

曲昱玮, 过美蓉, 水柏年, 等. 沿浦湾红树林底栖动物营养生态位及其潜在食物来源研究[J]. 海洋学报, 2025, 47(3): 51–61, doi:10.12284/hyxb2025034

Qu Yuwei, Guo Meirong, Shui Bonian, et al. The study of trophic niche and potential food sources of benthic animals in mangrove from Yanpu Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(3): 51–61, doi:10.12284/hyxb2025034

沿浦湾红树林底栖动物营养生态位 及其潜在食物来源研究

曲昱玮¹, 过美蓉², 水柏年¹, 朱大千¹, 张娜¹, 马亚东¹, 冯佳宇¹, 胡成业^{1*}

(1. 浙江海洋大学 水产学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江省海洋生态环境监测中心, 浙江 舟山 316021)

摘要: 红树林是滨海生产力最高的生态系统, 林内有机碳来源多元化, 使得底栖食物网营养结构较为复杂。本研究以沿浦湾红树林底栖动物(鱼类、贝类、甲壳类)为研究对象, 采用稳定同位素技术结合贝叶斯标准椭圆模型(SIBER模型)和稳定同位素溯源混合模型(Simmr模型)分析底栖动物群落营养结构, 并确定潜在食物来源。研究表明: 底栖动物碳稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$)值范围为 -22.04‰ ~ -11.27‰ , 氮稳定同位素($\delta^{15}\text{N}$)值范围为 5.86‰ ~ 16.21‰ , 营养级介于1.00(红树拟蟹守螺)~3.62(大鳍弹涂鱼)之间。其中, 鱼类的营养级偏高, 为2.05~3.62, 甲壳类为2.28~3.19, 而贝类相对偏低, 介于1.00~2.83之间, 这与不同类群的食性偏好差异有关。由营养生态位分析可知, 鱼类的食物链长度和营养多样性高于甲壳类和贝类, 甲壳类的食物来源多样性和营养均匀度均最高, 而贝类的营养多样性和营养相似性最高。总体上, 鱼类、甲壳类和贝类之间的核心营养生态位出现不同程度上重叠。基于贝叶斯混合模型分析底栖动物潜在食物来源发现, 沉积有机物(Soil organic matter, SOM)为主要碳源, 占78.2%, 其次是浮游植物, 占21.6%, 而凋落物和悬浮有机质(Particulate organic matter, POM)最低, 分别为3.7%和3.3%。研究结果完善了我国北缘红树林底栖动物营养关系, 有助于更好地从营养调控角度开展红树林生物多样性保护与修复工作。

关键词: 红树林; 底栖动物; 营养生态位; 食物来源

中图分类号: S931.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2025)03-0051-11

1 引言

红树林是热带、亚热带海岸带海陆交错区初级生产力最高的海洋生态系统, 林内复杂的空间结构为许多底栖动物提供栖息、繁殖以及躲避敌害的场所^[1]。同时, 红树林生态系统具有有机碳来源多样化等特点, 使得底栖食物网营养结构很复杂。因此, 精准解析底栖动物潜在食物来源及其营养关系是当前红树

林生物多样性保护工作面临的瓶颈问题之一^[2]。

食性分析是厘清海洋生物摄食关系以及营养生态位特征的重要手段^[3]。胃含物分析法是开展食性分析的常见方法, 被广泛应用于鱼类等较大个体的生物。通常, 底栖动物体型较小, 胃含物难以辨识, 且无法获取生物长期的食物来源信息, 使得食性结果具有一定偶然性^[4]。碳氮稳定同位素因其在食物网中独特的富集过程, 可准确反映较长时期的摄食情况, 明确

收稿日期: 2024-11-08; 修订日期: 2025-01-06。

基金项目: 国家自然科学基金(42306188, 42206203); 浙江省自然科学基金(LQ21C030006); 浙江省教育厅科研项目(Y202354018, Y202457341)。

作者简介: 曲昱玮(1999—), 男, 辽宁省盘锦市人, 主要研究方向为红树林生态修复。E-mail: 3101427783@qq.com

* 通信作者: 胡成业, 副教授, 硕士生导师, 主要从事底栖生态学研究。E-mail: zjhuchengye@zjou.edu.cn

食物网生物的营养位置和能量流动情况。稳定同位素技术分析被广泛应用于红树林食物网基础碳源分析。例如, Giarrizzo 等^[5] 分析巴西北部红树林碳源贡献发现, 红树凋落物是心形仿招潮蟹 (*Ucides cordatus*) 等的主要碳源, 而底栖微藻是海栖招潮蟹 (*Uca maracoani*)、鲷 (*Mugil cephalus*) 等生物主要碳源; Noghabi 等^[6] 结合稳定同位素溯源混合模型 (Simmr 模型) 分析波斯湾红树林也发现, 底栖微藻是主要碳源, 其对底栖动物食物来源的贡献率达 40%。然而, 相关研究在探究红树林底栖动物的食物来源时, 往往忽略了种间营养关系, 对红树林的营养动态认识不足^[7]。对此, Layman 等^[8] 基于稳定同位素分析结果提出了食物链长度、食物来源多样性、营养多样性等 6 个营养生态位指标用以量化不同物种间的营养关系。例如, 张欢等^[9] 利用营养生态位指标探究日本沼虾和秀丽白虾的营养生态位发现, 两者食物来源相似, 且营养级相近, 营养生态位高度重叠。尽管营养生态位指标率先量化食物网营养结构, 但也存在不足, 如对样本量有一定要求 ($n > 50$), 未考虑采样过程中产生的误差等。对此, Jackson 等^[10] 开发了贝叶斯标准椭圆模型 (SIBER 模型), 可弥补营养生态位指标的不足。Muro-Torres 等^[11] 基于标准椭圆模型分析加利福尼亚湾红树林底栖动物的营养结构和食物来源发现, 其核心营养生态位重叠度介于 20.8%~30.7% 之间, 尤其是甲壳类和贝类的生态位重叠度最高 (>60%)。综上所述, 基于稳定碳氮同位素技术结合 SIBER 模型和 Simmr 模型, 已成为探究底栖动物群落营养生态位特征及其潜在食物来源的重要手段。

沿浦湾地处浙闽交界区, 是浙江省唯一具有南亚热带气候特征的地理单元, 湾内近海滩涂广阔, 海水覆盖时间长, 提供充足的淹水环境, 适宜红树植物生长。自 2015 年该区域成功引种秋茄 (*Kandelia candel*) 后, 已成为我国北缘最大的海湾红树林湿地。目前, 针对红树林底栖动物的研究主要集中于群落物种多样性^[12]、群落结构特征等方面^[13], 而群落营养结构特征研究鲜有报道。开展红树林底栖动物群落营养生态位及其食物来源研究, 有助于更好地从营养调控角度开展红树林生物多样性保护工作。为此, 本研究应用稳定同位素示踪技术分析底栖动物稳定碳、氮同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 分布特征, 探究底栖动物群落营养结构特征, 量化底栖动物潜在食物来源的贡献。研究结果有利于更好地理解红树林底栖食物网营养调控过程, 为红树林底栖动物的保护和管理提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 样品采集

根据沿浦湾红树林实际分布设置 15 个站位, 于 2021 年 5 月和 8 月采集沉积有机物 (Soil organic matter, SOM)、悬浮有机物 (Particulate organic matter, POM)、浮游动物、浮游植物、凋落物和底栖动物 (图 1)。其中, 每个站点使用剪去针头的 50 mL 一次性注射器采集 SOM; 在 Y1、Y4、Y7、Y10 及 Y12 站位用 1 L 的塑料瓶采集表层海水收集 POM, 并在现场将 POM 样品抽滤到预先在 450℃ 马弗炉灼烧过的 What-man GF/F 滤膜上收集; 使用浅水 III 型和浅水 II 型浮游生物网于涨潮时采集浮游动物和浮游植物; 每个站位挑选 4 株秋茄采集其林冠下的凋落叶片; 底栖动物通过样方和地笼网等方式采集, 每个站位设 3 个样方, 面积为 25 cm × 25 cm, 并放置 1 个地笼网, 连续采集两天 (4 次涨落潮, 共计采集 60 个地笼网样本)。所有样品放置车载冰柜冷冻保存带回实验室进行后续分析。

2.2 样品处理

采集的样品带回实验室后, 鱼类取其背部肌肉, 甲壳类中的虾类取腹部肌肉、蟹类取螯足肌肉, 贝类取足部肌肉, 每个物种单独测 2~8 个样。SOM 样品用 1 mol/L 盐酸彻底酸化, 去除无机碳; 凋落物样品用纯水洗净晾干; 浮游动物样品用少量蒸馏水清洗去除杂质, 然后置于在解剖镜下挑选出较大浮游动物个体; 浮游植物样品除去浮游动物和碎屑后, 用 160 μm 筛绢过滤。将 POM 样品以及上述样品用冷冻干燥机 (新芝, SCIENTZ-10N) 干燥后研磨。

使用 Flash EA1112 HT 元素分析仪和 MAT 253 同位素比率质谱仪 (Thermo Finnigan Scientific, Inc., USA) 分别测定样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$, 公式如下:

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

式中: X 为所测稳定同位素 (^{13}C 或 ^{15}N), R_{sample} 表示样品同位素比值, R_{standard} 表示标准物质同位素比值, 碳、氮稳定同位素比值分别为国际标准物质 PDB (PDB-lelemnite) 和标准大气氮。营养级计算公式如下^[14]:

$$\text{TL} = [(\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}})/3.4] + \text{TL}_{\text{baseline}},$$

式中: $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为消费者氮同位素比值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为基线生物氮同位素比值, 本研究选取红树拟蟹守螺 ($\delta^{15}\text{N} = 6.19\text{‰}$) 作为基线生物。

2.3 数据处理

根据 Layman^[8] 等与 Jackson^[10] 等提出的营养结构

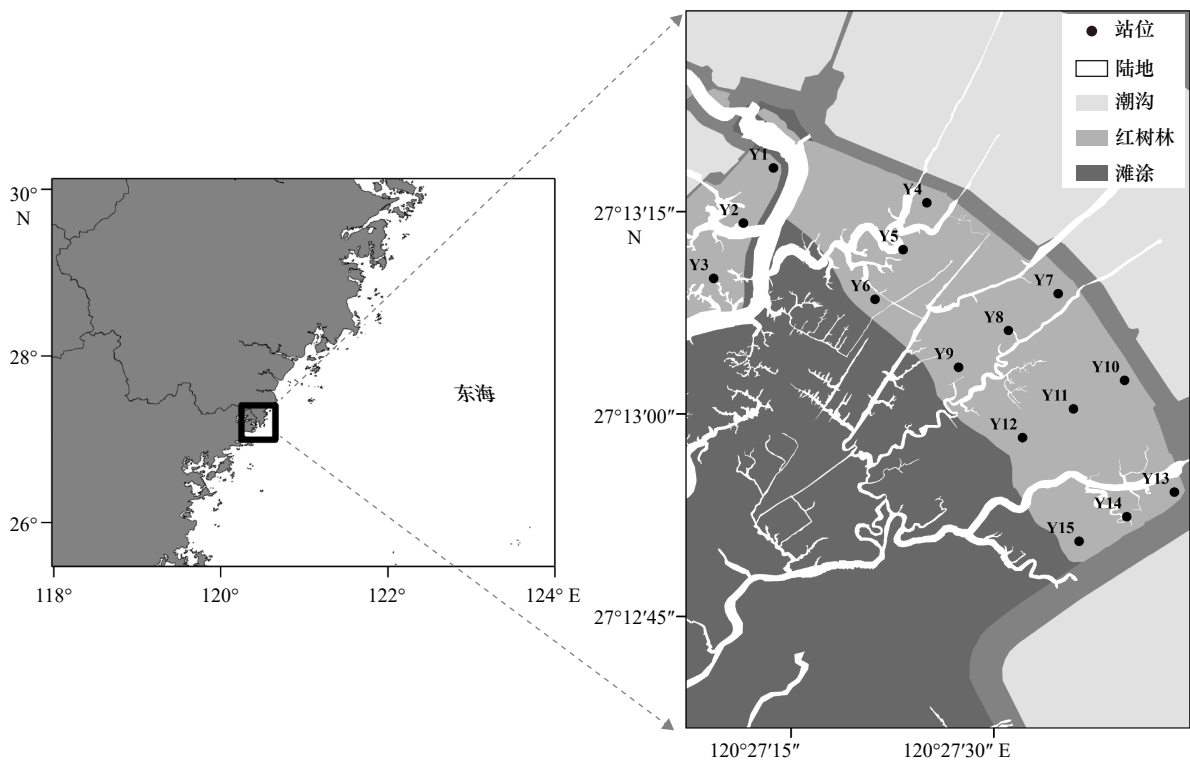


图1 研究区域与站点

Fig. 1 Study area and station

指标,用 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围(NR)、 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围(CR)、多边形总面积(TA)、平均离心距离(CD)、平均最近相邻距离(MNND)、最邻距离标准差(SDNND)和标准椭圆面积(SEAC_c)等参数反映底栖动物的食物链长度、食物来源多样性、营养多样性、群落多样性、营养相似性、营养均匀度和核心营养生态位等营养生态位分布特征^[10]。利用SIBER包绘制贝叶斯标准椭圆图,基于Simmr包量化底栖动物食物来源的贡献。

3 结果

3.1 底栖动物稳定同位素特征

本研究分析了26种红树林底栖动物的碳、氮稳定同位素值(见表1、图2),包含鱼类9种,甲壳类11种,贝类6种。通过碳氮稳定同位素分析可知, $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-22.04\text{‰} \sim -11.27\text{‰}$,平均值为 $-16.04\text{‰} \pm 3.47\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $9.65\text{‰} \sim 16.21\text{‰}$,平均值为 $10.96\text{‰} \pm 3.36\text{‰}$ (图2)。对不同类群进一步分析可知,鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度为 8.55‰ ,其中弹涂鱼(*Periophthalmus modestus*)最高,为 -11.27‰ ,而尖吻蛇鳗(*Ophichthus apicalis*)最低,仅为 -19.82‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值跨度为 6.57‰ ,鲻(*Mugil cephalus*)的值最低仅为 9.64‰ ,而大鳍弹涂鱼(*Periophthalmus magnuspinnatus*)最高,达 16.21‰ 。甲壳类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度最高,为 10.22‰ ,其中字纹弓蟹(*Varuna litterata*)最低,为 -22.04‰ ,而

弧边招潮蟹(*Uca arcuata*)最高,达 -11.82‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值跨度为 4.66‰ ,拟穴青蟹(*Scylla paramamosain*)的值最高,为 14.57‰ ,弧边招潮蟹的值最低,仅为 9.91‰ 。贝类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度最低,仅 5.99‰ ,其中黑口拟滨螺(*Littoraria melanostoma*)的值最低,仅 -18.52‰ ,而尖锥拟蟹守螺(*Cerithidea largillierti*)最高,可达 -12.53‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值跨度为 7.15‰ ,红树拟蟹守螺(*Cerithidea rhizophorarum*)最低,为 5.86‰ ,文蛤(*Meretrix meretrix*)最高,是 13.01‰ 。

3.2 底栖动物营养级

沿浦湾红树林底栖动物的营养级范围为 $1.00 \sim 3.62$ (图3)。按类群分析可知,鱼类的营养级范围为 $2.05 \sim 3.62$,跨度 1.57 ,大鳍弹涂鱼营养级最高,而鲻最低;甲壳类的营养级跨度仅为 0.91 ,拟穴青蟹最高(3.19),而弧边招潮蟹最低(2.28);贝类的营养级总体偏低,但跨度达 1.83 ,文蛤最高(2.83),而红树拟蟹守螺最低(1.00)。

3.3 底栖动物营养结构特征

沿浦湾红树林底栖动物营养特征指标分析可知,鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围(NR)和多边形总面积(TA)最高,为 6.23 和 3.73 ;甲壳类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围(CR)和最邻距离标准差(SDNND)最高为 8.34 和 1.08 ;而平均最近相邻距离(MNND)、平均离心距离(CD)和标准椭圆面积(SEAC)则是贝类最高,分别为 1.68 、 2.46 和 1.35 (表2)。

表 1 沿浦湾底栖动物及基础碳源稳定同位素信息
Table 1 Isotopic information of macrobenthos and carbon sources in mangrove from Yanpu Bay

物种	拉丁名	样本数	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	体长范围/mm	体重范围/g
鲮	<i>Mugil cephalus</i>	3	-15.02 ± 0.24	9.77 ± 0.19	50.73~55.11	1.26~1.71
鲃	<i>Planiliza haematocheila</i>	6	-15.44 ± 1.03	11.38 ± 0.86	63.50~79.60	1.80~4.79
花鲈	<i>Lateolabrax maculatus</i>	6	-15.63 ± 0.53	11.94 ± 1.61	60.00~138.80	1.67~27.76
尖吻蛇鳗	<i>Ophichthus apicalis</i>	4	-18.13 ± 1.15	12.35 ± 1.09	73.80~299.80	1.71~6.19
青弹涂鱼	<i>Scartelaos histophorus</i>	4	-11.9 ± 0.37	13.76 ± 0.32	127.30~132.20	6.14~6.70
斑尾刺蛾虎鱼	<i>Acanthogobius ommaturus</i>	6	-14.98 ± 1.20	14.38 ± 0.72	51.00~115.60	1.08~11.35
弹涂鱼	<i>Periophthalmus modestus</i>	6	-12.96 ± 0.93	14.69 ± 0.49	62.00~75.80	2.37~4.50
中华乌塘鳢	<i>Bostrychus sinensis</i>	6	-14.16 ± 0.88	14.76 ± 0.95	14.39~104.02	5.21~30.35
大鳍弹涂鱼	<i>Periophthalmus magnuspinnatus</i>	8	-13.6 ± 1.11	15.1 ± 0.71	48.20~138.20	0.70~14.33
弧边招潮蟹	<i>Uca arcuata</i>	6	-12.65 ± 0.46	10.55 ± 0.44	14.27~28.61	5.01~9.93
红螯螳臂相手蟹	<i>Chiromantes haematocheir</i>	6	-17.09 ± 1.30	10.98 ± 0.84	17.25~26.13	2.85~8.40
日本大眼蟹	<i>Macrophthalmus japonicus</i>	2	-13.24 ± 0.35	11.61 ± 0.06	23.57~26.51	5.89~6.33
天津厚蟹	<i>Helice tientsinensis</i>	6	-16.26 ± 1.44	11.68 ± 1.09	19.75~32.50	2.51~16.10
长足长方蟹	<i>Metaplax longipes</i>	4	-15.43 ± 0.94	11.99 ± 0.28	19.30~25.00	0.95~5.00
鲜明鼓虾	<i>Alpheus distinguendus</i>	6	-15.9 ± 2.41	12.31 ± 0.73	27.00~49.00	0.92~3.05
脊尾白虾	<i>Exopalaemon carinicauda</i>	3	-16.83 ± 1.97	12.62 ± 0.26	37.50~59.20	0.40~1.20
字纹弓蟹	<i>Varuna litterata</i>	3	-20.99 ± 0.99	13.51 ± 0.38	27.50~35.89	11.22~14.08
四齿大额蟹	<i>Metopograpsus quadridentatus</i>	2	-16.1 ± 0.71	13.57 ± 0.05	25.64~27.89	7.67~8.02
拟穴青蟹	<i>Scylla paramamosain</i>	4	-14.17 ± 1.03	13.65 ± 0.84	71.00~90.80	61.20~115.49
红树拟蟹守螺	<i>Cerithidea rhizophorarum</i>	2	-17.6 ± 0.47	6.19 ± 0.21	15.56~21.97	1.56~2.67
黑口拟滨螺	<i>Littoraria melanostoma</i>	2	-18.28 ± 0.34	9.16 ± 0.34	18.36~21.77	5.61~5.89
缢蛏	<i>Sinonovacula lamarcki</i>	2	-16.72 ± 0.48	9.23 ± 0.12	22.56~35.82	12.68~19.89
尖锥拟蟹守螺	<i>Cerithidea largillierti</i>	4	-12.91 ± 0.33	10.49 ± 0.57	5.66~20.65	1.41~20.10
粗糙拟滨螺	<i>Littoraria scabra</i>	2	-16.96 ± 0.41	11.39 ± 0.36	20.56~21.97	28.94~31.46
珠带拟蟹守螺	<i>Cerithidea cingulata</i>	2	-13.68 ± 0.34	12.06 ± 0.11	12.68~15.69	1.09~2.07
文蛤	<i>Meretrix meretrix</i>	3	-17.29 ± 0.84	12.4 ± 0.53	32.56~33.86	24.46~29.09
POM	—	3	-24.11 ± 0.73	1.61 ± 0.16	—	—
凋落物	—	6	-25.95 ± 0.83	2.76 ± 1.17	—	—
浮游植物	—	3	-8.92 ± 1.15	5.07 ± 5.65	—	—
SOM	—	6	-14.21 ± 0.72	5.46 ± 0.17	—	—

基于标准椭圆模型进一步分析发现,甲壳类和贝类的营养生态位重叠程度较高,而鱼类与贝类和甲壳类的营养生态位重叠较低,表明底栖动物类群之间存在不同程度的营养资源竞争关系(图 4)。

3.4 底栖动物潜在食物来源分析

基于 Simmr 模型量化浮游植物、SOM、凋落物和

POM 等潜在碳源对底栖动物的碳源贡献可知, SOM 是主要碳源, 贡献为 78.2%; 其次是浮游植物(10.4%)、凋落物(7.7%)和 POM(3.7%)。对不同类群进行细化分析发现, 鱼类食物来源中 SOM 贡献占比最高(71.4%), 其次是浮游植物(21.6%), 而凋落物和 POM 占比最低, 分别为 3.7% 和 3.3%; 甲壳类食物来源中 SOM、浮

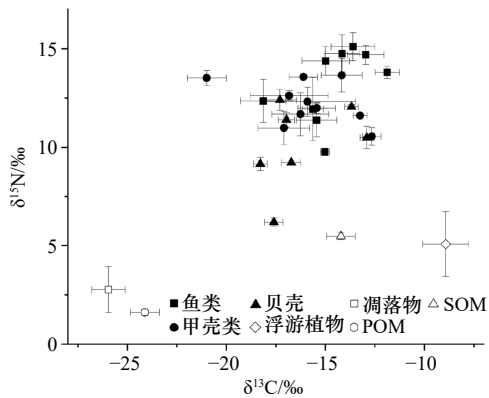


图2 沿浦湾红树林底栖动物及其潜在碳源 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分布

Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of benthos and potential sources of carbon in mangrove from Yanpu Bay

游植物、凋落物和 POM 占比, 分别为 61.2%、22.4%、9.9% 和 6.5%; 贝类的食物来源中 SOM 比例比鱼类和甲壳类有所下降, 但其值仍最高, 为 47.4%, 其次是浮游植物、凋落物和 POM, 分别为 32.0%、11.3% 和 9.4%(图 5)。

4 讨论

4.1 底栖动物碳氮稳定同位素及营养级

沿浦湾红树林底栖动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-22.04\text{‰} \sim$

-11.27‰ 之间, 略高于哥伦比亚 Pichido 红树林 ($-30.8\text{‰} \sim -18.6\text{‰}$)^[15] 和加利福尼亚红树林 ($-23.65\text{‰} \sim -15.84\text{‰}$)^[11], 这可能与不同红树林底栖动物饵料生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异有关。通常, $\delta^{13}\text{C}$ 在消费者与饵料生物之间的分馏较低(约 $0\text{‰} \sim 1\text{‰}$), 其值较为接近^[16]。本研究底栖动物潜在碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-8.92\text{‰} \sim -25.95\text{‰}$ 之间, 均高于哥伦比亚 Pichido 红树林 ($-21.5\text{‰} \sim -27.5\text{‰}$) 和比热克斯群岛红树林 ($-26.8\text{‰} \sim -39.4\text{‰}$), 故本研究底栖动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较高。底栖动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值介于 $9.65\text{‰} \sim 16.21\text{‰}$ 之间, 其营养级范围为 $1.00 \sim 3.62$, 略高于哥伦比亚 Pichido 红树林^[15] ($1.30 \sim 3.50$), 这与基准生物的选择有关。通常, 食物网基线生物的选择对象为该区域的初级生产者或初级消费者^[17-18], 本研究基线生物为红树拟蟹守螺 ($\delta^{15}\text{N} = 6.19\text{‰}$), 而哥伦比亚 Pichido 红树林采用基础碳源 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值 (2.49‰) 为基线。此外, 环境因子也会影响生物体内 $\delta^{15}\text{N}$ 的富集。例如, 水温变化会影响浮游植物的光合作用及其对氮的吸收和分馏, 导致 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化^[19], 从而影响食物网生物的营养级。基于营养级分布结构可将底栖动物分为初级消费者和次级消费者, 其中初级消费者有 18 种, 包括植食性的红树拟蟹守螺等、浮游食性的鲷鱼等和沉积食性弧边招潮蟹

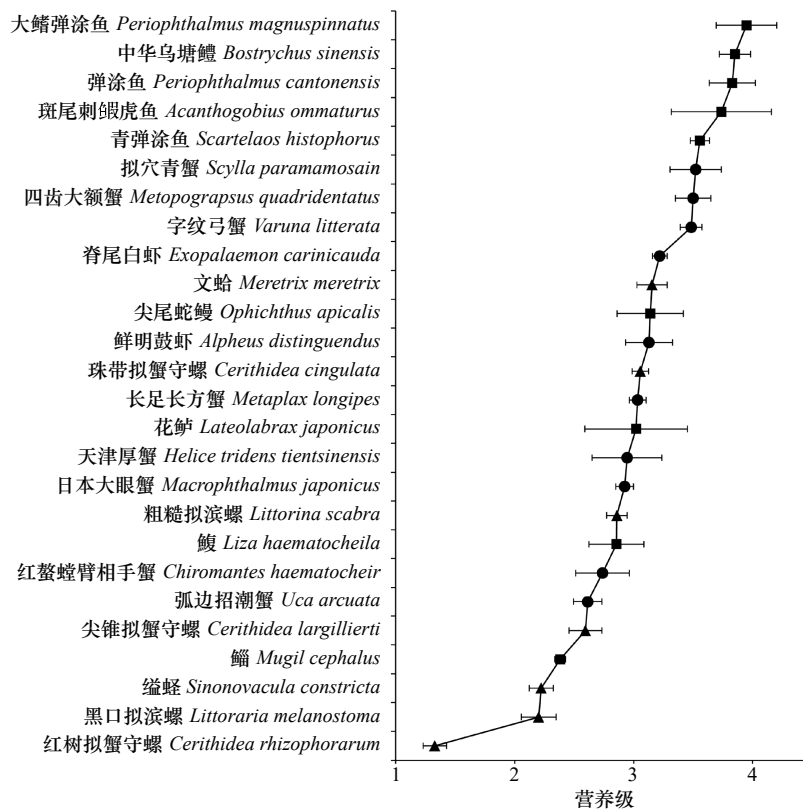


图3 沿浦湾红树林底栖动物连续营养谱

Fig. 3 Continuous trophic profiles of macrobenthos in mangrove from Yanpu Bay

表 2 沿浦湾红树林底栖动物不同类群营养结构特征

Table 2 Trophic structure characteristics of different groups of macrobenthos in mangrove from Yanpu Bay

营养指标	鱼类	甲壳类	贝类
$\delta^{15}\text{N}$ 值范围(NR)	6.23	3.09	6.21
$\delta^{13}\text{C}$ 值范围(CR)	4.99	8.34	5.36
平均离心距离(CD)	2.28	1.92	2.56
平均最近相邻距离(MNND)	1.02	1.37	1.68
最邻距离标准差(SDNN)	0.71	1.08	0.66
多边形总面积(TA)	3.73	3.39	2.46
标准椭圆面积(SEA_c)	1.01	0.92	1.35

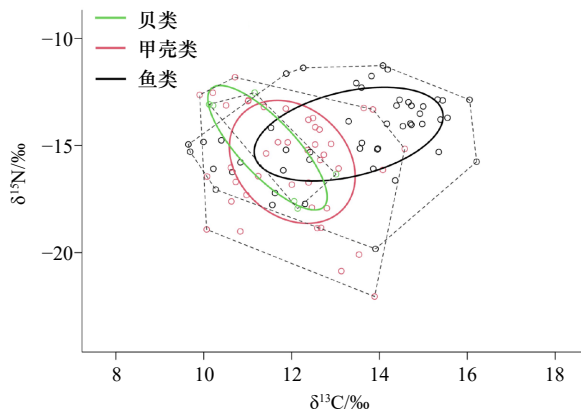


图 4 沿浦湾红树林底栖动物多边形面积(虚线)和校正后的标准椭圆面积(实线)

Fig. 4 Corrected standard polygon area (dashed line) and ellipse area (solid line) of macrobenthos in mangrove from Yanpu Bay

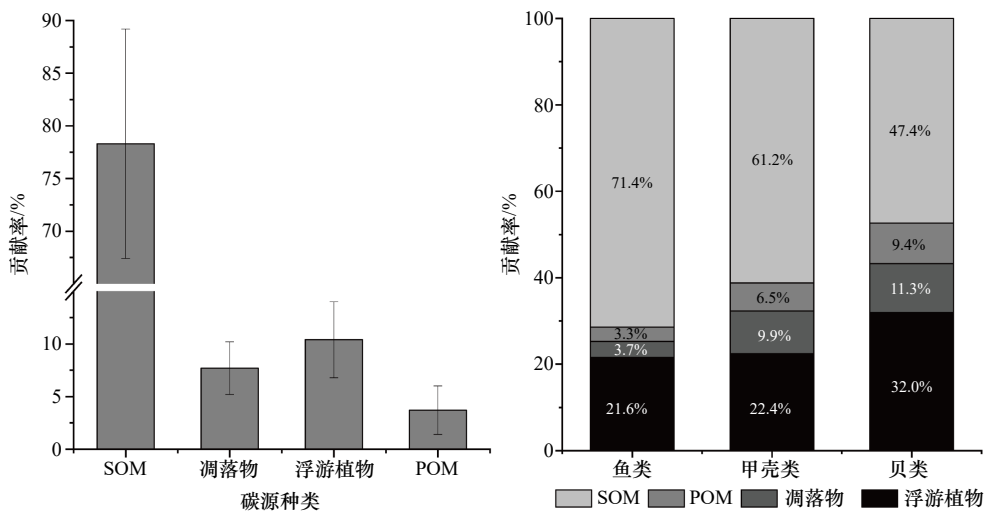


图 5 沿浦湾红树林底栖动物碳源占比(左)和碳源对各类群贡献率(右)

Fig. 5 Contribution percentage of carbon sources to macrobenthos in the Yanpu Bay (left) and contribution percentage of carbon sources to each group (right)

等;次级消费者 8 种,主要由杂食性的鱼类和甲壳类组成。

基于底栖动物 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布特征可知,鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体偏高,且多为次级消费者。值得注意的是,鲷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化较小($-14.84\text{‰} \sim -15.29\text{‰}$),这与其食性范围相对较窄有关。研究表明鲷主要摄食底栖微藻^[20],故其值跨度较小。通过对比不同区域红树林鲷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值发现,其值高于珠江口红树林($-26.35\text{‰} \sim -17.30\text{‰}$)^[21]。研究表明鲷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其体长呈显著的负相关关系^[20]。本研究鲷的体型较小,全长范围仅在 50.73 mm~55.11 mm 之间,故 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较大。此外,花鲈的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与枸杞岛^[22] 和江苏近海^[23] 相比均偏低,这与其所处的生长阶段有关。花鲈在生长发育的过程中,食性会出现转变,导致营养级随之增大^[24]。本研究花鲈多为幼鱼,主要摄食浮游生物,故营养级较低。甲壳类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度最高,而 $\delta^{15}\text{N}$ 跨度最低,表明其食性相近,且食物来源广泛。值得注意的是,弧边招潮蟹和日本大眼蟹作为初级消费者,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高(-12.65‰ 和 -13.24‰),而作为次级消费者字纹弓蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 值却较低(-20.99‰),这与物种的摄食策略选择有关。杂食者存在较高的摄食灵活性,导致食性相似的物种出现在不同营养位置中^[25]。贝类也存在相似的现象,如红树拟蟹守螺、尖锥拟蟹守螺和珠带拟蟹守螺隶属同一属,但营养级跨度较大,这与食性密切相关。尖锥拟蟹守螺和珠带拟蟹守螺均以沉积食性为主^[26-27],而红树拟蟹守螺以植食性为主^[28],食性的差异造就了其营养级的不同。另外,营养富集因子的选

择对营养级估算同样有重要影响^[29]。通常,捕食者和被捕食者之间的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集因子假定为3.4‰,但实际值可能在0.5‰到5.5‰之间变化,这种变化会导致稳定同位素估算营养级时出现偏差^[18,30]。因此,在估算消费者的营养情况时,应考虑不同或多个基线选择。

4.2 底栖动物群落营养多样性及结构稳定性

通过对底栖动物不同类群的生态位进行比较发现,鱼类的营养生态指标较高,尤其是NR和TA。研究表明,NR和TA越大,群落的食物链长度和营养多样性水平越高^[31],表明鱼类更能适应红树林底栖环境,在资源利用和选择上更灵活,这与物种组成密切相关。本研究中鱼类多为弹涂鱼,多分布于淤泥或泥沙底质的潮间带和红树林,其适温性和适盐性较广^[32],故鱼类表现出对红树林生态环境较强的适应性。甲壳类的CR和SDNND总体较高。通常,CR越大,表明群落食物来源多样性越高;而SDNND越大,代表营养冗余度越低,群落物种具有不同的营养特征^[31]。因此,甲壳类食物来源广,但群落冗余程度较低,抗干扰能力较差,这与智利海域底栖甲壳类的营养结构特征结果相似^[33]。本研究甲壳类多为沉积食性,食物来源的多样化导致营养相似性较低,促进种间产生部分特化,使得不同物种占据不同的生态位。贝类的CD较高,而SDNND较低,表明贝类群落多样性水平高,但物种间营养特征相似度较低^[31],这可能与贝类占据的营养位置相关。沿浦湾红树林贝类占据的营养位置较为分散,且食性较广,导致相似营养位置中食性相近的物种较少,故贝类的多样性水平高,而物种间相似度水平低。

沿浦湾红树林底栖动物不同类群间的营养生态位存在一定程度的重叠,表明林内部分物种的栖息环境和食物来源相似,可能存在种间竞争。尤其是,贝类和甲壳类之间多数物种的营养生态位重叠程度较高,呈现较高的食物资源竞争关系。本研究贝类和甲壳类的物种多为以沉积食性为主,资源需求相似度高,存在明显的食物和空间竞争,故存在种间食物竞争关系。通常,在标准椭圆分析中位于凸多边形顶点的物种被认为是占据特殊营养位置的关键物种^[34],对维持群落的稳定性具有重要意义^[35]。关键物种的资源量变动会导致食物链长度、营养多样性等营养生态位指标发生变化^[34]。本研究中沉积食性的鱼类(如弹涂鱼、大鳍弹涂鱼)、浮游食性的鱼类(花鲈、鲮)以及沉积食性的甲壳类(弧边招潮蟹、字纹弓蟹)被认为是占据关键顶点的物种。上述物种多为沿

浦湾红树林底栖动物群落代表种,如弹涂鱼和弧边招潮蟹为群落优势种^[36]。

4.3 底栖动物食物网的潜在碳来源分析

基于Simmr模型分析可知,SOM是沿浦湾红树林底栖动物的主要碳源。碳稳定同位素在生物体内的富集程度较低,消费者和食物之间通常具有相似的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[16]。本研究中SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于-13.68‰和-15.02‰之间,半数以上的底栖动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值位于该区间内,故SOM是主要碳源。另外,该现象也与底栖动物的食性密切相关,底栖动物中半数物种以沉积食性为主,其次是浮游食性、植食性和肉食性,分别占26.9%、15.4%和7.7%。鱼类中多为以沉积食性为主的弹涂鱼类^[37],其余为鲮、鲮及幼体花鲈等浮游食性鱼类^[21,38];甲壳类中,高达70%的物种以沉积食性为主,包括弧边招潮蟹、鲜明鼓虾等^[39],以底栖肉食性为主的拟穴青蟹,沉积物对其食物来源贡献最高会达30.16%^[40]。贝类中以沉积食性为主的物种较少,仅占贝类总数的28.6%,其余为植食性和滤食性生物,成为SOM对贝类贡献低于鱼类和甲壳类的原因。

红树林湿地的碳源可分为内源碳和外源碳^[41],前者包括凋落物分解、有机碎屑沉降等^[42-43],而后者主要由悬浮颗粒物、浮游植物等组成^[44]。本研究中内源碳(SOM)对底栖动物的贡献远高于外源碳(POM和浮游植物),故沿浦湾红树林底栖食物网主要以SOM为碳源的沉积食物链为主。然而,Muro-Torres等^[11]发现加利福尼亚红树林食物网同时存在沉积食物链和浮游食物链,这与食物网物种组成密切相关。加利福尼亚红树林游泳动物种类较多,达72种,而本研究采集到的游泳动物种数为9种,物种组成的差异导致食物链的不同。基于稳定碳同位素分析发现,浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与SOM相近,表明浮游植物可能对SOM有一定贡献,故由沉降后的浮游植物、底栖微藻等组成的SOM是底栖动物重要的间接食物来源。

红树凋落物作为潜在食物来源,不仅可被林内底栖生物作为食物来源直接利用^[5,20,45],还会多方面间接作用于底栖动物。研究表明,凋落物腐烂分解后产生的有机颗粒,少部分会通过潮汐作用成为悬浮有机质的一部分^[21],更多地会成为林内有机碎屑的主要来源^[20],Muro-Torres等^[11]在分析加利福尼亚红树林中基础碳源贡献时发现,红树植物的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-26.5‰)与有机碎屑的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-23.9‰)相似,表明两者之间存在直接贡献关系。本研究发现,凋落物对

底栖动物的贡献率整体偏低(7.7%),且类群间也存在差异。例如,甲壳类和贝类存在植食者(如红螯螳臂相手蟹、红树拟蟹守螺等),故凋落物对甲壳类(9.9%)和贝类(11.3%)的贡献率高于鱼类(3.7%);而鱼类不存在植食者,凋落物可能是间接贡献者,故占比较低。通常,红树林底栖动物的主要食物来源并非是红树林叶片凋落物,而是凋落物分解后产生的有机碎屑。Henriques 等发现红树植物的叶片凋落物对底栖动物食物的贡献率最低^[46],故凋落物对林内底栖动物食物来源的贡献率较低。

5 结论

沿浦湾红树林底栖动物共存在 3 个营养级,其中鱼类的营养级较高,且食物链长度和营养多样性处于

较高水平,具有较强的环境适应能力。贝类营养级总体较低,且营养级跨度较大,物种之间营养特征相似度较低,但其多样性水平高。甲壳类位于食物网中间营养级位置,其食物来源较广,但物种间营养级跨度小,抗干扰能力相对较差。总体上,不同类群生物的营养生态位存在部分重叠,表明部分物种间存在一定程度的种间竞争关系。SOM 是红树林底栖动物主要潜在碳源,其对鱼类、甲壳类和贝类的贡献率达 71.4%、61.2% 和 47.4%,远高于 POM、浮游植物和凋落物。因此,在开展红树林底栖动物多样性保护时应多关注甲壳类的食物来源及其环境适应性,建议通过拓宽 SOM 来源途径以构建红树林底栖动物多元化食物供给体系。

参考文献:

- [1] 石莉. 中国红树林及其生态环境功能的综合分析与研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
Shi Li. Comprehensive analysis of mangrove in China and its eco-environmental functions[D]. Qingdao: Ocean University Of China, 2003.
- [2] Mattone C, Sheaves M. Mangrove forest ecological function is influenced by the environmental settings and the benthic fauna composition[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2024, 309: 108959.
- [3] 严丽君, 王普, 施启龙, 等. 动物食性分析在生态学中的应用研究进展——基于 DNA 宏条形码技术[J]. *生态学报*, 2023, 43(8): 3007–3019.
Yan Lijun, Wang Pu, Shi Qilong, et al. Applications of animal diet analysis based on DNA metabarcoding in ecological research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(8): 3007–3019.
- [4] Zhao Yongsong, Yang Tao, Shan Xiujian, et al. Stable isotope analysis of food web structure and the contribution of carbon sources in the sea adjacent to the Miaodao Archipelago (China)[J]. *Fishes*, 2023, 7(1): 32.
- [5] Giarrizzo T, Schwamborn R, Saint-Paul U. Utilization of carbon sources in a northern Brazilian mangrove ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 95(4): 447–457.
- [6] Noghabi N A, Shojaei M G, Farahani M M, et al. Stable isotopes reveal the food sources of benthic macroinvertebrates in the arid mangrove ecosystem of the persian gulf[J]. *Estuaries and Coasts*, 2022, 45(7): 2241–2253.
- [7] Bouillon S, Koedam N, Raman A, et al. Primary producers sustaining macro-invertebrate communities in intertidal mangrove forests[J]. *Oecologia*, 2002, 130(3): 441–448.
- [8] 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.
- [9] 张欢, 谢平, 吴功果, 等. 日本沼虾与秀丽白虾的营养生态位[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(1): 22–26.
Zhang Huan, Xie Ping, Wu Gongguo, et al. Studies on trophic niches of macrobrachium nipponensis and exopalaemon modestus[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(1): 22–26.
- [10] 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.
- [11] Muro-Torres V M, Amezcua F, Soto-Jiménez M, et al. Primary sources and food web structure of a tropical wetland with high density of mangrove forest[J]. *Water*, 2020, 12(11): 3105.
- [12] 上官明珠, 胡成业, 王晶, 等. 我国北缘红树林大型底栖动物群落 beta 多样性格局及其驱动因素[J/OL]. *水产学报*, 1–13[2024–12–26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20231206.1637.002.html>.
Shangguan Mingzhu, Hu Chengye, Wang Jing, et al. Beta diversity patterns and its driving factors of the northern margin mangrove macrobenthos community in China[J/OL]. *Journal of Fisheries of China*, 1–13[2024–12–26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20231206.1637.002.html>.
- [13] 范魏丰, 唐荣叶, 俞越, 等. 潮汕海岸带红树林小型底栖动物的群落特征及生态环境质量评价[J]. *海洋学报*, 2024, 46(5): 68–80.
Fan Weifeng, Tang Rongye, Yu Yue, et al. Meiofaunal community and eco-environment quality evaluation in mangroves off Chaoshan coastal zone[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(5): 68–80.
- [14] Post M D. Individual variation in the timing of ontogenetic niche shifts in largemouth bass[J]. *Ecology*, 2003, 84(5): 1298–1310.

- [15] Fry B. Food web structure on Georges Bank from stable C, N, and S isotopic compositions[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33(5): 1182–1190.
- [16] Ben-David M, Flaherty E A. Stable isotopes in mammalian research: a beginner's guide[J]. *Journal of Mammalogy*, 2012, 93(2): 312–328.
- [17] Cabana G, Rasmussen J B. Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1996, 93(20): 10844–10847.
- [18] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703–718.
- [19] 徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的可变性及对营养级评价的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 8–20.
Xu Jun, Zhang Min, Xie Ping. Variability of stable nitrogen isotopic baselines and its consequence for trophic modeling[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 8–20.
- [20] Abrantes K, Sheaves M. Incorporation of terrestrial wetland material into aquatic food webs in a tropical estuarine wetland[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80(3): 401–412.
- [21] 贺泽华. 珠江口淇澳红树林水域主要鱼类营养生态位和耳石微化学研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2024.
He Zehua. Trophic niche and otolith microchemistry of major fish in the pearl river estuary qi'ao mangrove water area[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2024.
- [22] 蒋日进. 枸杞岛近岸海域食物网结构研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
Jiang Rijin. Research on the food web structure in the costal areas of Gouqi island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [23] 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.
- [24] 彭彪彪, 王思凯, 赵峰, 等. 长江口盐沼湿地 3 种亚生境中国花鲈的碳、氮稳定同位素特征及基础食源差异[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(2): 295–303.
Peng Biaobiao, Wang Sikai, Zhao Feng, et al. Carbon and nitrogen isotopic characteristics and food source differences of *Lateolabrax maculatus* in three sub habitats of salt marsh wetland in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(2): 295–303.
- [25] Hobson K A. Trophic relationships among high Arctic seabirds: insights from tissue-dependent stable-isotope models[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, 95(1/2): 7–18.
- [26] Kamimura S, Tsuchiya M. The effect of feeding behavior of the gastropods *Batillaria zonalis* and *Cerithideopsis cingulata* on their ambient environment[J]. *Marine Biology*, 2004, 144(4): 705–712.
- [27] Wang Sikai, Chu Tianjiang, Huang Danqing, et al. Incorporation of exotic *Spartina alterniflora* into diet of deposit-feeding snails in the Yangtze river estuary salt marsh: stable isotope and fatty acid analyses[J]. *Ecosystems*, 2014, 17(4): 567–577.
- [28] 王瑁, 高雪芹, 丁弈朋, 等. 海南清澜港不同栖息位置红树林软体动物的食物来源[J]. *湿地科学*, 2015, 13(2): 171–176.
Wang Mao, Gao Xueqin, Ding Yipeng, et al. Identification of the food sources of mangrove molluscs from different microhabitats at Qinglangang, Hainan[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(2): 171–176.
- [29] Kjeldgaard M K, Hewlett J A, Eubanks M D. Widespread variation in stable isotope trophic position estimates: patterns, causes, and potential consequences[J]. *Ecological Monographs*, 2021, 91(3): e01451.
- [30] Zanden M J V, 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.
- [31] Ziolkowska M, Sokołowski A. Variation of food web structure in macrobenthic communities in low diversity system as determined by stable isotope-based community-wide metrics[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 274: 107931.
- [32] 游欣欣, 卞超, 陈清明, 等. 弹涂鱼两栖习性的基因组学研究进展[J]. *海洋渔业*, 2015, 37(5): 479–484.
You Xin Xin, Bian Chao, Chen Jieming et al. Recent advances in genomic study on amphibious mudskippers[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(5): 479–484.
- [33] Ponce T, Cubillos L A, Ciancio J, et al. Isotopic niche and niche overlap in benthic crustacean and demersal fish associated to the bottom trawl fishing in south-central Chile[J]. *Journal of Sea Research*, 2021, 173: 102059.
- [34] 程济生, 朱金声. 黄海主要经济无脊椎动物摄食特征及其营养层次的研究[J]. *海洋学报*, 1997, 19(6): 117–126.
Cheng Jisheng, Zhu Jinsheng. Study on the feeding habit and trophic level of main economic invertebrates in the Yellow Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19(6): 117–126.
- [35] 谢斌, 李云凯, 张虎, 等. 基于稳定同位素技术的海州湾海洋牧场食物网基础及营养结构的季节性变化[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2292–2298.
Xie Bin, Li Yunkai, Zhang Hu, et al. Food web foundation and seasonal variation of trophic structure based on the stable isotopic technique in the marine ranching of Haizhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2292–2298.
- [36] 张丽源. 沿浦湾大型底栖动物优势种生境适宜性研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022.
Zhang Liyuan. Habitat suitability of dominant macrobenthic species in Yanpu Bay[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.
- [37] 马荣荣, 宋超, 王好, 等. 崇明东滩南部大弹涂鱼食源的稳定同位素分析[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(4): 419–426.

- Ma Rongrong, Song Chao, Wang Yu, et al. Stable isotope analysis of food source of *Boleophthalmus pectinirostris* collected from the south of Chongming Dongtan saltmarsh[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(4): 419–426.
- [38] 丁福红, 毛守康, 雷霖霖, 等. 我国植物食性海水鱼类养殖发展前景[J]. *海洋科学*, 2014, 38(11): 131–137.
- Ding Fuhong, Mao Shoukang, Lei Jilin, et al. Prospect of herbivorous fish in marine aquaculture of China[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(11): 131–137.
- [39] 杨睿尧. 海漂垃圾堆积对九龙江口红树林大型底栖动物群落结构及食源的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023, doi: 10.27314/d.cnki.gsscu.2023.000381.
- Yang Ruiyao. Effects of marine debris accumulation on community structure and food sources of mangrove macrobenthos in Jiulong river estuary[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023, doi: 10.27314/d.cnki.gsscu.2023.000381.
- [40] 宋建达. 北部湾拟穴青蟹食源分析及摄食不同饵料对其生长的影响[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- Song Jianda. Analysis of food source of mud crab (*Scylla paramamosain*) in Beibu Gulf and effect of different baits on its growth[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [41] 吕聪聪, 马亚东, 水柏年, 等. 瓯江口红树林沉积物有机碳埋藏及来源特征和影响因素[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(10): 2688–2696.
- Lyu Congcong, Ma Yadong, Shui Bonian, et al. Burial, source characteristics and influencing factors of organic carbon in mangrove sediments at the mouth of the Oujiang River Estuary, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(10): 2688–2696.
- [42] Kristensen E, Bouillon S, Dittmar T, et al. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: a review[J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 201–219.
- [43] 王宗林, 吴沿友, 邢德科, 等. 泉州湾红树林湿地土壤 CO₂ 通量周期性变化特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2563–2568.
- Wang Zonglin, Wu Yanyou, Xing Deke, et al. Periodic characteristics of soil CO₂ flux in mangrove wetland of Quanzhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(9): 2563–2568.
- [44] Vizzini S, Mazzola A. Sources and transfer of organic matter in food webs of a Mediterranean coastal environment: evidence for spatial variability[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 66(3/4): 459–467.
- [45] Hadwen W L, Russell G L, Arthington A H. Gut content- and stable isotope-derived diets of four commercially and recreationally important fish species in two intermittently open estuaries[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2007, 58(4): 363–375.
- [46] Henriques M, Granadeiro J P, Piersma T, et al. Assessing the contribution of mangrove carbon and of other basal sources to intertidal flats adjacent to one of the largest West African mangrove forests[J]. *Marine Environmental Research*, 2021, 169: 105331.

The study of trophic niche and potential food sources of benthic animals in mangrove from Yanpu Bay

Qu Yuwei¹, Guo Meirong², Shui Bonian¹, Zhu Daqian¹, Zhang Na¹, Ma Yadong¹, Feng Jiayu¹, Hu Chengye¹

(1. School Of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Zhejiang Marine Ecology and Environment Monitoring Center, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Mangroves represent the most productive ecosystem along the coastline. The mangrove forest is a source of diverse organic carbon, which contributes to the complexity of the trophic structure of the benthic food web. This study employed the benthic animals in the mangroves along Yanpu Bay as the research object, analysing the community trophic structure and determining the potential food sources through the utilisation of the stable isotope technique in conjunction with the Stable Isotope Bayesian Ellipses (SIBER) model and the Stable Isotope Mixing Models (Simmr). The study demonstrated that the carbon stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$) values of benthic animals ranged from -22.04% to -11.27% , while the nitrogen stable isotope ($\delta^{15}\text{N}$) values ranged the trophic levels ranged from 1.33 (*Cerithidea rhizophorarum*) to 3.95 (*Periophthalmus cantonensis*), with carbon stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$) values from 5.86% to 16.21% . The trophic level of fish is relatively high, ranging from 2.38 to 3.95, while that of crustaceans is 2.61 to 3.52. In contrast, the trophic level of mollusc is relatively low, ranging from 1.33 to 3.15. These differences are related to the feeding preferences of the different groups. The analysis of the nutritional structure indicates that the length of the food chain and the nutritional diversity of fish are greater than those of crustaceans and mollusc. The diversity of food sources and nutritional uniformity of crustaceans are the highest, while the nutrition-

al diversity and similarity of mollusc are the highest. Overall, there is a varying degree of overlap between the core nutritional niches of fish, crustaceans and mollusc. An analysis of the potential food sources of benthic animals based on a Simmr mixed model revealed that SOM was the primary carbon source, accounting for 78.2% of the total, followed by phytoplankton, which constituted 21.6% of the total, while litter and POM represented the lowest proportions, at 3.7% and 3.3%, respectively. The findings of this study enhance our comprehension of the trophic relationships of benthic animals in mangrove ecosystems along the northern coast of China. They will facilitate more effective conservation and restoration of mangrove biodiversity from a trophic regulation perspective.

Key words: mangrove; benthic animals; trophic niche; food sources