营养富集因子、基线生物和消费者的测量值)。和浮游动物相比, 滤食性双壳类可以在更长的时间尺度上整合来自不同有机碳源的同位素特征, 所以本研究选取采集到的双壳类物种 ($n = 49$) 为基线生物, 其平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-16.2 \pm 1.5)\%$, $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $(11.2 \pm 1.1)\%$ 。模型使用文献 [32] 中的营养富集因子, 其中, $\delta^{13}\text{C}$ 为 $(0.4 \pm 1.3)\%$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 为 $(3.4 \pm 1.0)\%$ 。贝叶斯模型对自适应阶段进行了 20 000 次迭代, 前 20 000 次丢弃 (从后验估计开始时丢弃), 后 20 000 次保留。该模型通过 JAGS 4.3.0 吉布斯取样器, 使用了 5 个平行的马尔可夫链蒙特卡罗 (MCMC) 模拟^[31]。

本研究采用 Layman 等^[33] 基于 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双位图提出的 6 个群落营养结构指标定量分析了涠洲岛鱼类群落的营养结构特征。6 个指标分别是 $\delta^{13}\text{C}$ 范围 ($\delta^{13}\text{C}$ Range, CR)、 $\delta^{15}\text{N}$ 范围 ($\delta^{15}\text{N}$ Range, NR)、生态位总面积 (Total Area, TA)、平均离心距离 (Mean Distance to Centroid, CD)、平均最近相邻距离 (Mean Nearest Neighbor Distance, MNND) 和最近相邻距离的标准差 (Standard Deviation of Nearest Neighbor Distance,

SDNND)。其中, CR 表示碳同位素的差值, 表征摄食来源多样性水平; NR 表示氮同位素的差值, 表征物种的营养级长度; TA 为 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双位图所有样品的坐标点组成的凸多边形面积, 表征物种整体的生态位宽度; CD 是每一个物种的坐标点到 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双位图质心的平均欧氏距离, 表征物种的营养多样性; MNND 表示 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双位图中每个物种的坐标点与其最近相邻物种坐标点的平均欧氏距离, 表征物种聚集度密度, 是度量营养相似性的指标; SDNND 表示 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 双位图个体与其最近相邻坐标点欧氏距离标准偏差的平均值, 代表物种营养均匀度。可用 R 语言 SIBER 包获得这 6 个群落营养结构的指标。指标中 TA 容易受个体极端值影响, 因此本研究利用 Jackson 等^[34] 提出的校正标准椭圆面积 (Corrected Standard Ellipse Area, SEAc) 优化 TA 指标, SEAc 是对核心同位素生态位面积的校正, 是衡量营养生态位的重要指标。

由于团扇藻、钙化红藻和藻席同位素组成差异不大, 因此本研究将这 3 类大型海藻合并作为消费者一个有机碳来源。基于 R 语言的贝叶斯稳定同位素混合模型 (MixSIAR) 计算了 POM、SOM、大型海藻和底栖微藻 4 种有机碳源对涠洲岛鱼类的碳源贡献。与营养级计算一样, 模型中假设相邻营养级之间 $\delta^{15}\text{N}$ 的营养富集因子为 $(3.4 \pm 1.0)\%$, $\delta^{13}\text{C}$ 的营养富集因子

为 $(0.4 \pm 1.3)\%$ ^[32]。跨营养级消费者之间营养富集因子的计算采用 Vander Zanden 和 Rasmussen^[35]提出的计算方式,即跨 n 个营养级(第一营养级与第三营养级即为跨越;两个营养级, $n = 2$)消费者 $\delta^{15}\text{N}$ 的营养富集因子为 $(3.4n \pm \sqrt{n})\%$, $\delta^{13}\text{C}$ 的营养富集因子为 $(0.4n \pm 1.3\sqrt{n})\%$ 。此外,采样过程中保证足够的平行样本数量(大于 4)以有效提高 MixSIAR 的准确性和可信度^[28, 36]。

3 结果

3.1 碳、氮稳定同位素值的空间变动特征

涠洲岛珊瑚礁区各有机碳源的稳定同位素组成如表 2 所示,其中 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $(-23.3 \pm 0.8)\%$ (POM)~ $(-14.6 \pm 0.4)\%$ (大型海藻),平均值为 $(-18.1 \pm 2.3)\%$, $\delta^{15}\text{N}$ 值介于 $(5.2 \pm 1.9)\%$ (SOM)~ $(10.5 \pm 1.4)\%$ (底栖微藻),平均值为 $(8.0 \pm 1.9)\%$ 。单因素方差分析显示,不同站位之间大型海藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著差异,但 POM、SOM 和底栖微藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同站位中差异显著(表 3, $p < 0.05$),不过站位间 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值很小(表 2);而无论哪个站位,不同有机碳源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均无显著差异(表 3)。在采集的鱼类样品中(图 2), $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -18.3% (珍鲷 *Pampus minor*)~ -15.4% (线尾锥齿鲷 *Pentapodus setosus*), $\delta^{15}\text{N}$ 值介于 12.9% (褐篮子鱼 *Siganus fuscissens*)~ 16.3% (十棘银鲈 *Gerres decacanthus*)。不同鱼类之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在极显著差异($p < 0.01$),但站位之间差异不显著($p > 0.05$)。因此,本研究将 3 个站位的有机碳源和鱼类样品混合起来,统计鱼类的营养级以及不同有机碳源对鱼类的营养贡献。

3.2 营养级

涠洲岛主要鱼类的营养级范围为 2.5~3.4,平均营养级为 3.0 ± 0.8 (图 3)。其中,十棘银鲈营养级最高,为 3.4 ± 0.3 ,褐篮子鱼营养级最低,为 2.5 ± 0.3 。日本竹筴鱼(*Trachurus japonicus*)、线尾锥齿鲷、尖鼻箱鲀和多鳞鳢表现出波动比较大,波动范围为 0.6~1.0 个营养级。

3.3 有机碳源对消费者的营养贡献

不同有机碳源对涠洲岛 4 个鱼类营养类群的营养贡献率如图 4 所示。大型海藻和底栖微藻对涠洲岛 4 个鱼类功能群的营养贡献最大。其中,大型海藻对底栖肉食性鱼类和鱼食性鱼类的营养贡献最大(分别为 60.7% 和 52.2%);底栖微藻对杂食性鱼类的营养贡献最大(63.1%),大型海藻(33.2%)次之;对浮游食性鱼类,底栖微藻和大型海藻的营养贡献相当。

进一步,本文还利用 MixSIAR 模型计算了 4 个有机碳源对单个物种(将所有站位同种鱼类混合在一起)的营养贡献(图 5),结果也显示,大型海藻和底栖微藻对所有鱼类碳源的联合贡献率均超过 50%,除日本竹筴鱼和珍鲷以外,其他物种来自大型海藻和底栖微藻的碳高达 70% 以上。但不同物种之间存在一定的差异。其中,底栖微藻对褐篮子鱼、中华单角鲀(*Monacanthus chinensis*)、黄尾新雀鲷(*Neopomacentrus azysron*)、十棘银鲈(*Gerres decacanthus*)和尖鼻箱鲀的贡献大于 50%,是 26.3% 的鱼类种类的优势碳源;大型海藻对二长棘犁齿鲷(*Eyynniss cardinalis*)、大鳞舌鳎(*Cynoglossus arel*)、纵带绯鲤(*Upeneus subvittatus*)、细纹鲷(*Leiognathus berbis*)、线尾锥齿鲷、点带棘鳞鱼(*Sargocentron rubrum*)、四线天竺鲷(*Apogon quadri-fasciatus*)、多鳞鳢和日本金线鱼(*Nemipterus japonicus*)的贡献大于 50%,是 47.3% 的鱼类种类的优势碳源;游鳍叶鲷(*Atule mate*)、四带牙鲷(*Pelates quadrilineatus*)、截尾银姑鱼(*Pennahia anea*)的碳源以大型海藻和底栖微藻为主。

3.4 鱼类群落营养结构特征

使用 SIBER 模型分析涠洲岛珊瑚礁区鱼类群落的 6 个营养结构指标(表 4)。发现涠洲岛鱼类群落的摄食来源多样性水平(CR)、营养级长度(NR)分别为 2.35 和 3.09;生态位总空间(TA)和平均营养级多样性(CD)分别为 4.48 和 0.89,说明该食物网营养级多样性的总程度和平均程度相对较低;平均最近相邻距离(MNND)及最近相邻距离的标准偏差(SDNND)用来表征营养冗余度,分别为 0.40 和 0.29。MNND 和 SDNND 水平越低,则表明食物网中营养生态位分布越广,营养冗余程度越高。杂食性鱼类的营养生态位最大,其次是浮游生物食性鱼类,然后是鱼食性鱼类,底栖肉食性鱼类的营养生态位最小。不同营养类群之间的稳定同位素生态位高度重叠(图 6),表明涠洲岛不同鱼类功能群之间食性存在重叠。

4 讨论

4.1 涠洲岛鱼类及其有机碳源的稳定同位素特征

本研究中有机碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -23.3% ~ -14.6% (表 2, 图 2),其中 POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $(-22.5 \pm 0.8)\%$,这个值也与广西合浦海草床^[28]和芙蓉岛海域^[41]中 POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围相似,也基本在浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围内^[42],表明涠洲岛采集的 POM 样品可能主要以浮游植物为主。Fey 等^[9]也发现 POM 和浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不大,进一步证明了这一观点。本研究

表2 2021年秋季涠洲岛珊瑚礁海域鱼类及其潜在有机碳源的稳定同位素信息

Table 2 Stable isotope information of fishes and their potential carbon sources in the Weizhou Island coral reef in the autumn of 2021

物种	北港				坑仔				竹蔗寮			
	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	样品数	体长/mm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	样品数	体长/mm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	样品数	体长/mm
有机碳源												
悬浮颗粒有机物	-23.3 ± 0.8	7.1 ± 1.4	3		-22.2 ± 0.1	7.0 ± 1.5	3		-22.1 ± 0.5	5.5 ± 1.2	4	
沉积颗粒有机物	-19.3 ± 0.2	6.7 ± 0.7	6		-20.0 ± 0.5	5.2 ± 1.9	5		-19.8 ± 0.4	6.3 ± 0.4	6	
团扇藻	-15.7 ± 0.6	8.8 ± 0.3	3		-14.6 ± 0.4	7.7 ± 0.4	5		-14.6 ± 0.3	7.0 ± 1.0	3	
钙化红藻	-16.3 ± 0.3	9.6 ± 0.4	2		-16.0 ± 0.4	8.8 ± 0.4	4		-14.8 ± 0.3	8.0 ± 0.3	4	
藻席	-15.9	9.0	1		-16.6	8.1	1		-17.6	9.3	1	
底栖微藻	-18.4 ± 0.4	9.2 ± 1.0	5		-18.3 ± 0.1	10.5 ± 1.4	5		-19.6 ± 0.2	10.0 ± 0.8	5	
鱼类												
四带牙鲷 <i>Pelates quadrilineatus</i>	-17.3 ± 0.9	14.4 ± 1.4	3	107.7 ± 16.0	-16.5	15.7	1	117.0	-17.0 ± 0.6	15.0 ± 0.6	5	106.2 ± 7.8
二长棘犁齿鲷 <i>Eyynnys cardinalis</i>	-16.2 ± 0.4	15.1 ± 0.5	6	98.9 ± 9.5	-16.2 ± 0.4	16.0 ± 0.3	4	80.3 ± 1.9	-16.4 ± 0.2	15.2 ± 0.5	6	79.0 ± 4.6
大鳞舌鲷 <i>Cynoglossus arel</i>	-16.1 ± 0.3	14.3 ± 0.3	6	247.9 ± 18.1	-16.1 ± 0.1	13.9 ± 0.1	3	255.0 ± 13.2	-15.7 ± 0.2	13.8 ± 0.3	6	239.0 ± 22.8
褐篮子鱼 <i>Siganus fuscensens</i>	-17.4 ± 1.5	12.9 ± 2.6	5	131.2 ± 23.7	-18.1 ± 1.0	12.9 ± 0.6	6	153.4 ± 15.5	-16.7 ± 0.4	13.5 ± 0.3	2	188.5 ± 13.4
纵带绯鲤 <i>Upeneus subvittatus</i>	-16.0 ± 0.3	14.4 ± 0.6	4	102.0 ± 7.2	-16.6 ± 0.1	14.4 ± 0.2	6	102.5 ± 6.4	-16.5 ± 0.2	14.7 ± 0.4	6	102.3 ± 9.5
中华单角鲀 <i>Monacanthus chinensis</i>	-15.9 ± 0.8	14.0 ± 0.4	4	89.8 ± 7.4	-16.1	14.2	1	95.0	-16.7 ± 0.4	14.0 ± 0.2	3	97.8 ± 7.9
黄尾新雀鲷 <i>Neopomacentrus azysron</i>	-17.4	15.3	1	49.0	-16.4 ± 0.5	14.2 ± 0.3	4	49.5 ± 4.7	-17.2 ± 0.1	14.1 ± 0.4	6	49.2 ± 2.6
游鳍叶鲷 <i>Atule mate</i>	-17.3 ± 0.5	16.2 ± 0.5	6	108.5 ± 12.4	-16.9 ± 0.7	15.0 ± 0.5	6	105.0 ± 20.2	-	-	-	-
截尾银姑鱼 <i>Pennahia anea</i>	-16.6 ± 0.1	15.0 ± 0.8	2	150.5 ± 0.7	-16.5 ± 0.5	15.2 ± 0.3	6	115.7 ± 12.3	-	-	-	-
珍鲷 <i>Pampus minor</i>	-18.3	15.1	1	96.0	-17.9 ± 0.4	14.7 ± 0.2	3	84.0 ± 2.0	-	-	-	-
细纹鲷 <i>Leiognathus berbis</i>	-16.1 ± 0.2	14.9 ± 0.1	6	63.8 ± 3.9	-17.4	15.2	1	54.0	-	-	-	-
线尾锥齿鲷 <i>Pentapodus setosus</i>	-15.9 ± 0.1	15.2 ± 1.0	2	161.0 ± 24.0	-15.4 ± 0.3	14.7 ± 0.1	2	153.5 ± 16.3	-	-	-	-
点带棘鳞鱼 <i>Sargocentron rubrum</i>	-16.0 ± 0.5	15.8 ± 0.2	3	83.3 ± 44.2	-16.4 ± 0.1	15.7 ± 0.4	2	142.5 ± 17.7	-	-	-	-
日本金线鱼 <i>Nemipterus japonicus</i>	-16.6 ± 0.3	14.4 ± 0.3	2	106.0 ± 0.1	-	-	-	-	-15.9 ± 0.4	14.6 ± 0.5	6	116.6 ± 12.9
十棘银鲈 <i>Gerres decacanthus</i>	-15.5	16.3	1	148.0	-	-	-	-	-16.9 ± 0.3	16.0 ± 0.2	3	54.0 ± 4.4
日本竹筴鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	-17.9 ± 0.7	14.5 ± 0.9	6	141.0 ± 7.1	-	-	-	-	-18.2	13.9	1	130.0
尖鼻箱鲀 <i>Rhynchostracion nasus</i>	-16.4	16.1	1	102.0	-	-	-	-	-17.3 ± 0.3	15.4 ± 0.3	3	105.3 ± 20.4
四线天竺鲷 <i>Apogon quadrifasciatus</i>	-	-	-	-	-16.6 ± 0.2	14.5 ± 0.3	4	60.8 ± 7.9	-16.1 ± 0.2	15.8 ± 0.2	6	73.5 ± 11.8
多鳞鲳 <i>Sillago sihama</i>	-	-	-	-	-15.6 ± 0.5	15.5 ± 0.5	2	137.5 ± 36.1	-16.4 ± 0.5	16.2 ± 0.7	2	146.0 ± 0.1

注:“-”代表物种未在该站位出现。

表 3 涠洲岛珊瑚礁不同站位之间主要鱼类及其有机碳源 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的统计检验

Table 3 Statistical analysis of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of the dominant fishes and their organic carbon sources among stations in coral reefs of the Weizhou Island

物种	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
	F	p	F	p
POM	4.992	0.045	1.544	0.278
SOM	4.136	0.041	2.099	0.162
大型海藻	1.529	0.240	3.444	0.112
底栖微藻	32.006	0.001	2.030	0.174
四带牙鲷	0.396	0.689	0.738	0.517
二长棘犁齿鲷	0.744	0.494	1.879	0.215
大鳞舌鲷	1.265	0.223	2.568	0.133
褐篮子鱼	1.273	0.322	0.084	0.920
纵带绯鲤	1.988	0.186	1.543	0.250
中华单角鲀	2.805	0.104	0.137	0.875
黄尾新雀鲷	1.098	0.264	1.813	0.242

底栖微藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Briand 等^[2]在新喀里多尼亚珊瑚礁区、Lin 等^[28]在广西合浦海草床以及 Hiltung 等^[43]在夏威夷群岛国家海洋保护区的调查结果基本一致。SOM 的来源比较复杂,其来源可能包括悬浮颗粒在水体中的自然沉降、藻体凋落物、底泥以及动物腐尸的碎屑沉积。许多研究表明,沿岸水体的底栖微藻对 SOM 的贡献往往较大^[28,42,44]。本研究中 SOM 的

$\delta^{13}\text{C}$ 值与底栖微藻接近,表明底栖微藻是 SOM 的重要组成部分。不过,涠洲岛沉积物强烈的氮固定过程使得 SOM 有着比底栖微藻更为贫化的 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[45]。大型海藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 Wyatt 等^[6]在澳大利亚宁格鲁礁大型海藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不大,这可能与两个珊瑚礁区大型海藻的组成相似有关。澳大利亚宁格鲁礁大型海藻以藻席为主,而这也是涠洲岛大型海藻的重要组成部分,两个区域采集的藻席样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本一致。不过,涠洲岛各有机碳源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(5.2‰~10.5‰)远高于大亚湾、蜈支洲等地珊瑚礁区的^[16-17,46]。这可能与涠洲岛近年来受到人类活动的频繁干扰,来源于生活污水的氮排入沿岸水体有关^[47]。2021 年广西壮族自治区生态环境状况公报显示,涠洲岛水质条件属于 II 类^[48],高于健康珊瑚礁区的 I 类或超 I 类水体。不过,3 个站位有机碳源 $\delta^{15}\text{N}$ 值的空间差异很小,反映出 3 个站点水质环境的相对一致性。

对鱼类消费者来说,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -18.3‰~-15.4‰(表 2,图 2),变化不大,但不同鱼类之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异较小,表明涠洲岛鱼类的碳源组成可能存在明显的重叠,这也与 MixSIAR 混合模型和稳定同位素生态位高度重叠的结果相一致。不过,鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值从 12.9‰到 16.3‰,整体上高于夏威夷群岛的帕帕哈瑙莫夸基亚国家海洋保护区(PMNM)同种或同属鱼类(8.4‰~10.2‰)^[43]。其中,涠洲岛纵带绯鲤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(14.4‰~14.7‰)更是远高于 PMNM 纵带绯鲤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(9.7‰)。这很大程度上与涠洲岛珊瑚礁区各有机碳源高 $\delta^{15}\text{N}$ 值有关。这样,通过食物链的

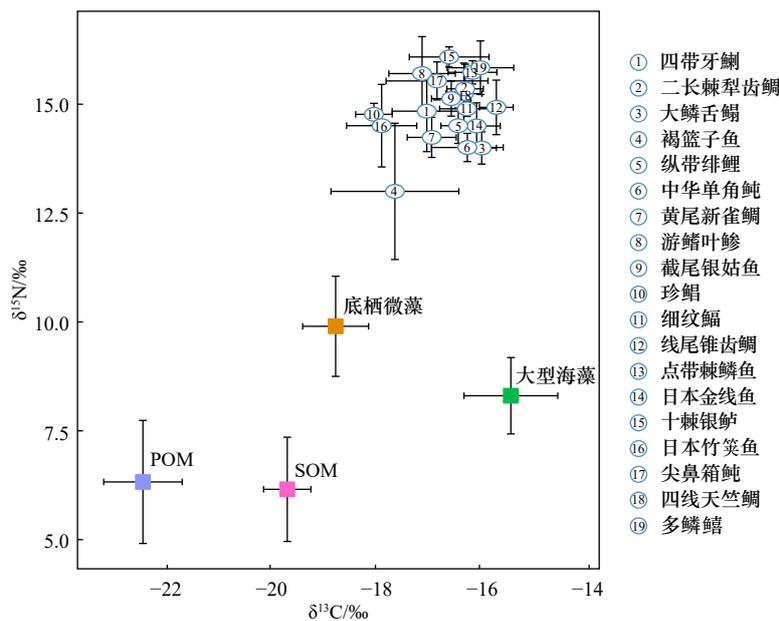


图 2 涠洲岛珊瑚礁鱼类及其潜在有机碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值双位图

Fig. 2 Carbon and nitrogen stable isotope biplots of fishes and their potential carbon sources in coral reefs of the Weizhou Island

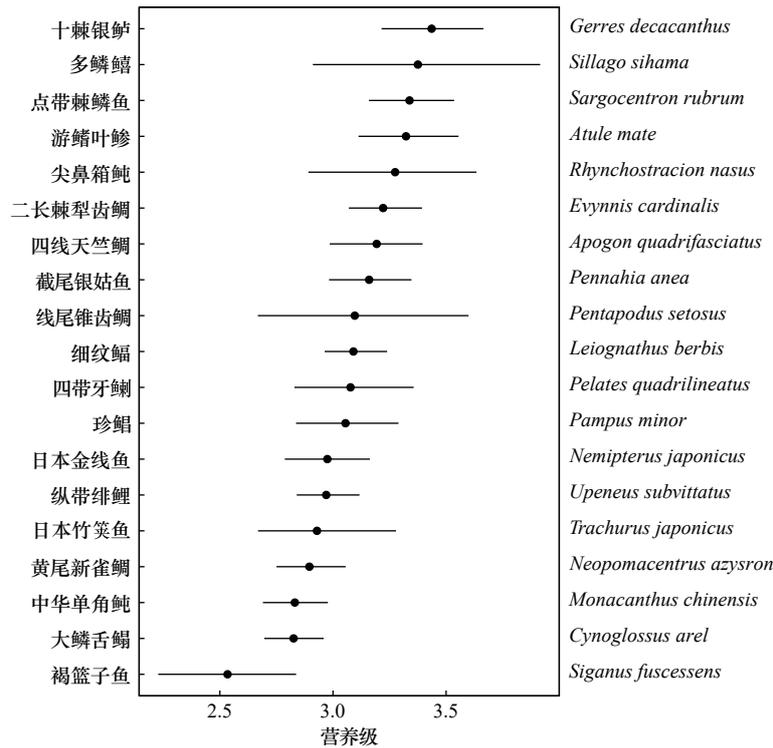


图3 涠洲岛珊瑚礁主要鱼类的营养级

Fig. 3 Trophic levels of the dominant fishes in coral reefs of the Weizhou Island

营养级联效应传递到鱼类上,这在杂食性鱼类和浮游生物食性鱼类表现得更为显著。不过,整体上底栖肉食性鱼类和鱼食性鱼类并不比杂食性鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值高很多,表明涠洲岛珊瑚礁区底栖肉食性鱼类和鱼食性鱼类存在较强的营养弹性,食物来源复杂,不同营养类群之间的稳定同位素生态位高度重叠(图6),说明涠洲岛几个鱼类营养类群之间存在较强的营养竞争关系,食源相似度较高,肉食性鱼类可能出现跨营养级摄食的现象。此外,3个站位之间相同物种的鱼类稳定同位素组成差异不大,这一方面可能与涠洲岛珊瑚礁海域面积较小,礁栖鱼类的跨区域摄食有关;与此同时,3个区域有机碳源的碳、氮稳定同位素值的一致性(表1,表2),可能也使得直接或间接利用这些有机碳源的消费者稳定同位素值的趋同。

4.2 消费者营养级分析

本研究采集的鱼类与先前在涠洲岛珊瑚礁区调查的鱼类多样性高度一致^[49-50],表明本研究用于稳定同位素测定的鱼类物种数基本能够反映现阶段涠洲岛珊瑚礁生态系统鱼类群落的基本状况。其中,涠洲岛主要鱼类的营养级范围为2.5~3.4,平均营养级为 3.0 ± 0.8 ,与夏威夷群岛的PMNM(3.5)^[43]及巴哈马的埃留特拉岛珊瑚礁鱼类的平均营养级(3.3)^[15]相似。但涠洲岛鱼类的营养级整体偏低,缺乏高营养级的生物,这在一定程度上反映了涠洲岛珊瑚礁鱼类资源出

现了衰退。禁渔政策的实施虽然在一定程度上降低了过度捕捞对渔业资源造成的影响,但随着经济社会的发展,涠洲岛爆发性增长旅游业等剧烈人类活动正在加剧涠洲岛生态环境的恶化,例如人类活动产生的重金属、微塑料颗粒、药物激素、噪声等正在不同方向及不同程度上改变着鱼类个体的行为,如捕食时间和频率等,进而影响到种群甚至整个生态系统的动力学行为^[51]。在营养级的范围上,涠洲岛鱼类营养级跨度为0.9,而夏威夷群岛则高达2.5(介于2~4.5之间),这主要是由于夏威夷群岛的珊瑚礁区不仅有草食性鱼类、杂食性鱼类和肉食性鱼类,还有偶尔进入珊瑚礁觅食的掠食性鱼类(如鲨鱼等),鱼类食性类型多样。Wyatt等^[6]在澳大利亚宁格鲁礁的研究中也发现珊瑚礁海域会存在生物量非常丰富的顶级捕食者[长吻裸颊鲷(*Lethrinus miniatus*)、川纹笛鲷(*Lutjanus sebae*)等],这些鱼类的营养级大多超过4,而本研究在涠洲岛珊瑚礁区采集鱼类并没有这些高营养级的顶级捕食者。此外,由于珊瑚礁区域地形的复杂以及为保护珊瑚礁资源,一般在海湾或外海采用的底拖网捕鱼的方式无法用于涠洲岛珊瑚礁区鱼类样品的采集。本研究采用的流刺网,其网径大小具有一定的选择偏向性^[52],低营养级的杂食性鱼类以及高营养级的鲨鱼等软骨鱼类、鲈形目鱼类(石斑鱼、鲈鱼等)捕获很少。后续研究将进一步结合地笼网和垂钓等更全

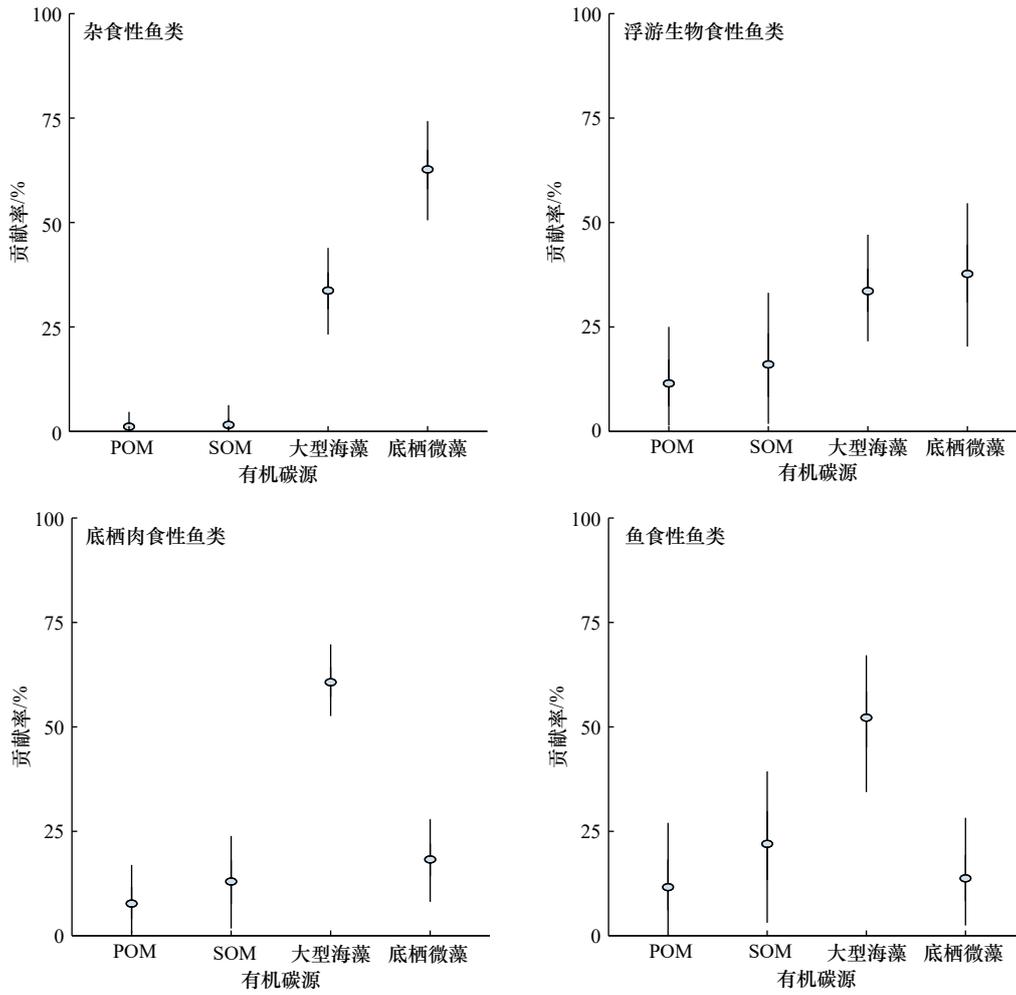


图 4 有机碳源对鱼类 4 个营养类群的营养贡献

Fig. 4 Trophic contribution of organic carbon sources to four fish guilds in coral reefs of the Weizhou Island

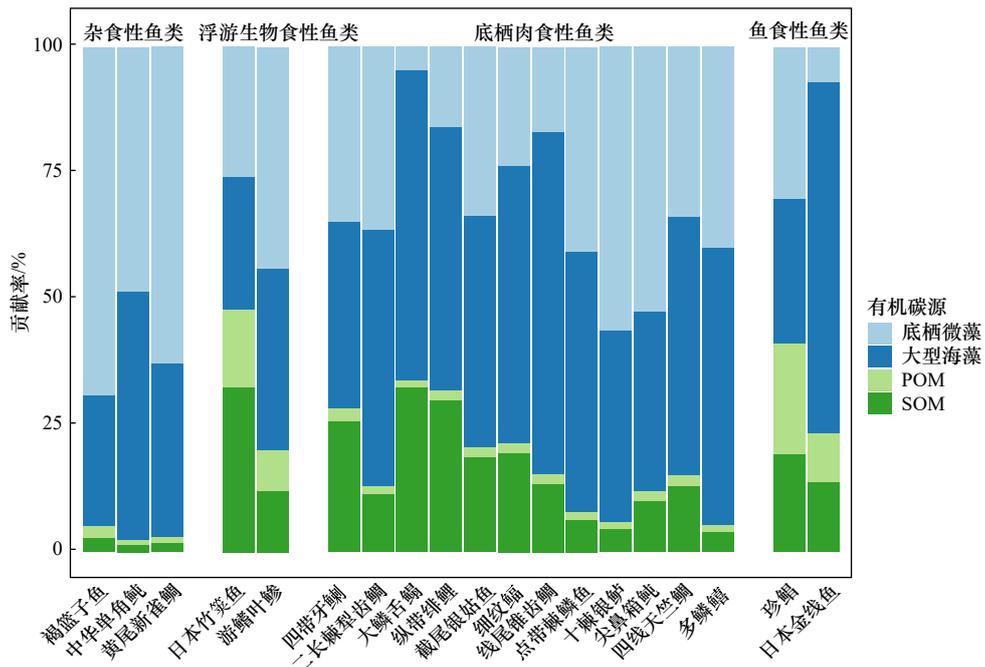


图 5 有机碳源对涠洲岛珊瑚礁主要鱼类的营养贡献

Fig. 5 Trophic contribution of organic carbon sources to the dominant fishes in coral reefs of the Weizhou Island

表4 不同研究区鱼类群落的营养结构指标

Table 4 The indicators for trophic structure of fish communities in different study areas

区域	年份	食源多样性水平	营养级长度	生态位总面积	平均营养级多样性	物种聚集度密度	物种营养均匀度
		CR	NR	TA	CD	MNND	SDNND
涠洲岛	2021	2.35	3.09	4.48	0.89	0.40	0.29
三亚蜈支洲岛 ^[17]	2020	6.36	7.60	29.52	1.92	0.37	0.30
灵山岛 ^[37]	2019	5.55	7.07	9.91	1.11	0.38	0.32
江苏近海 ^[38]	2017	5.20	8.12	26.95	1.87	0.59	0.45
南海中西部 ^[39]	2017	3.49	4.91	9.48	1.20	1.69	0.74
陵水湾 ^[40]	2015	4.45	4.66	11.18	1.49	0.60	0.54

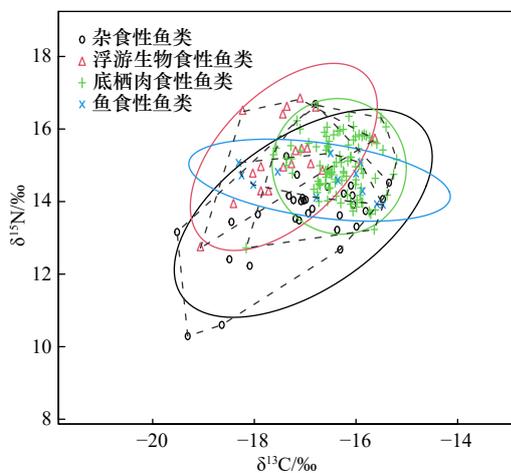


图6 涠洲岛珊瑚礁不同鱼类营养类群的营养生态位
Fig. 6 Trophic niches of different trophic groups of fishes in coral reefs of the Weizhou Island

面的采样方法, 获得涠洲岛更全面的鱼类样品。

在鱼类的营养级水平方面, 涠洲岛大多数鱼类的营养级与 Fishbase 数据库中的结果一致。例如, 主要的优势种之一——多鳞鱧营养级为 3.4, 而 Fishbase 数据库中的营养级为 3.3(体长为 157 mm)。但涠洲岛的多鳞鱧(体长为 137.5~146 mm)比大亚湾海域(体长 112 mm)^[16]高 0.9 个营养级, 这可能与不同区域采样的多鳞鱧体长差异有关。相关研究显示, 鱼类营养级的时空差异往往与由个体发育引起的摄食习性转变有关^[53-54]。除此之外, 鱼类的营养级的差异还可能与鱼类生境和栖息地环境等因素有关。结合邻近海域文献资料分析可知^[30], 这几种鱼类为浮游、底栖和游泳动物混合食性, 摄食随机性较高, 饵料生物选择范围较广, 食物来源的多样性造成了营养级的分化。而且本次调查所采集的鱼类主要为杂食性鱼类和中级肉食性鱼类, 一些高级肉食性鱼类并未采集到, 这可能是导致营养级偏低的原因。此外, 日本竹筴鱼、线尾锥齿鲷、尖鼻箱鲀和多鳞鱧营养级波动比

较大, 波动范围为 0.6~1 个营养级, 表明这些鱼类可能存在一定的跨营养级摄食的现象。

4.3 涠洲岛鱼类的碳源分析

珊瑚礁食物网的碳源基础比较复杂, 有包括藻席在内各种大型海藻、底栖微藻、底栖碎屑、POM、SOM 以及来自邻近水体的红树、海草等高等植物的有机碎屑等。不过, 不同的珊瑚礁生境, 不同有机碳源对消费者或珊瑚礁食物网的营养贡献可能并不一致。例如, 在夏威夷群岛^[10]、墨西哥的韦拉克鲁斯珊瑚礁国家公园^[11], 浮游植物被发现对珊瑚礁食物网的营养贡献较大, 而在法属波利尼西亚的莫雷阿岛^[12]、西澳大利亚宁格鲁礁^[9]以及加勒比群岛的珊瑚礁区^[13], 藻席的营养贡献似乎更大。一些研究也显示, 沉积在沉积物-水界面包括动植物残体在内的底栖碎屑也可能是珊瑚礁鱼类主要的碳源。例如, 夏威夷群岛的瓦胡岛和毛伊岛, 藻类残体和浮游动物粪便衍生的底栖碎屑对珊瑚礁群落中杂食性鱼类的碳源贡献很大^[10]。在涠洲岛, 包括钙化红藻、藻席以及褐藻在内的大型海藻是驱动珊瑚礁鱼类食物网的最关键碳源, 它对秋季采集的 47.6% 鱼类的营养贡献最大。这与上述的法属波利尼西亚的莫雷阿岛、西澳大利亚宁格鲁礁、法属波利尼西亚的马克萨斯群岛^[9]以及加勒比群岛等地的研究结果相似。此外, 本研究还发现, 底栖微藻对涠洲岛珊瑚礁鱼类的营养贡献也不小。不同区域珊瑚礁生态系统碳源组成的差异可能与珊瑚礁生态系统的退化程度有关。在加勒比群岛, 健康的珊瑚礁上, 藻席是所有消费者最重要的碳源, 而在退化的珊瑚礁, POM 是肉食性动物的主要碳源^[13]。这可能与生态系统退化后, 珊瑚礁生态系统有机碳源的变动密切相关。不同区域不同健康状况的珊瑚礁生态系统, 各有机碳源的丰富程度也不一致, 这可能影响了初级消费者碳源的利用, 最终对鱼类等高营养级生物产生影响。

有意思的是,本研究中浮游生物食性鱼类的主要碳源是底栖微藻和大型海藻, POM 的贡献率不到 10%(图 4)。一般情况下,浮游生物食性鱼类以浮游植物或者含有浮游植物的 POM 为主要碳源^[28]。不过,这些鱼类的食性也很容易受到环境食物可利用性的影响。例如, Du 等^[55]在印度尼西亚北苏拉威西克马(Kema)海草床的研究中发现,海草来源的有机碳是浮游生物食性鱼类横纹鹦竺鲷(*Ostorhinchus margaritophorus*)营养的主要贡献者,而 POM 贡献较小。这可能是因为克马海草床海草覆盖率高,海草来源的有机碳丰富,浮游生物食性的鱼类偏向于利用海草来源的有机碳。Cao 等^[56]在三亚鹿回头珊瑚礁区的研究中也发现,伴随着礁区珊瑚种类和珊瑚盖度的逐渐下降,底栖生物群落结构经历了从珊瑚到大型海藻的转变,大型海藻作为优势碳源被大多数高营养级鱼类所利用。同样, Zheng 等^[57-59]在筲筴湖的食物网动态研究也发现,在冬春季绿潮暴发期间,大型海藻(石莼 *Ulva lactuca* 等)对底栖动物(短足类、多毛类等)和大多数鱼类的营养贡献很高,而夏季则以底栖微藻为主,这也是受到环境初级生产者可利用性的影响。本研究大型海藻作为涠洲岛鱼类最主要的碳源,可能与礁区大型海藻的丰富程度有关(图 7)。调查显示,涠洲岛沿岸的礁石上生长着大量的团扇藻、马尾藻等大型海藻以及藻席,大型海藻的平均覆盖率为 5.85%,这种丰富的大型海藻或直接被摄食或被间接利用为涠洲岛礁栖生物提供丰富的有机碳^[60]。



图 7 涠洲岛珊瑚礁区的大型海藻

Fig. 7 Macroalgae in coral reefs of the Weizhou Island

左为小团扇藻,右为匍扇藻

Left panel is *Padina minor*, and right panel is *Lobophora variegata*

4.4 涠洲岛珊瑚礁主要鱼类营养结构特征

本研究使用 Layman 等^[33]的 6 个群落营养结构指标揭示涠洲岛珊瑚礁主要鱼类的营养结构。其中, $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化反映了食物网的摄食来源多样性水平, CR 值越大,食物网内的生态位构成越复杂,摄食来源

多样性水平也越高^[33]。海洋生物通常具有杂食性特征,摄食的选择性与饵料生物的组成和数量密切相关。因此,摄食来源多样性的变化往往反映了群落内饵料生物和摄食生物种类组成的变化。 $\delta^{15}\text{N}$ 值反映了生物体的营养级长度, NR 值描述的是群落食物网的纵向结构。一般来说, NR 值越大,食物网内消费者的营养层次越多,营养多样性水平也越高。当食物网中具有相似营养特征的物种占多数时, MNND 值较小,而此时食物网营养冗余性较高。与之类似, SDNND 水平越低,则食物网中营养生态位分布越广,营养冗余程度越高。总体来说,涠洲岛珊瑚礁海域主要鱼类的 CR、NR、TA 和 CD 均低于三亚蜈支洲岛^[17]、灵山岛^[37]、江苏近海^[38]、南海中西部^[39]和陵水湾海域^[40]主要鱼类的(表 3),显示出涠洲岛食物链较短,营养多样性较低,这可能与涠洲岛珊瑚礁生态系统栖息地的特点、采集鱼类种类较少和缺乏高级肉食性鱼类有关。如果以 3.4‰ 作为相邻营养级生物 $\delta^{15}\text{N}$ 的营养富集因子值,三亚蜈支洲岛、灵山岛江苏近海、南海中西部和陵水湾海域营养级距范围为 1.37~2.39,而涠洲岛营养级级距小于 1,且最高营养级仅 3.4,说明涠洲岛海域处于高营养级生物较少、食物网处于受干扰较多的状态;但涠洲岛海域鱼类群落的 MNND 与其他海域相当,表明该海域生物群落的营养冗余度较高,群落内部相似营养生态位的生物较多,抗外界干扰能力较强,个别物种的缺失不会导致该海域食物网结构失衡^[61]。另一方面,涠洲岛鱼类的 SDNND 最低,表明其营养分布更为均匀,种内竞争弱,这可能与鱼类个体生长发育阶段中存在营养生态位分化有关^[15]。

5 结论

本研究初步探讨了秋季涠洲岛珊瑚礁主要鱼类的营养结构,发现鱼类群落的营养结构呈现出营养冗余程度较高,但食物链较短,缺乏高营养级消费者以及营养多样性低等特征,这表明涠洲岛珊瑚礁生态系统食物网结构不完整,生态系统总体处于明显退化的状态,还需加强涠洲岛珊瑚礁生态系统的保护,并采取适当的管控和恢复策略,例如限制捕捞以及针对特定功能群鱼类的增殖放流,以增加其鱼类群落的多样性,尤其高营养级鱼类的多样性,以恢复其生态系统能量流动和物质循环的畅通。

参考文献:

- [1] 余克服. 珊瑚礁科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

- Yu Kefu. Introduction to the Science of Coral Reefs[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [2] Briand M J, Bonnet X, Guillou G, et al. Complex food webs in highly diversified coral reefs: insights from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ stable isotopes[J]. *Food Webs*, 2016, 8: 12–22.
- [3] Qin Qiang, Zhang Fubin, Liu Fei, et al. Food web structure and trophic interactions revealed by stable isotope analysis in the midstream of the Chishui River, a tributary of the Yangtze River, China[J]. *Water*, 2021, 13(2): 195.
- [4] 陈俊伊, 王康, 郭钰伦, 等. 基于稳定同位素技术的保安湖食物网结构特征研究[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(5): 699–706.
Chen Junyi, Wang Kang, Guo Yulun, et al. Food web structure of the Bao'an Lake based on stable carbon and nitrogen isotopes analysis[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(5): 699–706.
- [5] 刘小琳, Rutakumwa E S, 徐靖昂, 等. 舟山外海重要海洋动物的碳氮稳定同位素特征和食物网营养结构[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(5): 415–423.
Liu Xiaolin, Rutakumwa E S, Xu Jing'ang, et al. Carbon and nitrogen stable isotope characteristics and nutrient structure of food web of important marine animals near Zhoushan Islands[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2021, 40(5): 415–423.
- [6] Wyatt A S J, Waite A M, Humphries S. Stable isotope analysis reveals community-level variation in fish trophodynamics across a fringing coral reef[J]. *Coral Reefs*, 2012, 31(4): 1029–1044.
- [7] Kolasinski J, Nahon S, Rogers K, et al. Stable isotopes reveal spatial variability in the trophic structure of a macro-benthic invertebrate community in a tropical coral reef[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2016, 30(3): 433–446.
- [8] 王腾, 刘永, 李纯然, 等. 南沙美济礁海域隆背笛鲷繁殖和食性的初步研究[J]. *南方水产科学*, 2022, 18(6): 78–84.
Wang Teng, Liu Yong, Li Chunran, et al. A preliminary study on reproduction and feeding habits of *Lutjanus gibbus* from Meiji Reef of Nansha[J]. *South China Fisheries Science*, 2022, 18(6): 78–84.
- [9] Fey P, Parravicini V, Bănarău D, et al. Multi-trophic markers illuminate the understanding of the functioning of a remote, low coral cover Marquesan coral reef food web[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 20950.
- [10] Bradley C J, Longenecker K, Pyle R L, et al. Compound-specific isotopic analysis of amino acids reveals dietary changes in mesophotic coral-reef fish[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2016, 558: 65–79.
- [11] Carreón-Palau P L, Parrish C C, Del Angel-rodriíguez A, et al. Revealing organic carbon sources fueling a coral reef food web in the Gulf of Mexico using stable isotopes and fatty acids[J]. *Limnology and Oceanography*, 2013, 58(2): 593–612.
- [12] Letourneur Y, Lison de Loma T, Richard P, et al. Identifying carbon sources and trophic position of coral reef fishes using diet and stable isotope ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) analyses in two contrasted bays in Moorea, French Polynesia[J]. *Coral Reefs*, 2013, 32(4): 1091–1102.
- [13] Morillo-Velarde P S, Briones-Fourzán P, Álvarez-Filip L, et al. Habitat degradation alters trophic pathways but not food chain length on shallow Caribbean coral reefs[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4109.
- [14] Miller S D, Zgliczynski B J, Fox M D, et al. Niche width expansion of coral reef fishes along a primary production gradient in the remote central Pacific[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2019, 625: 127–143.
- [15] Zhu Yiou, Newman S P, Reid W D K, et al. Fish stable isotope community structure of a Bahamian coral reef[J]. *Marine Biology*, 2019, 166(12): 160.
- [16] 朱文涛, 秦传新, 马鸿梅, 等. 大亚湾珊瑚礁生态系统简化食物网的稳定同位素[J]. *水产学报*, 2020, 44(7): 1112–1123.
Zhu Wentao, Qin Chuanxin, Ma Hongmei, et al. Stable isotope analysis of simple food web in coral reef ecosystem of Daya Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(7): 1112–1123.
- [17] 尹洪洋, 朱文涛, 马文刚, 等. 三亚蜈支洲岛海洋牧场区域夏季食物网研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3241–3253.
Yin Hongyang, Zhu Wentao, Ma Wengang, et al. The summer food web in the marine ranch area of Wuzhizhou Island in Sanya, Hainan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3241–3253.
- [18] 王腾, 刘永, 李纯厚, 等. 永兴岛附近海域珊瑚礁鱼类群落结构特征[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(4): 674–683.
Wang Teng, Liu Yong, Li Chunhou, et al. Characteristics of fish community structure in coral reefs adjacent to Yongxing Island of Xisha islands[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(4): 674–683.
- [19] 梁文, 周浩郎, 王欣, 等. 涠洲岛西南部海域造礁石珊瑚的群落结构特征分析[J]. *海洋学报*, 2021, 43(11): 123–135.
Liang Wen, Zhou Haolang, Wang Xin, et al. Studies on scleractinian coral community structure characteristics in the southwest seawaters of the Weizhou Island[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(11): 123–135.
- [20] 龙雅婷, 余克服, 王瑞, 等. 涠洲岛珊瑚礁的发育过程及其与气候的对应关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(1): 184–193.
Long Yating, Yu Kefu, Wang Rui, et al. Development of coral reefs around Weizhou Island and its bearing on climate[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 184–193.
- [21] 史敬文, 张瑞杰, 韩民伟, 等. 北部湾涠洲岛珊瑚礁区多介质环境中多环芳烃的污染特征与生态风险[J]. *中国环境科学*, 2022, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20221207.014.
Shi Jingwen, Zhang Ruijie, Han Minwei, et al. Pollution characteristics and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the multi-media environment of Weizhou Island, Beibu Bay[J]. *China Environmental Science*, 2022, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20221207.014.
- [22] Xu Shendong, Zhang Zhinan, Yu Kefu, et al. Spatial variations in the trophic status of *Favia palauensis* corals in the South China Sea: insights into their different adaptabilities under contrasting environmental conditions[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(6):

- 839–852.
- [23] 李邢凡, 曹超, 蔡锋. 涠洲岛珊瑚礁系统特征及台风对其影响[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(11): 49–52.
Li Xingfan, Cao Chao, Cai Feng. Coral reef system characteristic and typhoon influence in Weizhou Island[J]. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(11): 49–52.
- [24] 何精科, 黄振鹏. 广西涠洲岛珊瑚分布状况研究[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(1): 57–62.
He Jingke, Huang Zhenpeng. The distribution of corals in Weizhou Island, Guangxi[J]. *Marine Development and Management*, 2019, 36(1): 57–62.
- [25] 刘静, 吴仁协, 康斌, 等. 北部湾鱼类图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Liu Jing, Wu Renxie, Kang Bin, et al. Fishes of Beibu Gulf[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [26] 赖廷和, 何斌源. 广西北部湾海洋硬骨鱼类图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Lai Tinghe, He Binyuan. Marine Osteichthyes Fishes in Guangxi Beibu Gulf of China[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [27] 徐步欣. 海南不同区域海草床底栖食物网表征分析[D]. 三亚: 海南热带海洋学院, 2022.
Xu Buxin. Characterization of benthic food webs in different seagrass beds regions of Hainan[D]. Sanya: Hainan Tropical Ocean University, 2022.
- [28] Lin Jinlan, Liu Xinming, Lai Tinghe, et al. Trophic importance of the seagrass *Halophila ovalis* in the food web of a Hepu seagrass bed and adjacent waters, Beihai, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107607.
- [29] 杨璐, 曹文清, 林元烧, 等. 夏季北部湾九种经济鱼类的食性类型及营养生态位初步研究[J]. *热带海洋学报*, 2016, 35(2): 66–75.
Yang Lu, Cao Wenqing, Lin Yuanshao, et al. Preliminary study on feeding habits and trophic niche of nine economic fish species in Beibu Gulf in summer[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 35(2): 66–75.
- [30] 陈颖涵. 北部湾主要鱼类食性的初步研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
Chen Yinghan. Preliminary study on the feeding habit of dominant fish species in Beibu Gulf[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
- [31] Quezada-Romegialli C, Jackson A L, Hayden B, et al. Trophic position, an R package for the Bayesian estimation of trophic position from consumer stable isotope ratios[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, 9(6): 1592–1599.
- [32] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703–718.
- [33] Layman C A, Arrington D A, Montaña C G, et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?[J]. *Ecology*, 2007, 88(1): 42–48.
- [34] Jackson A L, Inger R, Parnell A C, et al. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER-Stable Isotope Bayesian Ellipses in R[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2011, 80(3): 595–602.
- [35] Vander Zanden M J, Rasmussen J B. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(8): 2061–2066.
- [36] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, et al. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation[J]. *PLoS One*, 2010, 5(3): e9672.
- [37] 张宇洋, 董建宇, 孙昕, 等. 基于稳定同位素技术的灵山岛及周边海域渔业生物群落营养结构分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(8): 40–51.
Zhang Yuyang, Dong Jianyu, Sun Xin, et al. Trophic structure of fishery assemblage in surrounding waters of Lingshan Island based on stable isotope analysis[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2022, 52(8): 40–51.
- [38] 陆亚楠, 张瑞, 张虎, 等. 应用稳定同位素技术研究江苏近海食物网营养结构的季节性变化[J]. *海洋学报*, 2022, 44(2): 1–10.
Lu Ya'nan, Zhang Rui, Zhang Hu, et al. Seasonal variation in the trophic structure of food webs in coastal waters of Jiangsu Province based on stable isotope techniques[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(2): 1–10.
- [39] 黄佳兴, 龚玉艳, 徐姗姗, 等. 南海中西部渔场主要渔业生物碳氮稳定同位素特征[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(1): 76–84.
Huang Jiaying, Gong Yuyan, Xu Shannan, et al. Characteristics of stable carbon and nitrogen isotopes of major fishery organisms in the fishing ground of central western South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(1): 76–84.
- [40] 张文博, 黄洪辉, 李纯厚, 等. 华南典型海湾主要渔业生物碳氮稳定同位素研究[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(5): 9–14.
Zhang Wenbo, Huang Honghui, Li Chunhou, et al. Study on carbon and nitrogen stable isotopes of main fishery species in typical gulf, southern China[J]. *South China Fisheries Science*, 2019, 15(5): 9–14.
- [41] 张镇, 董建宇, 孙昕, 等. 莱州芙蓉岛人工鱼礁区大型底栖动物营养结构特征研究[J]. *水产学报*, 2023, 47(9): 62–75.
Zhang Zhen, Dong Jianyu, Sun Xin, et al. Trophic structure of macrobenthos in artificial reef area of Furong Island, Laizhou Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(9): 62–75.
- [42] Zheng Xinqing, Como S, Magni P, et al. Spatiotemporal variation in environmental features and elemental/isotopic composition of organic matter sources and primary producers in the Yundang Lagoon (Xiamen, China)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(13): 13126–13137.
- [43] Hilting A K, Currin C A, Kosaki R K. Evidence for benthic primary production support of an apex predator-dominated coral reef food web[J]. *Marine Biology*, 2013, 160(7): 1681–1695.
- [44] 陈玲, 王凯, 周曦杰, 等. 岛礁水域海藻场食物网基准生物的选择[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(4): 364–373.
Chen Ling, Wang Kai, Zhou Xijie, et al. Investigation on food web's isotopic baseline in typical reef ecosystem-seaweed bed[J]. *Marine*

- Fisheries*, 2016, 38(4): 364–373.
- [45] Pan Ke, Zheng Xinqing, Liu Xinming, et al. Nitrogen cycling in a tropical coral reef ecosystem under severe anthropogenic disturbance in summer: insights from isotopic compositions[J]. *Water Research*, 2021, 207: 117824.
- [46] Skinner C, Pei Yude, Morimoto N, et al. Stable isotopes elucidate body-size and seasonal fluctuations in the feeding strategies of planktivorous fishes across a semi-enclosed tropical embayment[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 942968.
- [47] 梁鑫, 彭在清. 广西涠洲岛珊瑚礁海域水质环境变化研究与评价[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(1): 114–119.
Liang Xin, Peng Zaiqing. Analysis and appraisal of seawater quality in coral reef water, Weizhou Island, Guangxi[J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(1): 114–119.
- [48] 2021年广西壮族自治区生态环境状况公报[N]. 广西日报, 2022–06–02(6).
Guangxi Zhuang Autonomous Region ecological environment status bulletin in 2021[N]. *Guangxi Daily*, 2022–06–02(6).
- [49] 邹琦, 吴志强, 黄亮亮, 等. 广西涠洲岛珊瑚礁海域鱼类物种组成的调查分析[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(1): 1–10.
Zou Qi, Wu Zhiqiang, Huang Liangliang, et al. Coral reef fish species composition in Weizhou Island, Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(1): 1–10.
- [50] 罗峥力, 杨长平, 王良明, 等. 北部湾北部沿岸海域鱼类资源时空分布特征及多样性变化[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(6): 1847–1851.
Luo Zhengli, Yang Changping, Wang Liangming, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and diversity of fish resources in the coastal waters of northern Beibu Gulf[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2023, 54(6): 1847–1851.
- [51] 黄晖, 马斌儒, 练健生, 等. 广西涠洲岛海域珊瑚礁现状及其保护策略研究[J]. *热带地理*, 2009, 29(4): 307–312, 318.
Huang Hui, Ma Binru, Lian Jiansheng, et al. Status and conservation strategies of the coral reef in Weizhou Island, Guangxi[J]. *Tropical Geography*, 2009, 29(4): 307–312, 318.
- [52] 李永振, 陈丕茂. 南沙群岛重要珊瑚礁水域鱼类资源数量分布[J]. *水产学报*, 2004, 28(6): 651–656.
Li Yongzhen, Chen Pimao. Quantitative distribution of fish resources in main coral reef waters of Nansha Islands[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(6): 651–656.
- [53] 倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 503–504.
Ni Yong, Wu Hanlin. *Fishes of Jiangsu Province*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006: 503–504.
- [54] McMahon K W, Thorrold S R, Houghton L A, et al. Tracing carbon flow through coral reef food webs using a compound-specific stable isotope approach[J]. *Oecologia*, 2016, 180(3): 809–821.
- [55] Du Jianguo, Zheng Xinqing, Peristiwady T, et al. Food sources and trophic structure of fishes and benthic macroinvertebrates in a tropical seagrass meadow revealed by stable isotope analysis[J]. *Marine Biology Research*, 2016, 12(7): 748–757.
- [56] Cao D, Cao W, Yu K, et al. Evaluation of anthropogenic influences on the Luhuitou fringing reef via spatial and temporal analyses (from isotopic values)[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(5): 4431–4443.
- [57] Zheng Xinqing, Huang Lingfeng, Huang Bangqin, et al. Factors regulating population dynamics of the amphipod *Ampithoe valida* in a eutrophic subtropical coastal lagoon[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(6): 56–65.
- [58] Zheng Xinqing, Huang Lingfeng, Lin Rongcheng, et al. Roles of epiphytes associated with macroalgae in benthic food web of a eutrophic coastal lagoon[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 110: 201–209.
- [59] Zheng Xinqing, Como S, Huang Lingfeng, et al. Temporal changes of a food web structure driven by different primary producers in a subtropical eutrophic lagoon[J]. *Marine Environmental Research*, 2020, 161: 105128.
- [60] 于婉君. 涠洲岛珊瑚礁区的底质特征及其对珊瑚分布的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
Yu Wanjun. Substrate characteristics of the area of Weizhou Island reef and its effects on the distribution of coral[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [61] Qin Chuanxin, Chen Pimao, Sarà G, et al. Ecological implications of purple sea urchin (*Heliocidaris crassispina*, Agassiz, 1864) enhancement on the coastal benthic food web: evidence from stable isotope analysis[J]. *Marine Environmental Research*, 2020, 158: 104957.

Preliminary study on the trophic relationship of dominant fishes in coral reefs of Weizhou Island in autumn

Peng Qian^{1,2}, Wang Qifang², Song Puqing², Huang Dingyong², Zhang Han², Wang Jianjia², Zheng Xinqing^{1,2,3}

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Observation and Research Station of Coastal Wetland Ecosystem in Beibu Gulf, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Beihai 536007, China; 3. Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

Abstract: Here, stable carbon and nitrogen isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) techniques are used to estimate the trophic levels (TL) and main carbon sources of the dominant fish in the coral reefs of Weizhou Island in autumn. Combined with the six quantitative indicators of community trophic structure, the trophic relationship of the dominant fish in the coral reefs of Weizhou Island in autumn is preliminarily analyzed. The results show that the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of different fishes are significantly different ($p < 0.01$). The $\delta^{13}\text{C}$ values are between -18.3‰ and -15.4‰ , and the $\delta^{15}\text{N}$ values are between 12.9‰ and 16.3‰ . The trophic levels of fish ranged from 2.5 to 3.4, with an average values of 3.0 ± 0.8 , indicating that fish in Weizhou Island are mainly carnivorous. The organic carbon sources of fish in Weizhou Island are complex, but macroalgae and benthic microalgae are the key carbon sources fuelling fish food webs. The food source diversity level and trophic level length (CR and NR) of fish community are 2.35 and 3.09, respectively. The total area (TA), mean centrifugal distance (CD), mean nearest neighbor distance (MNND) and standard deviation of nearest neighbor distance (SDNND) are 4.48, 0.89, 0.40 and 0.29, respectively. These above indicators suggest that the trophic structure of coral reef fish community in Weizhou Island has a high degree of nutritional redundancy, but the food chain is short and the nutritional diversity is low. The coral reef ecosystem in Weizhou Island is incomplete in food web structure. In the future, it is necessary to carry out appropriate control and restoration measures to restore the structure and function of the coral reef ecosystem in Weizhou Island.

Key words: coral reef fish; trophic relationship; carbon and nitrogen stable isotope; Weizhou Island