

张传鑫, 陈静, 纪莹璐, 等. 基于碳氮稳定同位素技术的小清河口邻近海域底栖食物网结构研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(1): 89–100, doi:10.12284/hyxb2022016

Zhang Chuanxin, Chen Jing, Ji Yinglu, et al. Benthic food web structure of Xiaqing River Estuary adjacent sea area revealed by carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(1): 89–100, doi:10.12284/hyxb2022016

基于碳氮稳定同位素技术的小清河口 邻近海域底栖食物网结构研究

张传鑫^{1,2}, 陈静², 纪莹璐³, 陈琳琳², 李海汇⁴, 王全超², 李宝泉^{2*}, 邢荣莲^{1*}

(1. 烟台大学 生命科学学院, 山东 烟台 264005; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 3. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061; 4. 寿光市海洋渔业发展中心, 山东 寿光 262700)

摘要: 为了掌握小清河口邻近海域底栖食物网结构特征, 于 2020 年 10 月在小清河口邻近海域采集沉积物有机质、悬浮颗粒有机物、浮游动物和浮游植物 4 种潜在食源及 35 种生物样本, 应用碳氮稳定同位素技术以及贝叶斯混合模型 (MixSIAR) 分析了小清河口邻近海域底栖食物网结构和营养关系。结果显示, 潜在食源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-25.56\text{‰} \sim -17.91\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $2.43\text{‰} \sim 10.33\text{‰}$; 底栖生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-23.48\text{‰} \sim -18.31\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $8.79\text{‰} \sim 18.01\text{‰}$; 底栖生物营养级范围为 1.65 (凸壳肌蛤) \sim 3.54 (中华栉孔虾虎鱼)。营养关系分析表明, 小清河口邻近海域主要存在两条能量传递途径, 一是以浮游生物为主要能量来源的浮游食物链, 其中双壳类 (除短竹蛏)、小型虾类和多毛类等为主要初级消费者; 二是以沉积物有机质为主要能量来源的底层食物链, 短竹蛏和腹足类为主要初级消费者。整体而言, 小清河口邻近海域底栖生物类群间存在一定程度的生态位重叠, 竞争较为激烈。

关键词: 小清河口邻近海域; 食物网结构; 营养级; 稳定同位素; 食源; 营养生态位

中图分类号: Q178.53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)01-0089-12

1 引言

随着沿海城市和农业的发展, 河口生态系统进一步受到人类活动的干扰, 是最易受到威胁和发生变化的水生生态系统之一^[1]。小清河是流入莱州湾的主要河流, 河口呈喇叭状, 滩面平缓, 粉砂底质等水文地貌特征使水力停留时间较长^[2], 且随着工业的发展, 大量工业废水和生活污水的排放, 影响到小清河口及邻近海域的生态环境质量^[3]以及渔业资源的健康发展, 并

可能进一步影响到水生生物群落的食物网结构。

食物网是实现生态系统功能的主要渠道, 也是保护生物多样性的重要途径, 在生态系统的管理和保护方面起到了重要作用^[4]。探究河口生态系统中生物的食物网特征和营养关系, 建立该区域基础食物网, 则能更好地了解河口复杂生态系统的物质循环和能量流动过程、生物群落组成结构以及物种之间的取食关系^[5]。食物网的传统研究方法是胃含物分析法, 通过分析捕食者胃含物的种类组成、数量和重量等, 确定食物网

收稿日期: 2021-07-07; 修订日期: 2021-09-04。

基金项目: 美丽中国生态文明建设科技工程专项 (XDA23050304); 中国科学院国际合作局国际伙伴计划对外合作重点项目 (133137KYSB 20200002)。

作者简介: 张传鑫 (1996—), 男, 山东省济南市人, 从事底栖生物生理生态及底栖食物网研究。E-mail: chuanxin96@163.com

* 通信作者: 李宝泉 (1972—), 男, 研究员, 主要从事海洋生物学研究。E-mail: bqli@yic.ac.cn; 邢荣莲 (1977—), 女, 教授, 主要从事海洋生物技术与工程研究。E-mail: xingronglian@163.com

的基本结构与营养关系,该方法直观,但带有偶然性,可反映生物短时间内的食性^[6-7];而稳定同位素示踪技术则可准确定量较长时期的摄食情况,较真实地反映食物网中生物的营养等级和能量流动,是目前研究生态系统有机物来源和食物网结构的重要研究手段^[1,5,8-9]。

碳稳定同位素比值,主要用于确定消费者食物的组成与来源^[10];而氮稳定同位素比值随着营养级升高具有明显富集,通常用来研究食物网的结构与营养级^[11],将碳、氮稳定同位素结合使用可以更有效地揭示有机质的来源、消费者的食物组成以及各生物在食物网中所处的营养级。当同位素数量为 n , 而食源数量大于 $n+1$ 时,生物之间的营养关系无法采用标准线性混合模型进行计算^[12-13],而利用贝叶斯混合模型(Mix-SIAR)可以计算多种来源的食物对目标生物的贡献比例,且能提高贡献比例的估算准确度^[14]。

以往关于小清河口及邻近海域的研究主要集中在生态系统的环境状况与生物群落变化情况,对于营养结构的研究较为缺乏^[2-3,15]。本研究应用碳氮稳定同位素技术和贝叶斯混合模型(MixSIAR)对小清河口邻近海域底栖食物网结构和营养关系进行研究,初步构建小清河口邻近海域生态系统的基础食物网,估算潜在食源对不同功能群的食源贡献率,辨识主要消费者的营养位置,以期为小清河口邻近海域生物多样性保护与生态系统的可持续发展提供基础依据。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

于 2020 年 10 月在寿光小清河口邻近海域(37°15'54"~37°24'32"N, 119°08'14"~119°14'16"E)使用拖网渔船进行样品采集(图 1)。调查网具为单船底拖网(网长为 46 m,网宽为 35 m,网口高为 3.6 m,网目直径为 2 cm),平均拖速为 2.5 kn,每网拖行时间为 30 min。共设置 12 个生物采样站位,采集的生物样本包括鱼类、甲壳类、头足类、腹足类、双壳类等,潜在食源样本包括沉积物有机质(Sediment Organic Matter, SOM)、悬浮颗粒有机物(Suspended Particulate Organic Matter, POM)、浮游植物和浮游动物。样品的采集和处理方法遵照《海洋监测规范 第 3 部分:样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3-2007)进行^[16]。

2.1.1 潜在食源样本采集和处理

采集方法:采用抓斗式采泥器抓取表层沉积物,取 1~2 cm 处泥样于聚乙烯袋中,得到 SOM 样本;使用有机玻璃采水器在距水面 0.5 m 深处采集 2 L 海水,用两个 1 L 聚乙烯瓶保存,得到 POM 样本;浮游动物样本采集使用浅水 II 型浮游生物网,水平拖网表层海水,冲网至 1 L 聚乙烯瓶中保存;浮游植物样本采集使用浅水 III 型浮游生物网,自底层至表层垂直

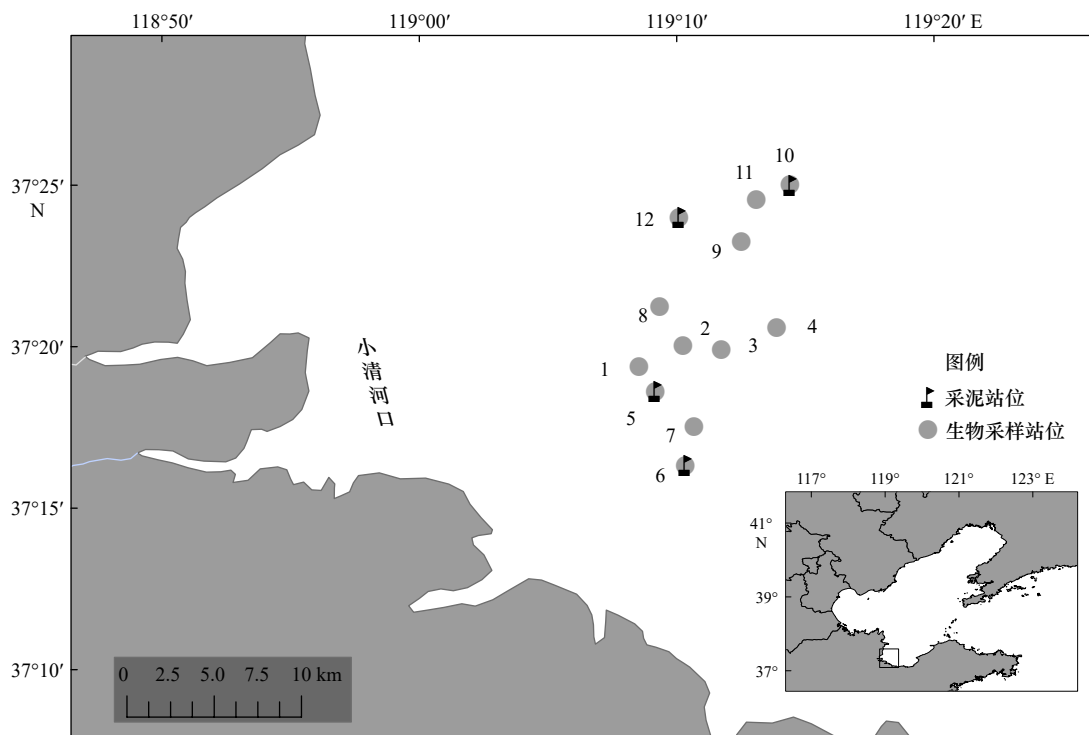


图 1 小清河口邻近海域拖网站位图

Fig. 1 Trawling stations of the Xiaqing River Estuary adjacent sea area

拖网, 冲洗至 1 L 聚乙烯瓶中保存; 以上所有样本均冷冻保存。

室内处理: SOM 样本经过 1 mol/L 的稀盐酸酸化处理后过孔径为 63 μm 的筛绢, 得到 SOM。POM 样本经孔径为 150 μm 的筛绢过滤后, 抽滤到预先经 450 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧 5 h 的 What-man GF/F 滤膜上, 得到 POM。浮游动物样本过孔径为 200 μm 的筛绢, 在显微镜下使用干净的镊子挑出杂质后, 得到浮游动物。浮游植物样本过孔径为 100 μm 的筛绢, 除去浮游动物和杂质, 抽滤到预先经 450 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧 5 h 的 What-man GF/F 滤膜上, 得到浮游植物。

2.1.2 生物样本采集和处理

采集方法: 采用底拖网渔船沿河口断面拖行获取底栖生物样品, 并结合抓斗式采泥器采集底栖动物样品。采集到的样品冷冻保存, 带回实验室后, 进行物种鉴定和体长、体重测量。

室内处理: 每个物种选取 3 个大小相近的个体 (采样数量小于 3 的物种取全部个体), 鱼类取第一背鳍下方肌肉, 虾类取腹部肌肉, 蟹类取第一螯足肌肉, 头足类取腕部肌肉, 腹足类去壳取肌肉, 双壳类取闭壳肌^[17]。所有样品去离子水冲洗干净后放入离心管, 冷冻干燥机 (SCIENTZ-18N) 干燥 48 h 后, 用玛瑙研钵研磨成粉。

2.2 碳氮稳定同位素的测定和营养级计算

2.2.1 碳氮稳定同位素测定

将上述样品装入锡囊, 用 Mat253 同位素质谱仪 (Thermo Fisher, 美国) 进行测定。碳稳定同位素的标准物采用美洲拟箭石 (Pee Dee Belemnite, PDB), 氮稳定同位素的标准物采用空气中纯净的 N_2 。碳氮稳定同位素比值以国际通用的 δ 值形式表示:

$$\delta X = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}) - 1] \times 1000, \quad (1)$$

式中, X 表示 ^{13}C 或 ^{15}N ; R 表示 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 精密度小于 0.20‰^[18]。

2.2.2 营养级计算

本研究以浮游植物为初级生产者, 以浮游动物^[19]和双壳类^[10-11]作为基准生物, 计算不同底栖生物所对应的营养级 (TL), 公式如下^[19]:

$$\text{TL} = \{[\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - [\delta^{15}\text{N}_{\text{base1}}\alpha + \delta^{15}\text{N}_{\text{base2}} \times (1 - \alpha)]] / \Delta\delta^{15}\text{N} + \lambda, \quad (2)$$

$$\alpha = (\delta^{13}\text{C}_{\text{consumer}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{base2}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{base1}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{base2}}), \quad (3)$$

式中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{consumer}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 分别为消费者的碳、氮稳定同位素比值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{base1}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{base1}}$ 分别为浮游动物的平均碳、氮稳定同位素比值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{base2}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{base2}}$ 分别为双壳类的平均碳、氮稳定同位素比值; $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为氮稳定同

位素富集度, 此处取 5.6‰^[20]; λ 为基准消费者营养级, 确定为 2^[11,19]。

2.3 生态位分析和食源分析

考虑到生态位总面积 (Total Area, TA) 可能因个别数据产生偏差, 使用贝叶斯标准椭圆面积 (Standard Ellipse Area, SEA) 可减少样本误差, 当样本数小于 30 时, 采用校正标准椭圆面积 (SEAc) 可减少因样本数较少而产生的误差, 其公式为

$$\text{SEAc} = \text{SEA} \times (n-1) \times (n-2)^{-1}. \quad (4)$$

基于 SEAc 在 δ -空间中的分布 (95% 置信区间), 计算 7 种生物类群 (双壳类、鱼类、虾类、腹足类、蟹类、头足类和多毛类、棘皮动物) 的生态位重叠概率^[21]。

35 种底栖生物按照食源组成划分为浮游和碎屑食性、杂食性、肉食性 3 个类群^[5,22]。使用 R 软件 (版本: 4.0.5) 的 MixSIAR 模型, 估算潜在食源对不同功能群的食源贡献率。由于各食源贡献率范围未知, 在模拟中采用没有先验信息的狄克雷分布, 即假设所有比例出现的概率相同^[23]。同位素营养富集因子在生物中波动较大, 在不同生物类群中采用不同的营养富集因子, 取值范围: $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 为 $-1.0\text{‰} \sim 2.0\text{‰}$, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为 $0.4\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$ ^[20,24-25]。

2.4 数据分析

数据的分析处理在 Excel 2010 和 SPSS 26.0 中进行, 数值差异显著性采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和非参检验 (Kruskal-Wallis Test), 当 p 小于 0.05 时表示存在显著性差异。利用 ArcMap 10.3 绘制小清河口邻近海域拖网站位图, 利用 R 语言中的 MixSIAR 模型进行消费者食源分析, 利用 ggplot 2 绘制营养级图。用 R 语言的 SIBER 包绘制 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 组成的贝叶斯标准椭圆图, 并计算不同底栖类群的营养生态位相关参数。

3 结果

3.1 小清河口邻近海域碳、氮稳定同位素特征

3.1.1 潜在食源稳定同位素特征

小清河口邻近海域共采集潜在食源样本 15 个, 其中 POM、SOM、浮游植物样本各 4 个, 浮游动物样本 3 个 (表 1)。小清河口邻近海域潜在食源中 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-25.56\text{‰} \sim -17.91\text{‰}$, 平均值为 $-21.65\text{‰} \pm 2.69\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值的范围为 $2.43\text{‰} \sim 10.33\text{‰}$, 平均值为 $6.72\text{‰} \pm 2.84\text{‰}$ 。平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值由高到低依次为浮游动物、POM、SOM、浮游植物, 平均 $\delta^{15}\text{N}$ 值由高到低依次为浮游动物、浮游植物、POM、SOM。单因素方差分析显示, 浮游植物与浮游动物和 POM 的碳稳定同位素比值之

表1 小清河口邻近海域潜在食源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及 $\delta^{15}\text{N}$ 值Table 1 The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of potential food source in the Xiaqing River Estuary adjacent sea area

潜在食源	站位	$\delta^{13}\text{C}$ 值/‰ (均值±标准差)	$\delta^{15}\text{N}$ 值/‰ (均值±标准差)
沉积物有机质	5	-23.79±0.33	3.23±0.30
	6	-24.32±0.10	2.43±0.12
	10	-21.55±0.26	3.69±0.26
	12	-18.58±0.51	4.53±0.08
悬浮颗粒有机物	1	-23.09±0.17	7.50±0.24
	4	-20.54±0.12	8.16±0.22
	6	-17.91±0.23	7.47±0.25
	11	-19.73±0.02	2.77±0.22
浮游植物	1	-23.53±0.05	5.42±0.06
	4	-25.44±0.22	8.91±0.02
	6	-23.69±0.05	9.61±0.04
	12	-25.56±0.04	9.86±0.22
浮游动物	4	-19.41±0.22	10.17±0.13
	11	-18.09±0.28	10.33±0.11
	12	-19.53±0.74	6.69±0.61

间存在显著差异, SOM与浮游植物和浮游动物的氮稳定同位素比值之间存在显著差异($p<0.05$), 而整体上同一食源不同站位样本之间碳($p=0.185>0.05$)、氮($p=0.053>0.05$)稳定同位素比值没有显著性差异。

3.1.2 底栖生物稳定同位素特征

共采集到底栖生物样品35种, 其中腹足类6种、甲壳类10种、鱼类10种、双壳类6种、头足类1种、多毛类1种、棘皮动物1种, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为-23.48‰~-18.31‰, 平均值为-19.76‰±1.26‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值最大的为焦氏舌鳎(-18.31‰±0.06‰), 最小的为凸壳肌蛤(-23.48‰±0.05‰); $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围为8.79‰~18.01‰, 平均值为14.11‰±1.98‰, $\delta^{15}\text{N}$ 值最大的为中华栉孔虾虎鱼(18.01‰±0.13‰), 最小的为短竹蛭(8.79‰±0.09‰)。本研究中平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值由高到低依次为多毛类、棘皮动物、鱼类、腹足类、甲壳类、头足类、双壳类, 平均 $\delta^{15}\text{N}$ 值由高到低依次为头足类、甲壳类、鱼类、腹足类、双壳类、棘皮动物、多毛类。小清河口邻近海域底栖生物的碳、氮稳定同位素值存在显著性差异($p<0.05$)(表2)。

3.2 生态位和营养级

小清河口邻近海域底栖动物7种底栖生物类群的营养生态位及生态位重叠状况如图2所示。生态

表2 小清河口邻近海域底栖生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及 $\delta^{15}\text{N}$ 值Table 2 The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of benthos in the Xiaqing River Estuary adjacent sea area

物种	拉丁名	站位	体长/mm	样本数	$\delta^{13}\text{C}$ 值/‰	$\delta^{15}\text{N}$ 值/‰
双壳类*						
毛蚶	<i>Anadara kagoshimensis</i>	4、6、9	26.84±2.98	3	-21.35±0.08	12.87±0.12
日本镜蛤	<i>Dosinorbis japonica</i>	2	48.02	1	-20.61±0.03	13.53±0.21
菲律宾蛤仔	<i>Ruditapes philippinarum</i>	4、6	26.53±1.55	2	-22.68±0.01	13.08±0.03
文蛤	<i>Meretrix meretrix</i>	6	48.99	1	-22.21±0.02	14.42±0.08
凸壳肌蛤	<i>Arcuatula senhousia</i>	6	13.61±2.25	2	-23.48±0.05	12.87±0.71
短竹蛭	<i>Solen brevissimus</i>	10	11.61±0.78	2	-20.22±0.12	8.79±0.09
腹足类*						
斑纹无壳侧鳃	<i>Pleurbranchaea novaezealandiae</i>	10	-	2	-18.35±0.18	11.75±0.29
经氏壳蛞蝓	<i>Philine kinglipini</i>	6、10	-	6	-20.7±0.27	11.58±0.13
红带织纹螺	<i>Nassarius succinctus</i>	6	-	12	-19.02±0.05	14.85±0.12
纵肋织纹螺	<i>Nassarius variciferus</i>	7、11	-	28	-18.91±0.07	14.14±0.18
扁玉螺	<i>Neverita didyma</i>	3	30.00±2.58	2	-19.06±0.18	13.31±0.17
脉红螺	<i>Rapana venosa</i>	8	53.6±21.00	2	-20.68±0.15	13.71±0.17
多毛类						
不倒翁虫	<i>Sternaspis scutata</i>	10	-	1	-18.32±0.12	11.17±0.00

续表 2

物种	拉丁名	站位	体长/mm	样本数	$\delta^{13}\text{C}$ 值/‰	$\delta^{15}\text{N}$ 值/‰
棘皮动物						
棘刺锚参	<i>Protankyra bidentata</i>	5、6、10	54.21±5.33	3	-18.75±0.10	11.75±0.00
虾类						
口虾蛄	<i>Oratosquilla oratoria</i>	9	99.80±3.86	3	-19.59±0.24	16.84±0.22
细螯虾	<i>Leptochela gracilis</i>	7	-	12	-21.46±0.15	13.54±0.15
葛氏长臂虾	<i>Palaemon gravieri</i>	1、7	84.78±10.20	3	-19.16±0.06	14.13±0.20
鹰爪虾	<i>Trachysalambria curvirostris</i>	5、7、10、11	30.29±5.26	9	-19.32±0.03	15.43±0.16
中国明对虾	<i>Penaeus chinensis</i>	9	44.09±2.52	2	-20.05±0.03	16.35±0.04
日本鼓虾	<i>Alpheus japonicus</i>	9、12	26.17±3.10	5	-18.69±0.18	13.95±0.38
蟹类**						
日本拟平家蟹	<i>Heikeopsis japonica</i>	5、10	-	7	-19.14±0.02	15.7±0.03
日本蜆	<i>Charybdis japonica</i>	2、9、10	37.41±1.56	4	-19.37±0.01	16.22±0.16
隆线强蟹	<i>Eucrate crenata</i>	2、3	31.13±6.48	5	-18.72±0.04	15.31±0.16
寄居蟹	<i>Pagurus minutus</i>	6	-	5	-19.69±0.21	15.42±0.15
鱼类						
髯缟虾虎鱼	<i>Tridentiger barbatus</i>	8	65.67	1	-19.17±0.02	15.52±0.10
方氏云鳚	<i>Pholis fangi</i>	7	143.29±1.29	2	-20.83±0.09	13.77±0.18
普氏缟虾虎鱼	<i>Acentrogobius pflaumi</i>	12	77.91±4.45	2	-19.48±0.02	16.33±0.11
多鳞鳊	<i>Sillago sihama</i>	10	132.46	1	-18.72±0.11	12.03±0.22
斑尾刺虾虎鱼	<i>Acanthogobius ommaturus</i>	3	217.79	1	-18.95±0.03	16.97±0.10
中华栉孔虾虎鱼	<i>Ctenotrypauchen chinensis</i>	1、7	84.78±10.20	3	-19.25±0.02	18.01±0.13
朝鲜斜棘鳚	<i>Callionymus koreanus</i>	1、6	78.47±7.36	2	-19.97±0.01	15.13±0.19
日本带鱼	<i>Trichiurus lepturus</i>	12	312.00	1	-19.07±0.04	13.83±0.19
焦氏舌鳎	<i>Cynoglossus joyneri</i>	5、8	137.84±8.00	2	-18.31±0.06	11.83±0.14
矛尾虾虎鱼	<i>Chaeturichthys stigmatias</i>	1、9、12	103.60±10.25	3	-18.72±0.11	13.13±0.11
头足类***						
日本枪乌贼	<i>Loliolus japonica</i>	7、10	42.80±7.02	4	-19.79±0.10	16.69±0.06

注: *代表以壳宽表示体长; **代表以头胸甲宽表示体长; ***代表以胴长表示体长; -代表无调查数据。

位宽度由大到小依次为双壳类(TA=11.007, SEA=5.881, SEAc=6.249)、鱼类(TA=8.289, SEA=4.235, SEAc=4.386)、虾类(TA=6.574, SEA=3.707, SEAc=3.939)、腹足类(TA=6.960, SEA=3.616, SEAc=3.842)、蟹类(TA=0.777, SEA=0.444, SEAc=0.489)、多毛类和棘皮动物(TA=0.127, SEA=0.101, SEAc=0.126)、头足类(TA=0.003, SEA=0.004, SEAc=0.005)。整体来看, 小清河口邻近海域底栖动物7种底栖生物类群存在一定程度的生态位重叠现象, 各底栖生物类群之间竞争激烈, 其中鱼类和虾类之间营养生态位重叠概率最高, 为51.73%。

本研究以双壳类和浮游动物作为基准生物, 计算不同底栖生物所对应的营养级并绘制营养级(图3)。结果如下, 小清河口邻近海域底栖生物营养级范围为1.65(凸壳肌蛤)~3.54(中华栉孔虾虎鱼), 其中腹足类动物营养级范围为2.06(经氏壳蛞蝓)~3.03(红带纹织螺), 甲壳类动物营养级范围为2.24(细螯虾)~3.26(口虾蛄), 鱼类营养级范围为2.42(方氏云鳚)~3.54(中华栉孔虾虎鱼), 双壳类营养级范围为1.65(凸壳肌蛤)~2.43(日本镜蛤), 日本枪乌贼营养级为3.18, 不倒翁虫营养级为2.54, 棘刺锚参营养级为2.54。

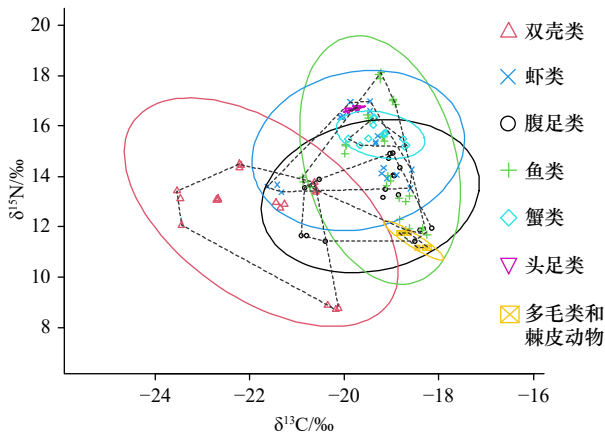


图2 小清河口邻近海域底栖动物营养生态位及生态位重叠状况

Fig. 2 The nutritional niche and niche overlap of benthos in the Xiaoqing River Estuary adjacent sea area

3.3 小清河口邻近海域底栖生物的食物源

基于 MixSIAR 模型对 35 种底栖生物的食物源进行溯源, 将其划分为浮游和碎屑食性、杂食性、肉食性 3 个类群。其中, 浮游和碎屑食性类群: 以悬浮颗粒有机物、浮游动物、浮游植物和沉积物碎屑为食, 主要包括双壳类(短竹蛭、凸壳肌蛤、菲律宾蛤仔、毛蚶、文蛤和日本镜蛤)、小型虾类(细螯虾)、不倒翁虫和棘刺锚参; 杂食性类群: 以悬浮颗粒有机物、浮游动物、浮游植物、沉积物碎屑、双壳类和多毛类为食, 主要包括腹足类(纵肋织纹螺、红带织纹螺、扁玉螺、脉红螺、经氏壳蛞蝓和斑纹无壳侧鳃)和小型蟹类(寄居蟹、隆线强蟹、日本拟平家蟹); 肉食性类群: 以浮游动物、双壳类、小型虾类(细螯虾)、小型蟹类、小型鱼类(方氏云鳎、多鳞鳢和朝鲜斜棘鲷)、腹

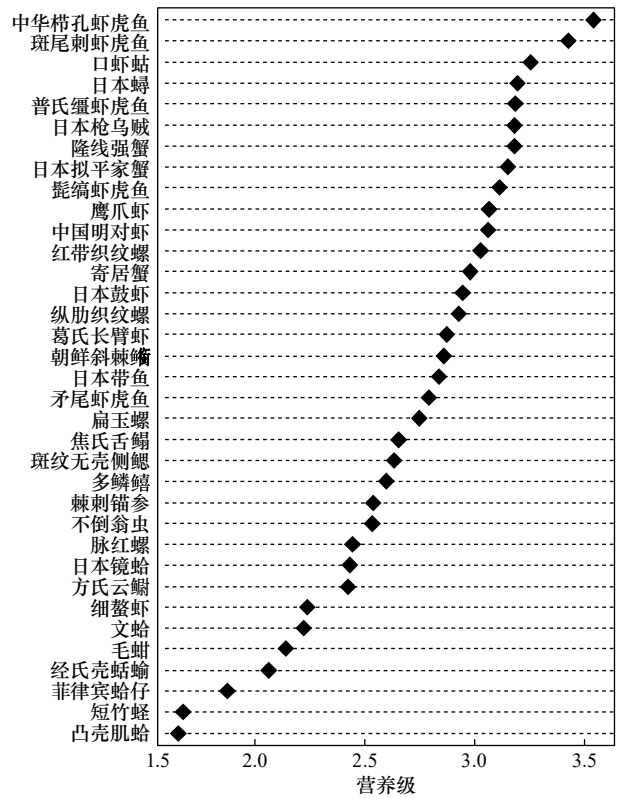


图3 小清河口邻近海域底栖动物的营养级

Fig. 3 Trophic levels of benthos in Xiaoqing River Estuary adjacent sea area

足类和多毛类为食, 主要包括大型鱼类(斑尾刺虾虎鱼、中华栉孔虾虎鱼、普氏缙虾虎鱼、髯缙虾虎鱼)、中型鱼类(日本带鱼、矛尾虾虎鱼和焦氏舌鳎)、小型鱼类、大型虾蟹类(口虾蛄、中国明对虾、鹰爪虾和日本蛄)、中型虾类(日本鼓虾、葛氏长臂虾)和头足类。

各类群食物贡献率如表 3 所示, 浮游和碎屑食性

表 3 小清河口邻近海域底栖生物食物贡献率

Table 3 Food contribution rate of benthos in the Xiaoqing River Estuary adjacent sea area

类群	物种	(平均贡献率±标准差)/%									
		悬浮颗粒有机物(POM)	沉积物有机质(SOM)	浮游植物	浮游动物	双壳类	多毛类	小型虾类	小型蟹类	腹足类	小型鱼类
浮游和碎屑食性	不倒翁虫	44.8±17.7	6.6±8.5	4.8±4.0	43.7±14.4	-	-	-	-	-	-
	棘刺锚参	26.8±18.8	13.7±12.4	8.6±5.4	50.9±13.3	-	-	-	-	-	
	毛蚶	13.1±9.8	9.9±7.5	49.2±4.6	27.9±7.1	-	-	-	-	-	
	日本镜蛤	7.9±6.1	5.9±4.7	41.1±4.0	45.1±5.7	-	-	-	-	-	
	菲律宾蛤仔	11.0±7.5	7.8±6.5	69.7±5.1	11.5±5.5	-	-	-	-	-	
	文蛤	1.7±2.1	1.4±1.8	67.2±3.8	29.7±3.9	-	-	-	-	-	
	凸壳肌蛤	5.7±5.5	12.2±7.8	79.1±5.7	3.0±2.6	-	-	-	-	-	
	短竹蛭	27.8±22.1	50.3±21.3	9.5±7.1	12.4±7.9	-	-	-	-	-	
	细螯虾	7.6±6.3	5.4±4.6	53.7±4.1	33.3±5.7	-	-	-	-	-	

续表 3

类群	物种	(平均贡献率±标准差)/%									
		悬浮颗粒有机物(POM)	沉积物有机质(SOM)	浮游植物	浮游动物	双壳类	多毛类	小型虾类	小型蟹类	腹足类	小型鱼类
杂食性	斑纹无壳侧鳃	47.7±9.5	3.1±3.1	2.2±2.2	12.2±14.2	10.6±7.9	24.4±16.3	-	-	-	-
	经氏壳蛞蝓	11.5±12.5	38.0±14.3	9.3±9.8	6.2±6.9	18.8±9.5	15.3±10.7	-	-	-	-
	红带织纹螺	7.0±6.1	3.8±2.9	5.2±4.1	10.5±13.3	26.7±9.5	47.8±19.1	-	-	-	-
	纵肋织纹螺	13.7±9.3	5.1±4.1	4.4±3.7	15.4±17.2	21.5±11.1	40.1±21.5	-	-	-	-
	扁玉螺	24.4±13.1	7.8±6.5	4.7±4.2	13.8±16.4	23.0±12.6	26.7±19.2	-	-	-	-
	脉红螺	8.7±7.6	17.7±12.9	18.2±13.8	7.7±9.6	30.5±17.3	15.9±12.2	-	-	-	-
	日本拟平家蟹	4.2±4.0	2.1±1.8	4.1±3.6	9.2±11.9	40.7±7.5	41.4±16.7	-	-	-	-
	隆线强蟹	3.1±3.1	1.4±1.3	2.6±2.7	14.2±18.5	26.2±6.0	53.7±22.4	-	-	-	-
	寄居蟹	10.0±7.3	6.0±4.4	4.6±4.9	7.8±9.6	52.2±10.6	19.4±12.9	-	-	-	-
肉食性	葛氏长臂虾	-	-	-	12.3±16.1	27.4±17.7	25.3±18.7	14.3±13.1	-	20.7±24.4	-
	鹰爪虾	-	-	-	14.2±13.9	64.5±14.8	10.0±9.8	3.5±5.5	-	7.9±14.0	-
	方氏云鳚	-	-	-	2.3±3.4	2.8±3.6	7.0±4.7	83.9±4.4	-	3.9±5.9	-
	多鳞鳊	-	-	-	1.9±7.7	1.1±1.4	78.3±9.4	16.3±3.8	-	2.4±6.7	-
	朝鲜斜棘鳚	-	-	-	4.1±6.1	58.0±14.2	7.1±6.7	21.7±11.9	-	9.0±12.3	-
	口虾蛄	-	-	-	4.7±5.2	49.7±20.7	6.1±4.8	4.4±4.8	27.1±14.8	4.5±5.6	3.6±6.4
	日本鼓虾	-	-	-	40.0±20.0	7.0±8.3	15.2±14.0	6.3±5.8	6.9±5.6	18.3±25.7	6.3±11.7
	中国明对虾	-	-	-	4.2±4.5	9.4±13.8	9.8±5.8	29.3±6.1	36.1±8.1	6.3±6.9	4.9±6.8
	日本带鱼	-	-	-	9.4±12.4	9.3±9.1	37.8±17.0	8.8±6.0	8.6±5.6	18.0±23.0	8.2±12.8
	斑尾刺虾虎鱼	-	-	-	6.5±7.0	3.3±4.0	14.6±7.5	2.2±2.1	66.1±4.9	4.8±6.7	2.4±3.9
	中华栉孔虾虎鱼	-	-	-	2.1±2.3	5.8±6.5	3.5±2.6	4.8±3.5	78.6±4.8	2.8±3.2	2.3±3.2
	普氏缯虾虎鱼	-	-	-	5.4±5.9	10.2±11.8	12.3±7.7	13.0±5.8	43.2±7.7	8.8±9.9	7.1±10.2
	髯缯虾虎鱼	-	-	-	6.5±7.4	8.7±9.2	23.6±10.9	7.9±4.5	35.6±7.4	11.2±13.3	6.6±9.5
	焦氏舌鳎	-	-	-	1.5±2.6	1.0±1.1	92.9±3.3	1.1±1.0	1.3±1.0	1.3±2.0	0.9±1.4
	矛尾虾虎鱼	-	-	-	7.6±11.1	7.2±7.2	58.2±14.9	4.4±3.6	6.9±4.6	11.3±16.3	4.4±7.6
	日本鳎	-	-	-	6.5±7.1	11.9±12.6	12.2±8.1	9.7±5.6	41.3±8.4	10.8±11.7	7.6±10.7
	日本枪乌贼	-	-	-	4.2±4.6	15.7±20.8	8.2±5.5	19.6±7.5	42.0±12.8	5.9±6.7	4.4±6.7

注: -代表无食物贡献。

的生物类群中,以 POM 和 SOM 为主要食源的包括短竹蛭、不倒翁虫和棘刺锚参,以浮游生物为主要食源的包括双壳类(除短竹蛭外)和小型虾类(细螯虾);以小型虾类、双壳类和多毛类为主要食源的包括杂食性类群中的腹足类、小型蟹类和肉食性类群中的小型鱼类;肉食性类群中的大中型鱼类、大中型虾蟹类和头足类食性相对较为广泛,以多毛类、小型虾蟹类和双壳类为主要食源。

3.4 食物网结构

基于小清河口邻近海域底栖生物的营养级和食

源特征初步构建底栖食物网结构(图 4),主要存在两条能量传递途径,一是以浮游生物为主要能量来源的浮游食物链,其中双壳类(除短竹蛭外)、小型虾类、不倒翁虫和棘刺锚参为主要初级消费者;二是以 SOM 为主要能量来源的底层食物链,其中短竹蛭和腹足类为主要初级消费者。

4 讨论

4.1 小清河口邻近海域碳、氮稳定同位素特征

小清河口邻近海域潜在食源由 POM、SOM、浮

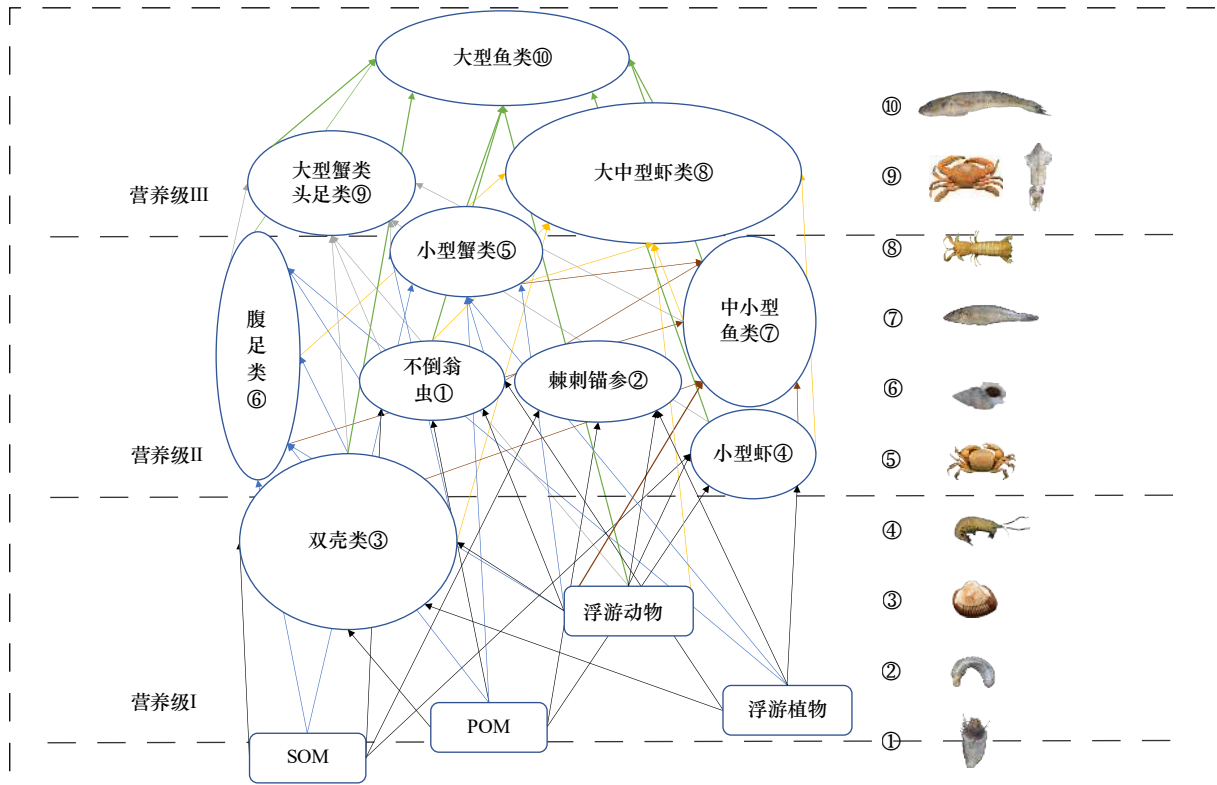


图 4 小清河河口邻近海域底栖动物食物网结构

Fig. 4 The structure of benthos food web in the Xiaoqing River Estuary adjacent sea area

①不倒翁虫; ②棘刺锚参; ③毛蚶; ④细螯虾; ⑤隆线强蟹; ⑥纵肋织纹螺; ⑦多鳞鳎; ⑧口虾蛄; ⑨日本蛄、日本枪乌贼; ⑩斑尾刺虾虎鱼
 ①*Sternaspis scutata*; ②*Protankyra bidentata*; ③*Anadara kagoshimensis*; ④*Leptocheila gracilis*; ⑤*Eucrate crenata*; ⑥*Nassarius variciferus*; ⑦*Sillago sillago*; ⑧*Oratosquilla oratoria*; ⑨*Charybdis japonica*, *Loliolus japonica*; ⑩*Acanthogobius ommaturus*

游植物和浮游动物构成, 与黄海相比^[5], 潜在食源 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度相对较小, $\delta^{15}\text{N}$ 值跨度相对较大, 且 POM 和浮游植物的氮稳定同位素比值较大, 不同站位间同一食源碳稳定同位素比值无显著性差异, 氮稳定同位素比值有差异不显著, 整体来说, 离河口较近的 1 号站位及靠近龙威渔港的 4 号和 6 号站位潜在食源氮稳定同位素比值相对较高, 这是由于这些站点离岸较近, 潜在食源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化特征和人类活动引起的营养输入关系紧密^[25], 频繁人类活动对小清河河口潜在食源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值产生影响。小清河河口邻近海域浮游植物的碳稳定同位素比值显著比 POM 和浮游动物小, 而黄海的研究显示浮游植物碳稳定同位素比值同样小于浮游动物, 但高于 POM^[5], 这是由于浮游植物为浮游动物或其他水生生物提供直接或间接的食物来源, 是水生食物网的基础^[26]; SOM 的氮稳定同位素比值显著比浮游植物和浮游动物小, 符合莱州湾沉积物氮稳定同位素比值的范围^[27]。

小清河河口邻近海域底栖动物碳、氮稳定同位素比值存在显著差异, 碳同位素高的生物与底栖食物网有关, 低的生物与浮游食物网有关^[28], 说明本研究区域存在浮游食物链和底层食物链。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为

$-23.48\text{‰} \sim -18.31\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围为 $8.79\text{‰} \sim 18.01\text{‰}$, 基本符合渤海常见海洋生物的碳氮稳定同位素比值范围($-21.95\text{‰} \sim -15.14\text{‰}$, $9.22\text{‰} \sim 16.66\text{‰}$)^[29]。碳值跨度只有 5.17‰ , 但氮值跨度为 9.22‰ , 平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均比黄河口和长江口区域高, 但 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度显著低于黄河口和长江口区域^[30-31], 这表明小清河河口区域底栖动物的食源多样性没有河口三角洲生态系统复杂, 生物对食源的选择性较低, $\delta^{15}\text{N}$ 值跨度低于黄河口区域而高于长江口区域^[30-31], 可能是由于本研究所获种类大多为底栖生物, 中上层种类较为缺乏。部分底栖生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值相对较大, 则是因为之前小清河河口受污染程度相对较重, 虽然近年来有所改善, 但沉积物和水体中氮含量仍相对较高^[27,32]。沉积物有机质中氮累积会导致生物氮稳定同位素值发生变化, 如澳大利亚东南部河口地区生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值会随着沉积物有机质中氮累积的增加而变大^[33]; 其次氮含量较高水体中初级生产者 $\delta^{15}\text{N}$ 值也偏高^[34], 通过食物链传递导致部分消费者的 $\delta^{15}\text{N}$ 值上升。

4.2 生态位和营养级

描述生态位关系最重要的两个指标是生态位宽

度和生态位重叠,其中生态位宽度表示物种对栖息地和资源利用及竞争能力的强弱,而生态位重叠表示不同物种间的竞争关系程度^[35]。小清河口邻近海域双壳类的 SEAc 最大,说明双壳类比其他底栖生物类群占据了更广的生态位,7种底栖生物类群存在一定程度的生态位重叠现象,说明各底栖生物类群之间竞争激烈,其中鱼类、虾类、双壳类和腹足类之间营养生态位重叠均较高,表明这些种群的食物来源较为接近,竞争激烈;头足类、蟹类、多毛类和棘皮动物所占生态位较小,与其他类群间重叠度不高,但完全被虾类、鱼类和腹足类所覆盖,说明其对资源的需求高度相似,存在较为激烈的竞争。

基准生物一般选择营养级较低的初级消费者,而选取生物的不同将导致营养级产生差异^[36-37],由于浮游动物和双壳类动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化较大,本研究选取双壳类和浮游动物的平均 $\delta^{15}\text{N}$ 值作为基准生物的氮稳定同位素值。水域环境中较高氮浓度会导致生物间氮的富集度变大^[33-34],考虑到小清河口污染程度相对较重,且本研究生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值相对较大,因此选择氮稳定同位素富集度为 5.6‰。研究表明,最低营养级生物为凸壳肌蛤,最高营养级生物为中华栉孔虾虎鱼,而非日本带鱼,已有研究表明,由于食物来源发生变化,北部湾日本带鱼的营养生态位变化明显,在资源利用和环境适应方面都有所下降^[38],此外生物体长也会产生不同程度影响^[39],本次调查中捕获的日本带鱼个体偏小,摄食能力与成年个体相比较弱也是导致其所处营养级较低的原因。除日本带鱼外大部分生物基本符合渤海常见生物的营养水平^[29,40],其中鱼类营养级跨度为 1.12,大于甲壳类、双壳类、腹足类的营养级跨度,进一步说明鱼类与其他物种之间竞争激烈。

4.3 食物网结构和营养关系

小清河口邻近海域底栖食物网主要由浮游食物链和底层食物链构成,大部分生物位于浮游食物链,与长江口浮游生物食性的水生生物所占比例升高^[6]的特征相似,而张波等^[41]对莱州湾渔业资源调查显示该区域食物链越来越短,食物网主要通过碎屑食物链传递能量,这是因为本次调查为秋季 10 月份,大量渔业活动过后,个体较小,游泳能力较强的生物占主体。李凡等^[42]发现,浮游动物食性的种团在春季和秋季均占绝对优势,这与本研究结论相似。主要鱼类的食源组成广泛,对浮游动物、双壳类、小型虾类、小

型蟹类、腹足类、多毛类、小型鱼类皆有摄食,其中对双壳类、多毛类和小型虾蟹类的食用比例较大,这是由于一个营养群包含具有类似营养位置的生物,但其成员可能摄食不同的饵料且在食物网内有不同的生态功能^[43],亦表明由于食源多样性有限,加剧了该区域生物对资源的竞争程度。杂食性类群腹足类和小型蟹类捕食较多的是双壳类和多毛类,而大型蟹类和头足类除捕食双壳类和多毛类外,多以腹足类和小型蟹类为食,不仅种内竞争激烈,种间竞争同样激烈。

根据秋季(10月)小清河口邻近海域底栖食物网各生物的食性和营养级,将底栖生物主要分为 3 个营养层次,即初级消费者、次级消费者和高级消费者,初级消费者主要为浮游和碎屑食性类群,包括双壳类、不倒翁虫、棘刺锚参和小型虾类(细螯虾),次级消费者主要为杂食性类群,包括腹足类、小型蟹类(寄居蟹、隆线强蟹和日本拟平家蟹)和小型鱼类(方氏云鳎、多鳞鳕和朝鲜斜棘鳎),高级消费者主要为肉食性类群,包括大型鱼类(斑尾刺虾虎鱼、中华栉孔虾虎鱼、普氏缙虾虎鱼、髭缙虾虎鱼)、中型鱼类(日本带鱼、矛尾虾虎鱼和焦氏舌鳎)、大型虾蟹类(口虾蛄、中国明对虾、鹰爪虾和日本蛄)、中型虾类(日本鼓虾、葛氏长臂虾)和头足类。这一结果同黄海大型底栖动物食物网营养结构基本一致^[5],符合我国近海和莱州湾海洋食物网的特征^[6,42,44-46]。

5 结论

(1)小清河口邻近海域潜在食源平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值由大到小依次为浮游动物、POM、SOM、浮游植物,平均 $\delta^{15}\text{N}$ 值由大到小依次为浮游动物、浮游植物、POM、SOM;底栖生物平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值由大到小依次为多毛类、棘皮动物、鱼类、腹足类、甲壳类、头足类、双壳类,平均 $\delta^{15}\text{N}$ 值由大到小依次为头足类、甲壳类、鱼类、腹足类、双壳类、棘皮动物、多毛类。

(2)小清河口邻近海域底栖生物的营养级范围为 1.65(凸壳肌蛤)~3.54(中华栉孔虾虎鱼),存在浮游食物链和底层食物链两条能量传递途径,分为初级消费者、次级消费者与高级消费者 3 个营养层次。

(3)底栖生物类群之间存在一定程度的生态位重叠现象,竞争较为激烈,其中鱼类和虾类竞争最为激烈;而且食物网结构受小清河口近海区域环境质量与当地渔业捕捞的影响。

参考文献:

- [1] Donázar-Aramendía I, Sánchez-Moyano J E, García-Asencio I, et al. Human pressures on two estuaries of the Iberian Peninsula are re-

- flected in food web structure[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 11495.
- [2] 陈斌, 黄海军, 严立文, 等. 小清河口附近海域泥沙运动特征及风场对泥沙输运的影响[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 104–112.
Chen Bin, Huang Haijun, Yan Liwen, et al. Sediment movement and the effect of wind to sediment transport near Xiaqing River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(2): 104–112.
- [3] 沈佳裕, 罗先香, 郑浩, 等. 小清河口及邻近海域表层沉积物重金属污染及生态风险特征[J]. *环境化学*, 2017, 36(7): 1516–1524.
Shen Jiayu, Luo Xianxiang, Zheng Hao, et al. Pollution and ecological risk characteristics of heavy metals in surface sediments in Xiaqing River Estuary and adjacent sea areas[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(7): 1516–1524.
- [4] McDonald-Madden E, Sabbadin R, Game E T, et al. Using food-web theory to conserve ecosystems[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10245.
- [5] 刘晓收, 倪大朋, 钟鑫, 等. 黄海大型底栖动物食物网结构和营养关系研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(9): 20–33.
Liu Xiaoshou, Ni Dapeng, Zhong Xin, et al. Structure of benthic food web and trophic relationship of Macrofauna in the Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(9): 20–33.
- [6] 徐超, 王思凯, 赵峰, 等. 长江口水生动物食物网营养结构及其变化[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(1): 155–164.
Xu Chao, Wang Sikai, Zhao Feng, et al. Trophic structure of food web and its variation on aquatic animals in the Yangtze Estuary[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(1): 155–164.
- [7] Cortés E. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: application to elasmobranch fishes[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(3): 726–738.
- [8] Preciado I, Cartes J E, Punzón A, et al. Food web functioning of the benthopelagic community in a deep-sea seamount based on diet and stable isotope analyses[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 137: 56–68.
- [9] Mieczan T, Michał N, Adamczuk M, et al. Stable isotope analyses revealed high seasonal dynamics in the food web structure of a peat-bog[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2015, 100(5/6): 141–150.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261–269.
- [13] 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.
- [14] Phillips D L, Inger R, Bearhop S, et al. Best practices for use of stable isotope mixing models in food-web studies[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2014, 92(10): 823–835.
- [15] Luo Xianxiang, Zhang Shanshan, Yang Jianqiang, et al. Macrobenthic community in the Xiaqing River Estuary in Laizhou Bay, China[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(3): 366–372.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.3–2007, 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.3–2007, The specification for marine monitoring—Part3: Sample collection, storage and transportation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [17] 刘博, 陈琳琳, 李宝泉, 等. 碳氮稳定同位素比值在潮间带大型底栖动物组织间差异性研究[J]. *海洋学报*, 2019, 41(4): 74–82.
Liu Bo, Chen Linlin, Li Baoquan, et al. Carbon and nitrogen stable isotopes variations in different tissues of macrobenthos in the intertidal zone[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(4): 74–82.
- [18] Bouaziz R, Le Loc'h F, Rolet C, et al. Structure and seasonal variability in fish food webs in a small macrotidal estuary (Canche estuary, Eastern English Channel) based on stable carbon and nitrogen isotope analysis[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 44: 101694.
- [19] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703–718.
- [20] Caut S, Angulo E, Courchamp F. Variation in discrimination factors ($\Delta^{15}\text{N}$ and $\Delta^{13}\text{C}$): the effect of diet isotopic values and applications for diet reconstruction[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(2): 443–453.
- [21] 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.
- [22] 李少文, 刘元进, 李凡, 等. 莱州湾大型底栖动物功能群现状[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 380–388.
Liu Shaowen, Liu Yuanjin, Li Fan, et al. Macrobenthic functional groups in Laizhou Bay, East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 380–388.
- [23] Boggie M A, Carleton S A, Collins D P, et al. Using stable isotopes to estimate reliance on agricultural food subsidies and migration timing for a migratory bird[J]. *Ecosphere*, 2018, 9(2): e02083.
- [24] Greer A L, Horton T W, Nelson X J. Simple ways to calculate stable isotope discrimination factors and convert between tissue types[J].

- Methods in Ecology and Evolution, 2015, 6(11): 1341–1348.
- [25] 陈展彦, 武海涛, 王云彪, 等. 基于稳定同位素的湿地食物源判定和食物网构建研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2389–2398.
Chen Zhanyan, Wu Haitao, Wang Yunbiao, et al. Research progress on food sources and food web structure of wetlands based on stable isotopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2389–2398.
- [26] 韩琼, 王宝利. 浮游植物稳定碳同位素分馏机制及环境应用[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1436–1443.
Han Qiong, Wang Baoli. Mechanisms of stable carbon isotope fractionation by phytoplankton and its environmental applications[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1436–1443.
- [27] 张明亮, 姜美洁, 付翔, 等. 莱州湾沉积物有机质来源[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(4): 741–746.
Zhang Mingliang, Jiang Meijie, Fu Xiang, et al. The source of organic matter in the sediment of Laizhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(4): 741–746.
- [28] Davenport S R, Bax N J. A trophic study of a marine ecosystem off southeastern Australia using stable isotopes of carbon and nitrogen[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59(3): 514–530.
- [29] Qu Pei, Wang Qixiang, Pang Min, et al. Trophic structure of common marine species in the Bohai Strait, North China Sea, based on carbon and nitrogen stable isotope ratios[J]. Ecological Indicators, 2016, 66: 405–415.
- [30] Liu Qi, Yi Yujun, Hou Chuanying, et al. Response of trophic structure and isotopic niches of the food web to flow regime in the Yellow River estuary[J]. Marine Geology, 2020, 430: 106329.
- [31] 闫光松, 张涛, 赵峰, 等. 基于稳定同位素技术对长江口主要渔业生物营养级的研究[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3131–3136.
Yan Guangsong, Zhang Tao, Zhao Feng, et al. A study on trophic level of the major fishery species from the Yangtze Estuary based on stable isotope technology[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 3131–3136.
- [32] 李昶, 陈丽贵, 何造胜. 莱州湾小清河入海口水质变化及成因分析[J]. 环境与发展, 2020, 32(11): 118–119, 121.
Li Chang, Chen Ligui, He Zaosheng. Analysis of water quality change and causes of Xiaqing River Estuary in Laizhou Bay[J]. Environment and Development, 2020, 32(11): 118–119, 121.
- [33] Mazumder D, Saintilan N, Alderson B, et al. Inputs of anthropogenic nitrogen influence isotopic composition and trophic structure in SE Australian estuaries[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 100(1): 217–223.
- [34] McClelland J W, Valiela I, Michener R H. Nitrogen-stable isotope signatures in estuarine food webs: a record of increasing urbanization in coastal watersheds[J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(5): 930–937.
- [35] 银利强, 孔业富, 吴忠鑫, 等. 南海中西部海域春季三种金枪鱼类的营养生态位比较[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4121–4130.
Yin Liqiang, Kong Yefu, Wu Zhongxin, et al. Trophic niche comparison among three tuna species caught from central and western South China Sea in spring[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(12): 4121–4130.
- [36] 张硕, 高世科, 于雯雯, 等. 碳、氮稳定同位素在构建海洋食物网及生态系统群落结构中的研究进展[J]. 水产养殖, 2019, 40(7): 6–10.
Zhang Shuo, Gao Shike, Yu Wenwen, et al. Research progress of stable carbon and nitrogen isotopes in the construction of marine food web and ecosystem community structure[J]. Journal of Aquaculture, 2019, 40(7): 6–10.
- [37] 贡艺, 陈玲, 李云凯. 海洋生态系统稳定同位素基线的选取[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2399–2404.
Gong Yi, Chen Ling, Li Yunkai. Selection of isotopic baselines in marine ecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2399–2404.
- [38] 何雄波, 李波, 王锦溪, 等. 不同时期北部湾日本带鱼营养生态位差异[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 683–690.
He Xiongbo, Li Bo, Wang Jinxi, et al. Changes in the trophic niche of *Trichiurus japonicus* in the Beibu Gulf in different periods[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 683–690.
- [39] Ji Weiwei, Chen Xuezhong, Jiang Yazhou, et al. Trophic ecology of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis* Bleeker): stable carbon and nitrogen isotope evidence[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(5): 1033–1040.
- [40] 田甲申, 李多慧, 王摆, 等. 运用稳定同位素技术研究大凌河、鸭绿江近岸海域春季主要生物种类的营养级[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1181–1186.
Tian Jiashen, Li Duohui, Wang Bai, et al. Assessment of the trophic level of main fishery species in coastal waters of Daling River and Yalu River based on stable isotope technique[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1181–1186.
- [41] 张波, 吴强, 金显仕. 1959–2011年莱州湾渔业资源群落食物网结构的变化[J]. 中国水产科学, 2015, 22(2): 278–287.
Zhang Bo, Wu Qiang, Jin Xianshi. Interannual variation in the food web of commercially harvested species in Laizhou Bay from 1959 to 2011[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(2): 278–287.
- [42] 李凡, 徐炳庆, 马元庆, 等. 莱州湾鱼类群落同功能种团的季节变化[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1736–1745.
Li Fan, Xu Bingqing, Ma Yuanqing, et al. Seasonal changes of functional guilds of fish community in Laizhou Bay, East China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1736–1745.
- [43] 蔡德陵, 李红燕, 唐启升, 等. 黄东海生态系统食物网连续营养谱的建立: 来自碳氮稳定同位素方法的结果[J]. 中国科学C辑: 生命科学, 2005, 48(6): 531–539.
Cai Deling, Li Hongyan, Tang Qisheng, et al. Establishment of trophic continuum in the food web of the Yellow Sea and East China Sea ecosystem: insight from carbon and nitrogen stable isotopes[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2005, 48(6): 531–539.
- [44] 高春霞, 戴小杰, 田思泉, 等. 基于稳定同位素技术的浙江南部近海主要渔业生物营养级[J]. 中国水产科学, 2020, 27(4): 438–453.

- Gao Chunxia, Dai Xiaojie, Tian Siqian, et al. Trophic structure of major fishery organisms in the offshore waters of southern Zhejiang: insights from stable isotope analysis[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(4): 438–453.
- [45] 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.
- [46] 王萃, 杜双成, 杨婷越, 等. 应用稳定同位素技术评价大连近岸海域食物网营养结构[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1452–1457.
- Wang Luo, Du Shuangcheng, Yang Tingyue, et al. Using stable isotopes to evaluate food web structure in Dalian coastal water[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1452–1457.

Benthic food web structure of Xiaoqing River Estuary adjacent sea area revealed by carbon and nitrogen stable isotope analysis

Zhang Chuanxin^{1,2}, Chen Jing², Ji Yinglu³, Chen Linlin², Li Haihui⁴,
Wang Quanchao², Li Baoquan², Xing Ronglian¹

(1. College of Life Sciences, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 3. North China Sea Marine Forecasting Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 4. Shouguang Marine Fishery Development Center, Shouguang 262700, China)

Abstract: To examine the benthos food web structure in the Xiaoqing River Estuary adjacent sea area, four potential food sources, including sediment organic matter (SOM), suspended particulate organic matter (POM), zooplankton and phytoplankton, and 35 aquatic organisms are collected in October 2020. Carbon and nitrogen stable isotope technique and Bayesian mixing model (MixSIAR) are used to analyze the food web structure and the trophic relationship of benthos. The results show that the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of potential food sources varies from -25.56‰ to -17.91‰ and 2.43‰ to 10.33‰ , respectively. Moreover, the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of benthos varies from -23.48‰ to -18.31‰ and 8.79‰ to 18.01‰ , respectively. The trophic levels of the main consumers rang from 1.65 (*Arcuatula senhousia*) to 3.54 (*Ctenotrypauchen chinensis*). Trophic relationship analysis shows that there are two main energy transfer pathways in the Xiaoqing River Estuary adjacent sea area. One is the planktonic food chain with plankton as the major energy source, in which bivalves (except *Solen brevissimus*), small shrimps, and polychaetes are the main primary consumers. The other is the benthic food chain with SOM as the major energy source, in which *Solen brevissimus* and gastropods are the main primary consumers. On the whole, there is a certain degree of niche overlap and fierce competition among species in the Xiaoqing River Estuary adjacent sea area.

Key words: Xiaoqing River Estuary adjacent sea area; food web structure; trophic level; stable isotope; food source; nutritional niche