

DOI: 10.12264/JFSC2023-0132

## 万山群岛秋季鱼类营养级及营养生态位研究

石娟<sup>1,2</sup>, 李纯厚<sup>1,2</sup>, 王腾<sup>1,2</sup>, 赵金发<sup>1,2</sup>, 宋晓宇<sup>1,2</sup>, 王春伶<sup>3</sup>, 刘永<sup>1,2</sup>, 吴鹏<sup>1,2</sup>

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东珠江口生态系统野外科学观测研究站, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300;
2. 西沙岛礁渔业生态系统海南省野外科学观测研究站/海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室/三亚热带水产研究院, 海南 三亚 572018;
3. 中国科学院水生生物研究所 湖北 武汉 430072

**摘要:** 为探究万山群岛鱼类群落的营养结构特征, 构建万山群岛渔业生物简要食物网, 于 2021 年秋季(9 月)利用稳定同位素技术分析了万山群岛主要渔业生物的营养结构特征, 并计算了其营养结构的量化指标。结果表明, 万山群岛海域鱼类  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围为 $-21.23\text{‰}$  (鲮 *Mugil cephalus*)~ $-14.00\text{‰}$  (黑边布氏鲷 *Eubleekeria splendens*), 均值为 $(-16.96\pm 0.41)\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围为 $9.93\text{‰}$  (卵形鲳鲹 *Trachinotus ovatus*)~ $14.83\text{‰}$  (截尾白姑鱼 *Pennahia anea*), 均值为 $(12.52\pm 0.34)\text{‰}$ , 鱼类的营养级变化范围为 $2.54\sim 3.98$ , 平均营养级为 $3.30$ 。鱼类的  $\delta^{13}\text{C}$  变幅(CR)为 $7.23$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  变幅(NR)为 $4.90$ , 凸多边形总面积(TA)为 $23.64$ , 矫正后的标准椭圆面积(SEAc)为 $3.73$ , 平均离心距离(CD)为 $1.30$ , 平均最邻近距离(MNND)和平均最邻近距离标准差(SDNND)均为 $0.24$ 。基于碳氮稳定同位素值可将万山群岛的鱼类划分为 3 个类群, 分别是浮游食性鱼类 4 种(3.57%)、底栖食性鱼类 7 种(6.25%)和低级肉食性鱼类 101 种(90.18%)。Bayesian 混合模型计算万山群岛海域鱼类的食物主要来源于浮游动物(zooplankton), 其贡献率为 $62.54\%$ , 其次是藻类贡献率为 $25.28\%$ 。本研究初步构建了万山群岛鱼类连续营养谱, 对掌握万山群岛海域食物网与营养结构特征有重要意义, 可为万山群岛生态系统的保护与管理提供有力的数据支撑。

**关键词:** 万山群岛; 珠江口; 营养生态位; 营养级; 食物网

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)07-0891-16

珠江口是中国三大河口之一, 作为陆地与海洋的过渡带, 是亚热带众多水生生物的重要栖息场所, 是营养物质、有机物、沉积物的必要通道, 具有极其重要的渔业生态保护价值, 长期以来受到世界各地广泛关注<sup>[1]</sup>。万山群岛是珠江口外以半环状分布的一组岛屿群, 介于珠海与香港之间, 与南海交汇, 是我国南海重要关口, 华南地区海上贸易往来的咽喉之地<sup>[2]</sup>。万山群岛拥有优越的

地理条件, 岛屿众多, 海域辽阔, 生物资源丰富, 具有至关重要的经济战略地位。

近年来, 碳、氮稳定同位素技术被广泛应用于海洋生态系统营养结构研究并获得显著成效。稳定同位素显示了从饵料生物到消费者的富集过程, 从而得以建立物种在食物网中的相对营养位置<sup>[3]</sup>。碳稳定同位素可提供食物链中食物来源的基本信息, 而氮稳定同位素由于富集程度较大,

收稿日期: 2023-06-04; 修订日期: 2023-07-05.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901204, 2019YFD0901201); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019B1515120065); 广东省基础与应用基础研究重大项目(2019B030302004-05); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD16); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2021SD04, 2019TS28).

作者简介: 石娟(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为鱼类生态学. E-mail: sjuan0917@163.com

通信作者: 王腾, 副研究员, 研究方向为海洋鱼类生态学, E-mail: wt3074589@163.com; 刘永, 研究员, 研究方向为海洋鱼类生态学, E-mail: liuyong@scsfri.ac.cn

可用于确定其在食物链中的相对营养位置<sup>[4]</sup>。黄佳兴等<sup>[5]</sup>分析了南海中西部渔场主要渔业生物的碳氮稳定同位素特征,并以此构建了渔业生物营养级的连续营养谱。尹洪洋等<sup>[6]</sup>构建了三亚蜈支岛海洋牧场区域的食物网结构,分析了该生态系统的主要潜在碳源及其贡献率。Egan 等<sup>[7]</sup>收集了 12 种印度-太平洋水域鱼类,探究了其营养生态位差异并按照其饵料生物划分了不同营养类群。Frédérich 等<sup>[8]</sup>利用稳定同位素技术分析了宅泥鱼(*Dascyllus aruanus*)的营养生态位宽度以及摄食习性,并探究了其资源群体结构及竞争现状。Ayelen 等<sup>[9]</sup>研究了阿根廷巴塔哥尼亚中部 5 种鳐(*Bathyrja*)的营养生态位与摄食情况,评估了海域内渔业对食物网和物种的影响。

目前对万山群岛渔业生态主要集中于生态环境<sup>[10]</sup>、渔业资源<sup>[11]</sup>、浮游生物<sup>[2]</sup>、生境迁移<sup>[12]</sup>等方面的研究,对渔业生物营养生态位及食物网结构方面的研究较少。万山群岛生态系统发生的种

种变化必然会影响生物群落食物网结构与功能,从而影响生态系统的物质循环与能量流动,因此对万山群岛渔业生物营养结构的研究,有助于预测生态系统的发展趋势,促进其保护和管理措施的运行。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本研究于 2021 年 9 月 26—30 日在万山群岛海域(113.6°E~114.1°E, 21.9°N~22.2°N)通过三重刺网进行样品采集。在桂山岛、外伶仃岛、东澳岛和万山岛附近共设置 18 个站位(图 1),租用渔船于每日下午 4 时前往指定站点下网,次日早上 7 时收网。包括藻类、浮游动物类、软体动物类、甲壳类和鱼类在内的所有生物样本,在现场进行鱼类渔业资源鉴定并测量体长体重后,按地点、站位、种类标记后分类包装,与其余所有样品经过保存冰鲜后运回实验室分析。

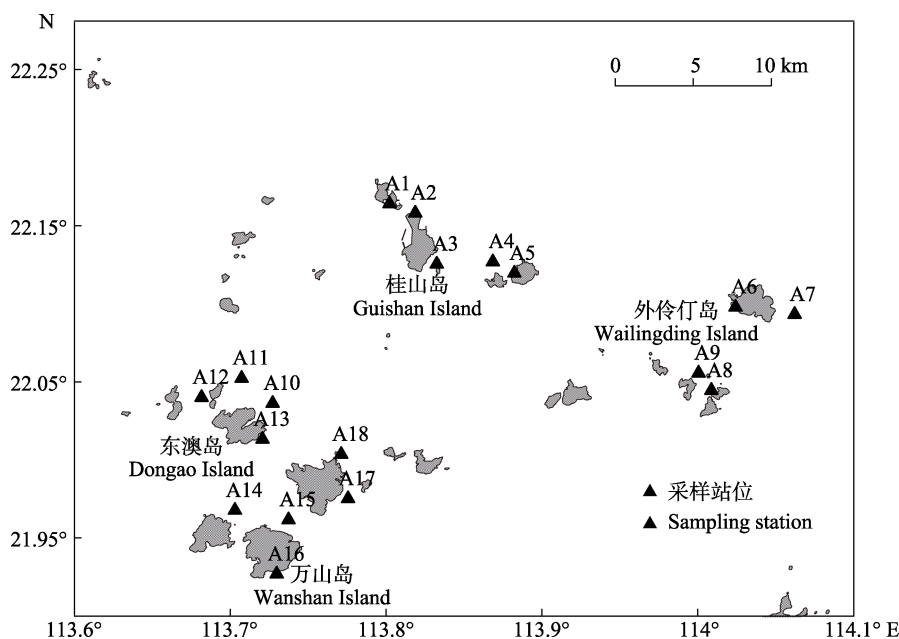


图 1 万山群岛鱼类采样站位示意图

Fig. 1 Sampling stations of fishes in Wanshan Islands

### 1.2 样品采集与处理

本研究在万山群岛海域共采集鱼类 112 种,隶属于 10 目 48 科 86 属,软体动物类 10 种,甲壳类 13 种,藻类 3 种,以及浮游动物 3 份。样品的

采集和处理方法参照《海洋调查规范第 6 部分:海洋生物调查》(GB/T12763.6-2007)<sup>[13]</sup>等有关规定和要求,藻类取自潮间带附着的藻类斑块,用少量蒸馏水反复清洗,用尖头镊子去除杂质后置于

培养皿中挑选分类, 后置于 60 °C 烘箱内烘干 24~48 h 至恒重。浮游动物取自 0~5 m 水层水平拖网(浅水 I 型网) 5 min, 将网底管收集的浮游动物样品置于筛绢(200 μm)内, 用预先经 0.45 μm 滤膜过滤的海水反复冲洗并将浮游动物截留在筛绢上, 而后将其置于预先经 0.45 μm 滤膜过滤的海水中暂养 2~4 h, 待胃排空后抽滤到预先经马弗炉 500 °C 灼烧 4~6 h 的玻璃纤维滤膜(What-man GF/F)上并用尖头镊子挑出杂质, 然后将滤膜置于 80 °C 烘箱内烘烤 24 h 至恒重。软体动物取自潮滩周围的螺类, 以及刺网捕捞起来的贝类, 甲壳类包括虾类和蟹类。

在实验室内对鱼类进行测量解剖, 体长精确到 0.1 mm, 体重精确到 0.01 g, 记录其性腺发育期和性别。鱼类取第一背鳍下方去皮后肌肉, 双壳类取闭壳肌, 腹足类去壳取肌肉, 虾类取腹部肌肉, 蟹类取第一螯足肌肉。所有样品在 60 °C 烘箱内烘干至恒重, 干燥后使用研磨仪将样品磨成粉末, 称取约 250~300 μg 粉状样品于锡杯中, 严密包埋并排出杯中空气, 记录好编号和称取质量后干燥保存, 等待进行上机检测分析。

### 1.3 数据处理

碳、氮稳定同位素测定采用 Elementar isoprime visION 稳定同位素质谱仪, C、N 分析精度均为 ±0.3‰。每测试 10 个样品加测一个标准样品, 且对个别样品进行了 2~3 次复测, 以保证实验结果的准确性, 标准样品采用国际通用的 USGS40、USGS41a、USGS65 等。

检测仪器运行时, 装有样品的锡杯依次落入高温的氧化炉中, 使样品中的氮化物和碳化物反应生成氮、碳氧化物, 然后通过还原炉将氮、碳氧化物完全还原成 N<sup>2</sup> 和 CO<sup>2</sup>。质谱仪可检测反应后的 N<sup>2</sup> 中 <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N 比率与 CO<sup>2</sup> 中 <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C 比率, 并将其与国际标准拟箭石(VPDB)和空气中的氮气进行对比, 计算出样品的稳定同位素比值。测得样品的碳氮百分含量用‰表示, 碳氮稳定同位素比值以国际通用的 δ 值形式表达:

$$\delta X = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中,  $X$  为 <sup>13</sup>C 或 <sup>15</sup>N;  $R_{\text{sample}}$  为待测样品的重、轻同位素的比值(<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C 或者 <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N),  $R_{\text{standard}}$  表示

国际通用标准物的重、轻同位素比值。

渔获生物的营养级可用 TL 表示:

$$TL = (\delta^{15}N_{\text{sample}} - \delta^{15}N_{\text{baseline}}) / \Delta\delta^{15}N + \lambda \quad (2)$$

式中,  $\delta^{15}N_{\text{sample}}$  表示该系统中待测样品的氮同位素比值,  $\delta^{15}N_{\text{baseline}}$  表示基准生物的氮同位素比值。由于本研究选取常年存在、食性简单的初级消费者翡翠贻贝(*Perna viridis*)作为基准生物,  $\delta^{15}N_{\text{baseline}}$  取值 8.10‰, 翡翠贻贝为初级消费者, 故取  $\lambda=2$ ,  $\Delta\delta^{15}N$  为相邻营养级  $\delta^{15}N$  的营养富集度, 本研究取 3.4‰<sup>[14]</sup>。

### 1.4 数据分析

Layman 等<sup>[15]</sup>与 Jackson 等<sup>[16]</sup>提出了 7 种营养生态位指标对营养结构进行量化, 可用于估算万山群岛鱼类的营养生态位, 各指标的含义如下:

(1)  $\delta^{15}N$  变幅( $\delta^{15}N$  range, NR): 表示食物来源多样性水平;

(2)  $\delta^{13}C$  变幅( $\delta^{13}C$  range, CR): 表示营养层次多样性水平;

(3) 凸多边形总面积(total area, TA): 同一物种的所有稳定同位素值做包围的凸多边形面积, 可衡量群落占据的生态位空间的总量, 表示食物网中营养多样性的总程度, 即营养生态位总宽度;

(4) 标准椭圆面积(standard ellipse area, SEA): 所有同位素点经方差矩阵数据处理绘制的椭圆面积, 较 TA 能更准确地表示物种的核心生态位, 后又延伸出矫正后的标准椭圆面积(standard ellipse area corrected, SEAc), 和贝叶斯标准椭圆面积 SEAb (standard ellipse area of Bayesian estimation, SEAb), 常用的是 SEAc, 用以表示生物对生态空间的利用情况, 表示群落或物种的核心营养生态位。

(5) 平均离心距离(mean distance to centroid, CD): 表示食物网中营养多样性平均水平;

(6) 平均最邻近距离(mean nearest neighbor distance, MNND): 表示群落的整体密度;

(7) 平均最邻近距离标准差(standard deviation of nearest neighbor distance, SDNND): 表示群落营养均匀度水平。

本研究中涉及到的统计分析均采用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行, 作图利用 Excel 2019, Surfer 12, Primer 5, Origin 2021, Adobe Photoshop

2020 和 R 4.2.1 等软件进行。Bayesian 混合模型分析参考 McCutchan 等<sup>[17]</sup>利用 R 软件的 siar 等数据包分析万山群岛藻类、浮游动物类、软体动物类、甲壳类对不同消费者的碳源贡献比例; 运用 SIBER 等数据包, 计算万山群岛不同生物类群的营养结构指标; 采用 IBM SPSS Statistics 20 中的单因素方差分析对各生物类群的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值差异进行差异分析, 显著性水平为 0.05, 极显著水平为 0.01; 基于  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值和标准化的欧氏距离, 应用 Bray-Curtis 相似性系数对样本进行组间连接等级聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 万山群岛鱼类稳定同位素特征

本研究以万山群岛各生物类群的  $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  值分别作为横纵坐标, 绘制了万山群岛鱼类的稳定同位素双位图(图 2), 其  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值、营养级和体长范围如附录 1 所示。单因素分析结果表明, 藻类和浮游动物类与其余类群的  $\delta^{13}\text{C}$  值均存在极显著差异( $P<0.01$ ); 鱼类的  $\delta^{15}\text{N}$  值与其他生物类群均存在极显著差异( $P<0.01$ )。

万山群岛海域食物网的  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围为  $-21.23\text{‰}$ ~ $-9.98\text{‰}$ , 平均值( $-16.78\pm 0.41$ ) $\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围为  $4.78\text{‰}$ ~ $14.83\text{‰}$ , 平均值( $12.00\pm 0.32$ ) $\text{‰}$ 。其中, 鱼类  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围介于  $-21.23\text{‰}$  (鲮 *Mugil cephalus*)~ $-14.00\text{‰}$  (黑边布氏鲷 *Eubleekeria splendens*), 均值为( $-16.96\pm 0.41$ ) $\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围介于  $9.93\text{‰}$  (卵形鲳鲹 *Trachinotus ovatus*)~ $14.83\text{‰}$  (截尾白姑鱼 *Pennahia anea*), 均值为( $12.52\pm 0.34$ ) $\text{‰}$ , 营养级为 3.30。甲壳类的  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围介于  $-17.55\text{‰}$  (虾未定种)~ $-15.33\text{‰}$  (逍遥馒头蟹 *Calappa philargius*), 均值为( $-16.52\pm 0.24$ ) $\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围介于  $9.34\text{‰}$  (虾未定种)~ $12.19\text{‰}$  (公鸡馒头蟹 *Calappa gallus*), 均值为( $10.97\pm 0.22$ ) $\text{‰}$ , 营养级为 2.84。软体动物类的  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围介于  $-18.20\text{‰}$  (密鳞牡蛎 *Ostrea denselamellosa*)~ $-15.98\text{‰}$  (螺未定种), 均值为( $-16.85\pm 0.28$ ) $\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围介于  $8.10\text{‰}$  (翡翠贻贝)~ $10.57\text{‰}$  (镶珠核果螺 *Drupa musiva*), 均值为( $9.42\pm 0.19$ ) $\text{‰}$ , 营养级为 2.39。

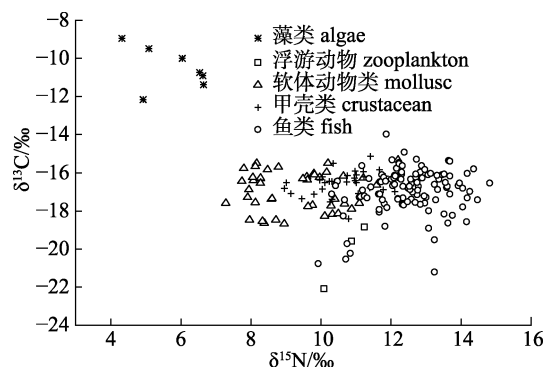


图 2 万山群岛主要渔业生物的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值双位图

Fig. 2 Bipartite map of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of the main fishery organisms in the Wanshan Islands

### 2.2 营养级与连续营养谱

本研究基于食物网营养传递过程中  $\delta^{15}\text{N}$  值的稳定性富集规律计算了万山群岛海域消费者的营养级, 以此构建万山群岛海域食物网的连续营养谱(图 3)。万山群岛各生物的营养级范围为 1.02 (藻类)~3.98 (截尾白姑鱼)。其中位于 1~2 营养级的是藻类, 位于 2~3 营养级的有 9 种软体动物、10 种甲壳类, 以及 17 种鱼类, 剩余的 1 种软体动物、3 种甲壳类和 95 种鱼类都位于 3~4 营养级。藻类营养级范围为 1.02~1.56, 浮游动物范围为 2.59~2.93, 软体动物范围为 2.00~2.73, 甲壳类范围为 2.37~3.20。另外, 鱼类营养级范围为 2.54~3.98, 平均值为( $3.30\pm 0.10$ ) $\text{‰}$ , 其中卵形鲳鲹的营养级最低, 截尾白姑鱼的营养级最高。从图 3 中可以看出, 鲮、勒氏笛鲷 (*Lutjanus russellii*)、凹鼻鲷 (*Chelonodon patoca*)、圆吻海鲷 (*Nematalosa nasus*) 等部分鱼类的营养级跨度较大, 不仅体现了该部分物种食性范围广泛, 对生态系统的适应能力较强, 也说明其在生长发育中, 个体体型增大, 活动范围变广, 对资源竞争能力变强, 因此生态位跨度较大。

### 2.3 不同类群营养结构差异及营养指标

本研究分析了万山群岛 3 种渔业生物类群的碳、氮稳定同位素及营养生态位(图 4), 并计算了各生物类群的营养结构指标(表 1)。单因素方差分析结果表明, 万山群岛软体动物、甲壳类和鱼类的营养级差异性显著( $P<0.01$ )。甲壳类分别与鱼类和软体动物类的核心营养生态位出现重叠, 表明两者之间存在明显竞争关系, 在生活环境和食物

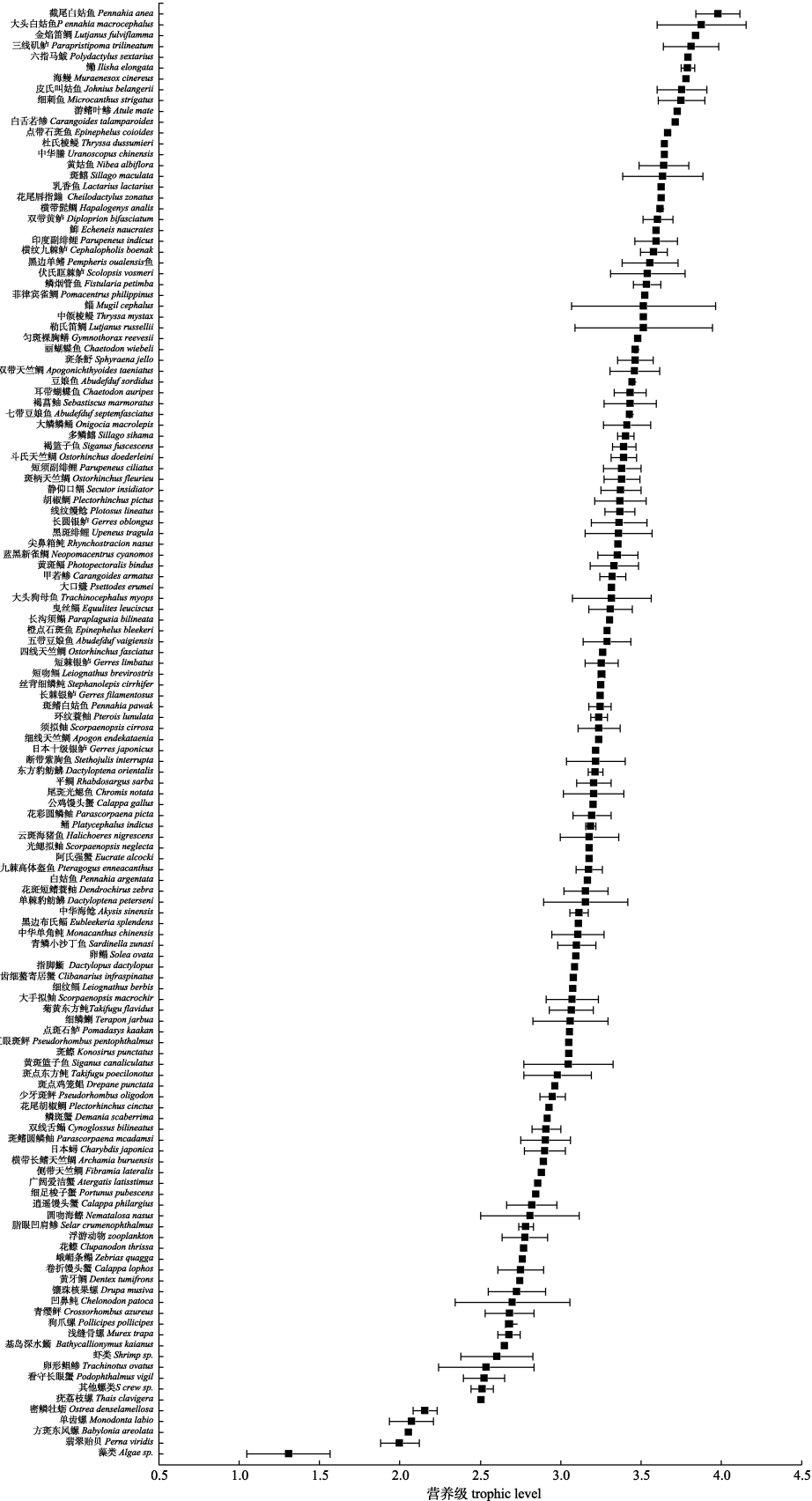


图 3 万山群岛食物网连续营养谱

Fig. 3 Continuous trophic spectrum of fishes in the food web of Wanshan Islands

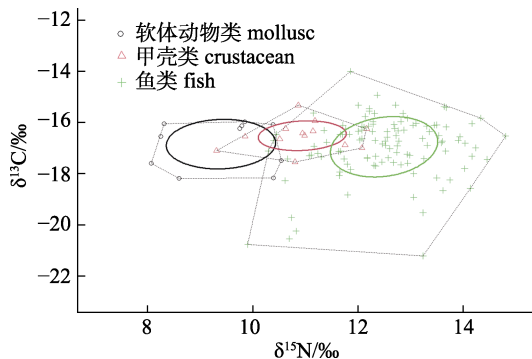


图 4 万山群岛海域不同渔业生物营养生态位结构图

Fig. 4 Distribution of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of different fishery organisms in Wanshan Islands

表 1 万山群岛海域不同渔业生物的营养结构指标  
Tab. 1 Trophic structure indices of different fishery organisms in the waters of Wanshan Islands

| 类群 group       | CR   | NR   | TA    | SEAc | CD   | MNND | SDNND |
|----------------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| 软体动物类 mollusc  | 2.22 | 2.47 | 4.83  | 3.16 | 1.24 | 0.49 | 0.27  |
| 甲壳类 crustacean | 2.22 | 2.85 | 3.59  | 1.52 | 0.79 | 0.47 | 0.27  |
| 鱼类 fish        | 7.23 | 4.90 | 23.64 | 3.73 | 1.30 | 0.24 | 0.24  |

注: CR 为  $\delta^{13}\text{C}$  变幅; NR 为  $\delta^{15}\text{N}$  变幅; TA 为凸多边形总面积; SEAc 为标准椭圆面积; CD 为平均离心距离; MNND 为平均最邻近距离; SDNND 为平均最邻近距离标准差。

Note: CR is  $\delta^{13}\text{C}$  range; NR is  $\delta^{15}\text{N}$  range; TA is total area; SEAc is standard ellipse area corrected; CD is mean distance to centroid; MNND is mean nearest neighbor distance; SDNND is standard deviation of nearest neighbor distance.

溯源上存在一定的相似性。而软体动物与鱼类虽然凸多边形面积(TA)有重叠,即营养生态位在个别物种间存在竞争,但通过标准椭圆面积(SEAc)来看,二者不存在明显竞争,表明软体动物类和鱼类有个别物种存在竞争,但整体上竞争关系不明显。甲壳类位于鱼类和软体动物类中间,表明甲壳类动物在食物网中起着承上启下的关键性作用。

营养结构指标在各类群中有明显差异,鱼类的  $\delta^{15}\text{N}$  变幅(NR)、 $\delta^{13}\text{C}$  变幅(CR)、平均离心距离(CD)都较大,表明鱼类饵料生物来源最广泛,营养层次多样性最大,群落营养多样性水平最高,其凸多边形面积(TA)和标准椭圆面积(SEAc)也明显大于其他类群。软体动物类的平均最邻近距离(MNND)是最大的,略高于甲壳类,鱼类最低。甲壳类的平均最邻近距离标准差(SDNND)与软体动物类一样,均为 0.27,高于鱼类的 0.24。

2.4 万山群岛鱼类物种聚类分析

基于碳氮稳定同位素,利用系统聚类分析(hierarchical cluster analysis)可将万山群岛的鱼类大致划分为 4 个类群(图 5, 图 6)。花鲮(*Clupanodon thrissa*)(48)、卵形鲳鲹(71)、圆吻海鲷(100)和脂眼

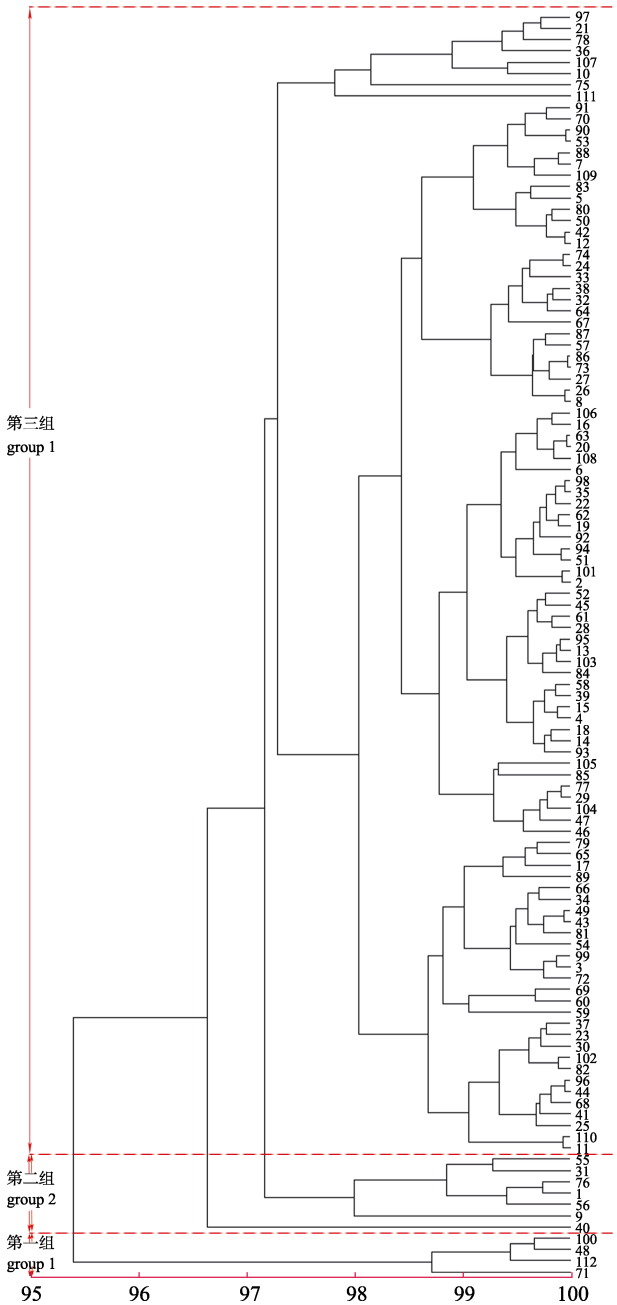


图 5 万山群岛鱼类碳氮稳定同位素比值的聚类分析  
右侧编号与附录 1 中物种编号相对应。

Fig. 5 Cluster analysis of carbon and nitrogen stable isotope ratios of fishes in Wanshan Islands  
Numbers on the right correspond to species numbers in appendix 1.

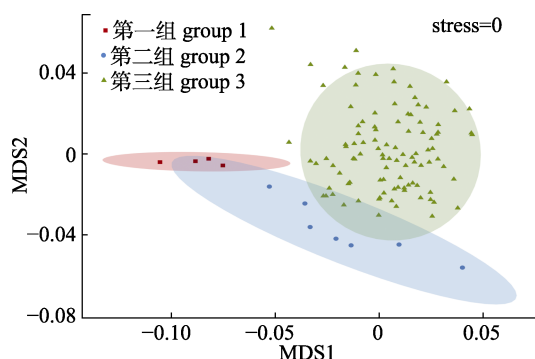


图 6 万山群岛鱼类 NMDs 类群划分

Fig. 6 NMDs classification of fishes in Wanshan Islands

凹肩鲷(*Selar crumenophthalmus*)(112)划分为第一类群, 这 4 种鱼类占总鱼类数的 3.57%,  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围为  $-20.78\text{‰}$ ~ $-19.73\text{‰}$ , 平均值  $-20.33\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围为  $9.93\text{‰}$ ~ $10.85\text{‰}$ , 平均值  $10.57\text{‰}$ , 营养级为 2.73。凹鼻鲷(1), 斑鳍圆鳞鲷(*Parascorpaena mcadamsi*)(9), 峨嵋条鲷(*Zebrias quagga*)(31), 黄牙鲷(*Dentex tumifrons*)(55), 基岛深水鲷(*Bathycallionymus kaianus*)(56), 青缨鲷(*Crossorhombus azureus*)(76)为第二类群,  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围为  $-18.28\text{‰}$ ~ $-15.64\text{‰}$ , 平均值  $-16.94\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围为  $10.32\text{‰}$ ~ $11.18\text{‰}$ , 平均值  $10.62\text{‰}$ , 营养级为 2.74。黑边布氏鲷(40),  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-14.00\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值为  $11.88\text{‰}$ , 营养级为 3.11, 单独作为第三类群, 但由于其与第二类群相似度较高, 因此可将其与第二类群合并为第二组, 共 7 种鱼类, 占总鱼类数的 6.25%。剩下的鱼类为第四类群, 共 101 种鱼类, 占总鱼类数的 90.18%。包括侧带天竺鲷(*Fibramia lateralis*)、横带长鳍天竺鲷(*Archamia buruensis*)、双线舌鲷(*Cynoglossus bilineatus*)、截尾白姑鱼、丽蝴蝶鱼(*Chaetodon wiebeli*)、静仰口鲷(*Secutor insidiator*)、金焰笛鲷(*Lutjanus fulviflamma*)等,  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围为  $-21.23\text{‰}$ ~ $-19.93\text{‰}$ , 平均值  $-16.85\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围为  $11.10\text{‰}$ ~ $14.83\text{‰}$ , 平均值  $12.72\text{‰}$ , 营养级为 3.36。

## 2.5 万山群岛整体食物碳源贡献比

利用 Bayesian 混合模型(siar 数据包等)对万山群岛的食物来源贡献百分比进行计算(图 7), 结果显示万山群岛整体碳源主要来源于浮游动物, 其贡献百分比超过 50%, 为 62.54%; 其次是藻类贡

献百分比为 25.28%; 软体动物类占比为 10.34%; 甲壳类占比为 1.83%。

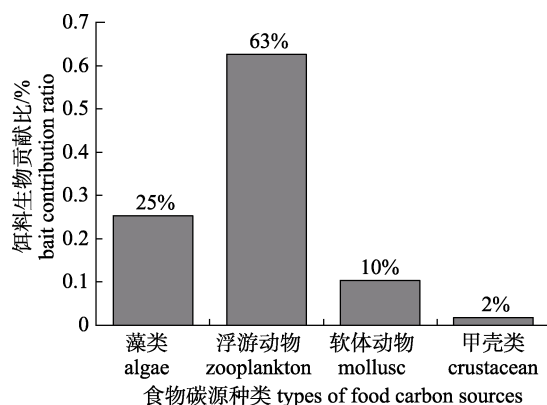


图 7 万山群岛食物碳源贡献百分比

Fig. 7 Contribution percentage of carbon sources to food in the Wanshan Islands

## 3 讨论

### 3.1 不同水域稳定同位素特征分析

利用碳氮稳定同位素技术, 可分析水域生态系统中生物营养级和食性, 提供生物对物质能量的吸收信息, 揭示物种所依赖的生产资源<sup>[18]</sup>。纵观南海北部大陆沿岸水域的相关研究报道, 对比发现, 本研究海域的食物来源多样性和营养层次多样性均处于较高水平, 表明万山群岛鱼类的初始食物来源较大亚湾<sup>[19]</sup>、灵山岛<sup>[20]</sup>、南海中西部海域<sup>[5,21]</sup>等区域广泛, 食物网的营养层级也较丰富。这可能是由于万山群岛复杂的生境导致水体、底质中的有机质来源多样化, 陆源有机质和海源有机质的存在使得该海域的营养结构多样性较高。同时, 岛礁海域的生境多样性高, 为鱼类提供了更多的栖息生境, 鱼类的物种多样性也因此更高, 不同鱼类的摄食饵料多样化<sup>[22]</sup>。这也进一步证实稳定同位素对揭示生物栖息环境信息的重要意义。

TA 和 CD 越大, 该系统的营养多样性程度和平均程度越高。MNND 和 SDNND 值越小, 则表明营养冗余度越高, 群落内较多物种具有相似营养特征, 即使食物网中有个别物种消失或替换, 也不会导致该水域食物网结构失衡<sup>[22]</sup>。由于在  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$  双位图中, 位于凸多边形的顶点生物占

据着特殊的营养生态位,整个群落的营养结构都会受他们的资源变动影响<sup>[20,23]</sup>,因此本研究参考 TA 校正方法<sup>[16]</sup>,利用标准椭圆面积(SEAc)与其他区域进行比较。万山群岛鱼类核心营养生态位和营养多样性程度高于浙江中南部<sup>[23]</sup>、闽江口<sup>[24]</sup>等水域,但低于大亚湾的珊瑚礁生态系统<sup>[25]</sup>水域,这表明万山群岛渔业生物的营养多样性水平较高,但与大亚湾珊瑚礁生态系统相比却仍有差距,这是因为珊瑚礁生态系统是海洋中的热带雨林,生物多样性几乎是海洋生态系统中最高的,营养结构多样性自然也比万山群岛高。而与这些区域相比,万山群岛鱼类群落的物种聚集密度和均匀度处于较低水平,表明万山群岛水域生态系统鱼类的营养生态位相似,系统结构稳定性较强,是南海北部大陆沿岸水域中营养多样性及抗干扰能力都较强的区域。

### 3.2 碳稳定同位素及食性分析

自然环境中碳稳定同位素可利用生产者的光合作用将无机碳合成转化为有机碳,通过消费者的摄食行为在生态系统中完成循环和传递<sup>[26]</sup>。生物组织中的碳氮稳定同位素可提供生物较长时间周期内的摄食习性以及生态系统食物网中的物质流动与能量传递信息<sup>[27]</sup>。 $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围越大,食物网的初级碳源越广泛,反之则越单一,本研究表明,万山群岛消费者的饵料来源多样性较高,摄食特化程度较低。研究海域各类群的碳稳定同位素之间呈极显著差异( $P<0.01$ ),这主要是与栖息水层有关,中上层生物和底层生物存在不同的营养碳源,所摄取的物质与能量便有所区别,这也说明万山群岛可能存在浮游食物链和底栖食物链<sup>[28]</sup>。参照张月平<sup>[29]</sup>按营养级对鱼类食性的划分,本研究中有 86.61% 的鱼类属于低级肉食性鱼类,主要以草食性动物和杂食性动物为食,与北部湾<sup>[29]</sup>主要鱼类食性相似。Bayesian 混合模型结果显示,浮游动物在万山群岛鱼类的食物组成中,贡献比例超过 50%,高于藻类、甲壳类等饵料食物,是驱动万山群岛食物网流转的主要碳源。有研究表明,海洋生态系统中的有机碳源主要来自于陆源有机物与海洋浮游生物,而南海陆坡生

态系统的能量来源主要是碎屑和浮游植物<sup>[30]</sup>。珠江口海域生态环境敏感脆弱,浮游动物分布变化较大,其动态变化直接或间接影响着游泳动物的种群营养结构<sup>[11]</sup>。不同的水文特征以及地貌形态差异会导致不同海域的渔业生物摄食倾向存在明显差异,因此万山群岛海域的主要碳源与南海中西部海域<sup>[31]</sup>、大亚湾海域<sup>[25]</sup>、海州湾海域<sup>[32]</sup>等均有所不同。

### 3.3 氮稳定同位素及营养级分析

生物体中的氮稳定同位素受食物和自身新陈代谢的影响,会引起同位素分馏,逐渐富集  $\delta^{15}\text{N}$ <sup>[33]</sup>,因此常被用于确定生态系统中各生物的营养位置。万山群岛的主要鱼类营养级范围为 2.54~3.98,均值为 3.30,与 FishBase 查询结果相比,有 11 种鱼类偏高,22 种鱼类偏低,其误差范围超过了 0.5,而剩余有 54 种鱼类的误差小于 0.5,可视为营养级一致<sup>[34]</sup>。其中偏高的鱼类如褐篮子鱼(*Siganus fuscescens*)、鲷、杜氏棱鲷(*Thryssa dussumieri*)等,多是杂食性鱼类,以藻类、浮游动物、底栖生物等为食,其饵料生物组成中的底栖无脊椎生物可能受水域中营养物质含量影响而导致  $\delta^{15}\text{N}$  值偏高,从而营养级结果偏高<sup>[35-38]</sup>。偏低的鱼类如少牙斑鲆(*Pseudorhombus oligodon*)、卵形鲳鲹、大头狗母鱼(*Trachinocephalus myops*)、大口鲈(*Psettocheilichthys erumei*)、脂眼凹肩鲷等,大部分都是南海大陆沿岸重要的经济物种<sup>[39,40]</sup>。同样,与珠江河口(2.1~4.7)<sup>[41]</sup>、长江口(2.49~4.60)<sup>[42]</sup>以及大亚湾海域(3.11~4.28)<sup>[19]</sup>鱼类的营养级相比,万山群岛鱼类营养级均处于较低水平,与该海域内过度捕捞和环境污染加剧密切相关<sup>[41]</sup>。万山群岛海域中高营养级的鱼类,如截尾白姑鱼、大头白姑鱼、金焰笛鲷等都是重要的经济物种,水生态系统中,顶级生物在捕捞活动的影响下群落丰富度降低,对小型鱼类和浮游生物群落的营养结构都会产生重要影响<sup>[43]</sup>。研究表明,在工业废水、生活污水等人类活动干扰下,水中悬浮颗粒有机物浓度增加,会导致研究水域中的  $\delta^{15}\text{N}$  值普遍偏高<sup>[44]</sup>。万山群岛海域内自然资源与人类开发活动之间的相互作用很活跃,生态环境不稳定且脆弱<sup>[45]</sup>,捕捞压力

引起营养结构变化, 以及鱼类群落种间关系也会发生一系列改变, 从而导致生态系统鱼类群落结构失衡<sup>[46]</sup>。按照食物网营养层次划分标准, 万山群岛鱼类食物链长度为 3.98, 处于全球海洋食物链长度范围以内(3.2~5.3), 接近平均长度 4.0, 但低于珠江口主要渔业生物的食物链长度(4.70)<sup>[41]</sup>, 这可能是因为各种环境因素干扰, 导致鱼类饵料生物多样性及丰富度受影响<sup>[47]</sup>, 从而通过食物网影响鱼类的营养级, 并造成整个万山群岛食物链长度较短。

### 3.4 聚类分析与功能群划分

本研究基于碳氮稳定同位素值进行物种聚类分析, 可将具有相似食源和营养结构的生物聚为同一生物类群, 会反映出相似的营养和生境信息。万山群岛鱼类主要分为 3 个组, 浮游食性鱼类、底栖食性鱼类和低级肉食性鱼类。结合文献和 FishBase 鱼类资料库 (<https://www.fishbase.se/search.php>) 以及台湾鱼类资料库 (<https://fishdb.sinica.edu.tw/chi/home.php>) 查询各种鱼类食性。在第一组中, 花鲢是珠江口常见的中上层洄游性鱼类, 主要摄食浮游生物和小型甲壳类生物。卵形鲳鲹属于温和肉食性鱼类, 多以端足类、双壳类、软体动物等为食。圆吻海鲷是近海沿岸常见的小型鱼类, 以矽藻、桡脚类及其他小型无脊椎动物为食。脂眼凹肩鲈是南海北部大陆沿岸常见中上层鱼类, 多以浮游生物为食。这部分鱼类的共同点在于均属于沿岸中上层洄游性小型鱼类, 主要以甲壳类、软体动物类、浮游生物类为主要的饵料来源。第二组中, 凹鼻鲷为近海底层中小型鱼类, 主要饵料生物为软体动物、甲壳类、棘皮动物等小型底栖生物。斑鳍圆鳞鲷营底栖生活, 常在礁岩或沙地处以小型鱼类或甲壳类生物为食。峨嵋条鳎和青缨鲆都是典型的底层鱼类, 栖息在水底的砂石底泥中, 主要摄食甲壳类、双壳类。黄牙鲷属暖温性底层鱼类, 食性较广, 以小型鱼类、磷虾类、长尾类为主要食物。基岛深水鲷主要栖息于大陆棚边缘砂泥底水域, 以底栖生物为食。这部分鱼类的共同点在于其栖息环境主要集中在底层水域, 并以底栖生物、小型鱼类等为食。而黑边布氏鲷主要活动在底层水域, 摄食小型甲

壳类、多毛类及二枚贝等底栖无脊椎生物, 是近岸河口浅水区常见的小型经济鱼类, 因此可将其与上述鱼类划分为同一类群。根据稳定同位素结果得知, 第三组鱼类的营养等级普遍偏高, 而鱼类摄食偏好是决定鱼类营养级的关键因子, 因此该类群的划分主要也是依据其摄食生态的相似性。结合张月平<sup>[29]</sup>对鱼类食性的划分标准, 第三组的 101 种鱼类中, 有 94.06% 的低级肉食性鱼类, 该组鱼类主要以草食性动物和杂食性动物为食, 因此将该组定为低级肉食性鱼类。

## 4 结论

万山群岛海域鱼类营养生态位宽幅较大, 鱼类食物来源丰富, 整个群落稳定性较高, 抗外界干扰能力较强, 是南海北部大陆沿岸鱼类生长丰富多样、营养结构多样性较高的区域。浮游动物是驱动万山群岛食物网流转的主要碳源。万山群岛食物链长度较短, 一方面是由于生境衰退导致栖息环境多样性下降, 另一方面是由于过度捕捞导致高营养级鱼类资源量减少。聚类分析将万山群岛主要鱼类分为浮游食性鱼类、底栖食性鱼类和低级肉食性鱼类。

## 参考文献:

- [1] Park H J, Kwak J H, Lee Y-J, et al. Trophic structures of two contrasting estuarine ecosystems with and without a dike on the temperate coast of Korea as determined by stable isotopes[J]. *Estuaries and Coasts*, 2020, 43(3): 560-577.
- [2] Dai M, Liu H X, Wu F X, et al. Net-phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Wanshan islands adjacent sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(4): 540-547+554. [戴明, 刘华雪, 吴风霞, 等. 万山群岛海域网采浮游植物与环境因子的关系[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(4): 540-547+554.]
- [3] Rau G H, Mearns A J, Young D R, et al. Animal  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  correlates with trophic level in pelagic food webs[J]. *Ecology*, 1983, 64(5): 1314-1318.
- [4] Stowasser G, Mcallen R, Pierce G J, et al. Trophic position of deep-sea fish—Assessment through fatty acid and stable isotope analyses[J]. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(5): 812-826.
- [5] Huang J X, Gong Y Y, Xu S N, 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. [黄佳兴, 龚玉艳, 徐姗楠, 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.]
- [6] Yin H Y, Zhu W T, Ma W G, 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. [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.]
- [7] Egan J P, Gibbs S, Simons A M. Trophic niches through ontogeny in 12 species of Indo-Pacific marine Clupeoidei (herrings, sardines, and anchovies)[J]. Marine Biology, 2018, 165(10): 153.
- [8] Frédérick B, Lehanse O, Vandewalle P, et al. Trophic niche width, shift, and specialization of *Dascyllus aruanus* in Toliara Lagoon, Madagascar[J]. Copeia, 2010, (2): 218-226.
- [9] Ayelen T, Franco C, Anibal G N, et al. Trophic niche partitioning of five skate species of genus *Bathyraja* in northern and central Patagonia, Argentina[J]. Journal of Fish  $\beta$  biology, 2020, 97(3): 656-667.
- [10] Wu P, Liu Y, Xiao Y Y, et al. Evaluation of fisheries ecological environment in adjacent sea areas of Wanshan Archipelago in Pearl River Estuary in spring[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(5): 1-8. [吴鹏, 刘永, 肖雅元, 等. 春季珠江口万山群岛毗邻海域渔业生态环境状况评价[J]. 南方水产科学, 2022, 18(5): 1-8.]
- [11] Tang G L, Liu Y, Wu P, et al. Community structure of fishery resources and its relationship to environmental factors in the Wanshan Islands Sea of the Pearl River Estuary in spring[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(8): 1198-1209. [唐广隆, 刘永, 吴鹏, 等. 珠江口万山群岛海域春季渔业资源群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2022, 29(8): 1198-1209.]
- [12] Tang G L, He Z H, Liu Y, et al. *Acanthopagrus latus* migration patterns and habitat use in Wanshan Islands, Pearl River Estuary, determined using otolith microchemical analysis[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10.
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey-Part 6: Marine biological survey: GB/T 12763. 6-2007:[S]. Beijing: Standards Press of China: 2008: [中华人民共和国国家质量监督检验检疫局. 海洋调查规范: 第 6 部分 海洋生物调查: GB/T 12763. 6-2007:[S]. 北京: 中国标准出版社: 2008:]
- [14] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [15] Layman C A, Arrington D A, Montaa C G, et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?[J]. Ecology, 2007, 88(1): 42-48.
- [16] 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]. The Journal of Animal Ecology, 2011, 80(3): 595-602.
- [17] McCutchan J H, Lewis W M, Kendall C, et al. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur[J]. Oikos, 2003, 111(2): 378-390.
- [18] Lesser J S, James W R, Stallings C D, et al. Trophic niche size and overlap decreases with increasing ecosystem productivity[J]. Oikos, 2020, 129(9): 1303-1313.
- [19] Wang H J, Zhang W B, Huang H H, et al. Trophic structure of fishery organism assemblage in Daya Bay based on carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(5): 101-109. [汪慧娟, 张文博, 黄洪辉, 等. 基于碳、氮稳定同位素的大亚湾渔业生物群落营养结构[J]. 南方水产科学, 2021, 17(5): 101-109.]
- [20] Zhang Y Y, Dong J Y, Sun X, 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, 2022, 52(8): 40-51. [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, 2022, 52(8): 40-51.]
- [21] Ning J J, Du F Y, Wang X H, et al. The trophic structure of demersal fish species in southwestern continental shelf of Nansha Islands, South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(2): 468-475. [宁加佳, 杜飞雁, 王雪辉, 等. 南沙群岛西南部陆架区底层鱼类营养结构研究[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 468-475.]
- [22] Ziolkowska M, Sokolowski 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.
- [23] Gao C X. Stable isotope-based community trophic structure of fishery organisms in the offshore waters of central and southern Zhejiang[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020. [高春霞. 基于稳定同位素技术的浙江中南部近海渔业生物群落营养结构研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.]
- [24] Shi Y, He X B, Li J, et al. Seasonal variation in trophic structure of fish community in Minjiang Estuary based on stable isotope technique[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3457-3463. [石焱, 何雄波, 李军, 等. 基于稳定同位素方法的闽江口常见鱼类群落营养结

- 构的季节性变化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3457-3463.]
- [25] Zhu W T, Qin C X, Ma H M, 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. [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.]
- [26] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1987, 18(1): 293-320.
- [27] Tilves, Uxue, Fuentes, et al. Trophic interactions of the jellyfish *Pelagia noctiluca* in the NW Mediterranean: Evidence from stable isotope signatures and fatty acid composition[J]. Marine Ecology Progress, 2018, 591: 101-116.
- [28] Gao C X, Dai X J, Tian S Q, 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. [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.]
- [29] Zhang Y P. Foods web for main fishes in Beibu Gulf of the South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(5): 621-631. [张月平. 南海北部湾主要鱼类食物网[J]. 中国水产科学, 2005, 12(5): 621-631.]
- [30] Ma M L, Chen Z Z, Xu S N, et al. Trophic structure and energy flow of continental slope of the northern South China Sea ecosystem[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(10): 1685-1694. [马孟磊, 陈作志, 徐姗姗, 等. 南海北部陆坡海域生态系统营养结构和能量流动分析[J]. 水产学报, 2020, 44(10): 1685-1694.]
- [31] Kong Y F, Wu Z X, Yan Y R, et al. Trophic structure of pelagic fishery organism assemblage in the central and western South China Sea in spring revealed by carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(10): 3559-3567. [孔业富, 吴忠鑫, 颜云榕, 等. 基于碳氮稳定同位素的南海中西部海域春季中上层渔业生物群落营养结构[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3559-3567.]
- [32] Xie B, Li Y K, Zhang H, 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. [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.]
- [33] Fry B. Stable Isotope Ecology[M]. London: Springer Verlag, 2007.
- [34] Cai D L, Li H Y, Tang Q S, et al. Establishment of a continuous trophic spectrum of the food web in the East Yellow Sea ecosystem: Results from a Carbon and Nitrogen Stable Isotope Approach[J]. Science in China Series C, 2005, (2): 123-130. [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, 2005, (2): 123-130.]
- [35] Soyinka O O. The feeding ecology of *Mugil cephalus* (Linnaeus) from a high brackish tropical lagoon in South-west, Nigeria [J]. African Journal of Biotechnology, 2008, 7(22): 4192-4198.
- [36] Shimizu M, Nanjo K, Tanita I, et al. Food habits of fishes in a subtropical seagrass bed in Nagura Bay, Ishigaki Island, southern Japan[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2022, 102(5): 361-369.
- [37] Kanou K, Sano M, Kohno H. Food habits of fishes on unvegetated tidal mudflats in Tokyo Bay, central Japan[J]. Fisheries Science, 2004, 70(6): 978-987.
- [38] Pawase S V, Nirmale V H, Bhosale B P, et al. Study on biology of *Thryssa dussumieri* (Valenciennes, 1848) from the coast of Ratnagiri, Maharashtra, India[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2020, 49(1): 87-94.
- [39] Zhang Y C. Analysis of the mitochondrial genome of *Psettodes erumei* and phylogenetic analyses of flatfishes[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [张艳春. 大口鲷 *Psettodes erumei* 线粒体全序列的研究和鲽形目鱼类系统进化分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
- [40] Xie Y S, Lei K, He J Q, et al. Molecular characterization and expression analysis of TAK1, TAB1 and TAB2 of golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. Fishes, 2022, 7(4): 173.
- [41] Zeng Y Y, Lai Z N, Yang W L, et al. Trophic spectrum of fishery species from the Pearl River Estuary by stable isotope analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 194-202. [曾艳艺, 赖子尼, 杨婉玲, 等. 珠江河口渔业生物稳定同位素营养级分析[J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 194-202.]
- [42] Yan G S, Zhang T, Zhao F, 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. [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.]
- [43] Lepak J M, Kraft C E, Weldel B C. Rapid food web recovery in response to removal of an introduced apex predator[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2006, 63(3): 569-575.
- [44] Li X M, Zhu T B, Wang X G, et al. Study on trophic structure of fish communities in Changhu Lake based on

- stable carbon and nitrogen isotopes[J]. Biotic Resources, 2021, 43(6): 545-551. [李学梅, 朱挺兵, 王旭歌, 等. 基于稳定同位素技术的长湖鱼类营养结构研究[J]. 生物资源, 2021, 43(6): 545-551.]
- [45] Cui W Z. Temporal and spatial variation of water environment and its impact on the ecosystem of the Pearl River Estuary[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. [崔伟中. 珠江河口水环境的时空变异及对生态系统的影响[D]. 南京: 河海大学, 2007.]
- [46] Shaw A L, Frazier B S, Kucklick J R, et al. Trophic ecology of a predatory community in a shallow-water, high-salinity estuary assessed by stable isotope analysis[J]. Marine & Coastal Fisheries, 2016, 8(1): 46-61.
- [47] Mchugh P A, McIntosh A R, Jellyman P G. Dual influences of ecosystem size and disturbance on food chain length in streams[J]. Ecology Letters, 2010, 13(7): 881-890.

## Trophic levels and niches of fish communities during autumn in the Wanshan Islands

SHI Juan<sup>1,2</sup>, LI Chunhou<sup>1,2</sup>, WANG Teng<sup>1,2</sup>, ZHAO Jinfa<sup>1,2</sup>, SONG Xiaoyu<sup>1,2</sup>, WANG Chunling<sup>3</sup>, LIU Yong<sup>1,2</sup>, WU Peng<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Observation and Research Station of Pearl River Estuary Ecosystem, Guangdong Province; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. Scientific Observation and Research Station of Xisha Island Reef Fishery Ecosystem of Hainan Province/Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province/Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572018, China;
3. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

**Abstract:** To explore the nutritional structure and subsequently construct a brief food network of fish communities in the Wanshan Islands, this study analyzed the main nutritional characteristics of the key fishery organisms using stable isotope technology in autumn (September) of 2021, while simultaneously calculating various quantitative indicators. As a result, the  $\delta^{13}\text{C}$  value of fish from the Wanshan Islands ranged from  $-21.23\text{‰}$  (*Mugil cephalus*) to  $-14.00\text{‰}$  (*Eubleekeria splendens*), with a mean value of  $(-16.96 \pm 0.41)\text{‰}$ . Additionally, the  $\delta^{15}\text{N}$  value ranged from  $9.93\text{‰}$  (*Trachinotus ovatus*) to  $14.83\text{‰}$  (*Pennahia anea*), with a mean value of  $(12.52 \pm 0.34)\text{‰}$ . The trophic levels of these fish varied from 2.54 to 3.98, with an average trophic level of 3.30. Furthermore, the  $\delta^{13}\text{C}$  range (CR),  $\delta^{15}\text{N}$  range (NR), total area (TA), standard ellipse area (SEAc), mean distance to centroid (CD), mean nearest neighbor distance (MNND), and standard deviation of nearest neighbor distance (SDNND) of the fish were 7.23, 4.90, 23.64, 3.73, 1.30, and 0.24, respectively. Based on the stable isotope values of carbon and nitrogen, the fishes in the Wanshan Islands could be divided into three main groups: 4 species (3.57%) of planktivorous fishes, 7 species (6.25%) of benthic fishes, and 101 species (90.18%) of low-grade carnivorous fishes. According to the Bayesian mixed model, the main food source of fish in the Wanshan Islands is zooplankton with contribution rate of 62.54%, followed by algae with a contribution rate of 25.28%. This study constructed a novel continuous trophic spectrum of the fishes in the Wanshan Islands that was of great significance in examining the characteristics of food web and trophic structure and could provide strong data support for the protection and management of the Wanshan Islands ecosystem.

**Key words:** Wanshan Islands; Pearl River estuary; trophic niche; trophic level; food web

**Corresponding author:** WANG Teng, E-mail: wt3074589@163.com; LIU Yong, E-mail: liuyong@scsfri.ac.cn

## 附录

附录 1 万山群岛主要鱼类物种的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值、营养级和体长范围Appendix 1  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values, trophic levels, and body length ranges of major fish species in the Wanshan Islands

| 序号<br>serial<br>number | 类群<br>category | 种名 species                            | 样本量<br>n | 营养级<br>TL | $\delta^{15}\text{N}$ 值<br>‰ $\delta^{15}\text{N}$<br>value | $\delta^{13}\text{C}$ 值/‰<br>$\delta^{13}\text{C}$<br>value | 体长范围/mm<br>body length range |
|------------------------|----------------|---------------------------------------|----------|-----------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1                      | 鱼类             | 凹鼻鲀 <i>Chelonodon patoca</i>          | 4        | 2.70      | 10.47                                                       | -16.47                                                      | 86-116                       |
| 2                      | fish           | 白姑鱼 <i>Pennahia argentata</i>         | 1        | 3.17      | 12.06                                                       | -16.69                                                      | 145-145                      |
| 3                      |                | 白舌若鲹 <i>Carangoides talamparoides</i> | 1        | 3.72      | 13.93                                                       | -16.70                                                      | 100.97-100.97                |
| 4                      |                | 斑柄天竺鲷 <i>Ostorhinchus fleurieu</i>    | 15       | 3.38      | 12.79                                                       | -16.33                                                      | 84-115                       |
| 5                      |                | 斑点东方鲀 <i>Takifugu poecilonotus</i>    | 20       | 2.98      | 11.43                                                       | -16.78                                                      | 16.8-150                     |
| 6                      |                | 斑点鸡笼鲷 <i>Drepane punctata</i>         | 2        | 2.96      | 11.38                                                       | -16.31                                                      | 223.19-223.19                |
| 7                      |                | 斑鲹 <i>Konosirus punctatus</i>         | 1        | 3.05      | 11.67                                                       | -18.09                                                      | 167-167                      |
| 8                      |                | 斑鳍白姑鱼 <i>Pennahia pawak</i>           | 6        | 3.25      | 12.33                                                       | -17.68                                                      | 137-141                      |
| 9                      |                | 斑鳍圆鳞鲷 <i>Parascorpaena mcadamsi</i>   | 2        | 2.91      | 11.18                                                       | -15.64                                                      | 95-95                        |
| 10                     |                | 斑条魮 <i>Sphyræna jello</i>             | 2        | 3.47      | 13.08                                                       | -18.93                                                      | 342-435                      |
| 11                     |                | 斑鳍 <i>Sillago maculata</i>            | 7        | 3.64      | 13.66                                                       | -15.38                                                      | 100.54-215                   |
| 12                     |                | 侧带天竺鲷 <i>Fibramia lateralis</i>       | 1        | 2.88      | 11.10                                                       | -17.31                                                      | 90-90                        |
| 13                     |                | 橙点石斑鱼 <i>Epinephelus bleekeri</i>     | 1        | 3.29      | 12.49                                                       | -16.85                                                      | 103-103                      |
| 14                     |                | 大口鲷 <i>Psettodes erumei</i>           | 1        | 3.32      | 12.58                                                       | -16.58                                                      | 185-185                      |
| 15                     |                | 大鳞鳞鲷 <i>Onigocia macrolepis</i>       | 17       | 3.41      | 12.90                                                       | -16.30                                                      | 80-263.98                    |
| 16                     |                | 大手拟鲷 <i>Scorpaenopsis macrochir</i>   | 2        | 3.07      | 11.74                                                       | -16.11                                                      | 71-84                        |
| 17                     |                | 大头白姑鱼 <i>Pennahia macrocephalus</i>   | 12       | 3.88      | 14.48                                                       | -17.45                                                      | 117.32-180                   |
| 18                     |                | 大头狗母鱼 <i>Trachinocephalus myops</i>   | 11       | 3.32      | 12.58                                                       | -16.36                                                      | 105-220                      |
| 19                     |                | 单棘豹鲂鲷 <i>Dactyloptena peterseni</i>   | 6        | 3.16      | 12.03                                                       | -16.35                                                      | 134-170                      |
| 20                     |                | 点斑石鲈 <i>Pomadasys kaakan</i>          | 1        | 3.06      | 11.69                                                       | -16.47                                                      | 180-180                      |
| 21                     |                | 点带石斑鱼 <i>Epinephelus coioides</i>     | 2        | 3.67      | 13.77                                                       | -18.26                                                      | 172.93-172.93                |
| 22                     |                | 东方豹鲂鲷 <i>Dactyloptena orientalis</i>  | 11       | 3.22      | 12.23                                                       | -16.14                                                      | 130-185                      |
| 23                     |                | 斗氏天竺鲷 <i>Ostorhinchus doederleini</i> | 4        | 3.39      | 12.84                                                       | -15.97                                                      | 64-98                        |
| 24                     |                | 豆娘鱼 <i>Abudefduf sordidus</i>         | 5        | 3.45      | 13.01                                                       | -17.29                                                      | 103.65-103.65                |
| 25                     |                | 杜氏棱鲷 <i>Thryssa dussumieri</i>        | 1        | 3.65      | 13.70                                                       | -16.18                                                      | 95-95                        |
| 26                     |                | 短棘银鲈 <i>Gerres limbatus</i>           | 4        | 3.26      | 12.36                                                       | -17.71                                                      | 87-95                        |
| 27                     |                | 短吻鲷 <i>Leiognathus brevirostris</i>   | 86       | 3.25      | 12.36                                                       | -17.33                                                      | 68-75                        |
| 28                     |                | 短须副绯鲤 <i>Parupeneus ciliatus</i>      | 29       | 3.38      | 12.80                                                       | -16.73                                                      | 138-174.12                   |
| 29                     |                | 断带紫胸鱼 <i>Stethojulis interrupta</i>   | 14       | 3.22      | 12.24                                                       | -15.46                                                      | 97.35-124                    |
| 30                     |                | 多鳞鲷 <i>Sillago sihama</i>             | 22       | 3.41      | 12.88                                                       | -15.65                                                      | 166-220.47                   |
| 31                     |                | 峨嵋条鲷 <i>Zebrias quagga</i>            | 1        | 2.76      | 10.69                                                       | -17.43                                                      | 95-95                        |
| 32                     |                | 耳带蝴蝶鱼 <i>Chaetodon auripes</i>        | 16       | 3.43      | 12.97                                                       | -17.60                                                      | 124-135                      |
| 33                     |                | 菲律宾雀鲷 <i>Pomacentrus philippinus</i>  | 1        | 3.52      | 13.28                                                       | -17.42                                                      | 65.82-65.82                  |
| 34                     |                | 伏氏眶棘鲈 <i>Scolopsis vosmeri</i>        | 2        | 3.54      | 13.34                                                       | -16.90                                                      | 130-134                      |
| 35                     |                | 光鳃拟鲷 <i>Scorpaenopsis neglecta</i>    | 1        | 3.18      | 12.10                                                       | -16.16                                                      | 125-125                      |
| 36                     |                | 海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>         | 2        | 3.78      | 14.16                                                       | -18.58                                                      | 673-673                      |
| 37                     |                | 褐菖鲷 <i>Sebastiscus marmoratus</i>     | 20       | 3.43      | 12.97                                                       | -15.84                                                      | 83-134.7                     |
| 38                     |                | 褐篮子鱼 <i>Siganus fuscescens</i>        | 2        | 3.40      | 12.84                                                       | -17.66                                                      | -                            |
| 39                     |                | 黑斑绯鲤 <i>Upeneus tragula</i>           | 6        | 3.36      | 12.72                                                       | -16.24                                                      | 165-200                      |
| 40                     |                | 黑边布氏鲷 <i>Eubleekeria splendens</i>    | 1        | 3.11      | 11.88                                                       | -14.00                                                      | -                            |

(待续 to be continued)

(续表 continued)

| 序号<br>serial<br>number | 类群<br>category | 种名 species                               | 样本量<br>n | 营养级<br>TL | $\delta^{15}\text{N}$ 值<br>/ $\% \delta^{15}\text{N}$<br>value | $\delta^{13}\text{C}$ 值/ $\%$<br>$\delta^{13}\text{C}$<br>value | 体长范围/mm<br>body length range |
|------------------------|----------------|------------------------------------------|----------|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 41                     |                | 黑边单鳍鱼 <i>Pempheris oualensis</i>         | 45       | 3.56      | 13.38                                                          | -16.37                                                          | 100-149                      |
| 42                     |                | 横带长鳍天竺鲷 <i>Archamia buruensis</i>        | 1        | 2.89      | 11.14                                                          | -17.28                                                          | 68-68                        |
| 43                     |                | 横带髯鲷 <i>Haplochromis analis</i>          | 2        | 3.62      | 13.61                                                          | -16.80                                                          | 115-121                      |
| 44                     |                | 横纹九棘鲈 <i>Cephalopholis boenak</i>        | 18       | 3.58      | 13.47                                                          | -16.11                                                          | 102.87-147.05                |
| 45                     |                | 胡椒鲷 <i>Plectorhinchus pictus</i>         | 6        | 3.37      | 12.76                                                          | -17.18                                                          | 105-180                      |
| 46                     |                | 花斑短鳍蓑鲉 <i>Dendrochirus zebra</i>         | 3        | 3.16      | 12.03                                                          | -15.33                                                          | 105-139                      |
| 47                     |                | 花彩圆鳞鲉 <i>Parascorpaena picta</i>         | 2        | 3.20      | 12.16                                                          | -15.77                                                          | 104-128                      |
| 48                     |                | 花鲷 <i>Clupanodon thrissa</i>             | 1        | 2.77      | 10.72                                                          | -20.56                                                          | 159-159                      |
| 49                     |                | 花尾唇指鲷 <i>Cheilodactylus zonatus</i>      | 1        | 3.63      | 13.63                                                          | -16.74                                                          | 152.24-152.24                |
| 50                     |                | 花尾胡椒鲷 <i>Plectorhinchus cinctus</i>      | 1        | 2.93      | 11.26                                                          | -17.22                                                          | 212.01-212.01                |
| 51                     |                | 环纹蓑鲉 <i>Pterois lunulata</i>             | 5        | 3.24      | 12.31                                                          | -16.07                                                          | 96-201                       |
| 52                     |                | 黄斑鲷 <i>Photopectoralis bindus</i>        | 7        | 3.33      | 12.63                                                          | -17.03                                                          | 67-142                       |
| 53                     |                | 黄斑篮子鱼 <i>Siganus canaliculatus</i>       | 68       | 3.05      | 11.66                                                          | -17.14                                                          | 66.73-214.74                 |
| 54                     |                | 黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>               | 3        | 3.64      | 13.69                                                          | -17.13                                                          | 183-200                      |
| 55                     |                | 黄牙鲷 <i>Dentex tumifrons</i>              | 1        | 2.75      | 10.64                                                          | -18.28                                                          | 160-160                      |
| 56                     |                | 基岛深水鲷 <i>Bathycallionymus kaianus</i>    | 1        | 2.65      | 10.32                                                          | -17.13                                                          | 110-110                      |
| 57                     |                | 甲若鲷 <i>Carangoides armatus</i>           | 17       | 3.32      | 12.60                                                          | -17.39                                                          | 83-180                       |
| 58                     |                | 尖鼻箱鲀 <i>Rhynchostracion nasus</i>        | 1        | 3.36      | 12.71                                                          | -16.08                                                          | 246-246                      |
| 59                     |                | 截尾白姑鱼 <i>Pennahia anea</i>               | 3        | 3.98      | 14.83                                                          | -16.54                                                          | 112-146                      |
| 60                     |                | 金焰笛鲷 <i>Lutjanus fulviflamma</i>         | 1        | 3.84      | 14.36                                                          | -15.83                                                          | 158-158                      |
| 61                     |                | 静仰口鲷 <i>Secutor insidiator</i>           | 41       | 3.38      | 12.77                                                          | -16.92                                                          | 84.31-105                    |
| 62                     |                | 九棘高体盔鱼 <i>Pteragogus enneacanthus</i>    | 3        | 3.18      | 12.10                                                          | -16.30                                                          | 132-138                      |
| 63                     |                | 菊黄东方鲀 <i>Takifugu flavidus</i>           | 2        | 3.07      | 11.73                                                          | -16.48                                                          | 90-102                       |
| 64                     |                | 蓝黑新雀鲷 <i>Neopomacentrus cyanomos</i>     | 5        | 3.36      | 12.70                                                          | -17.58                                                          | 91-160                       |
| 65                     |                | 鲷 <i>Ilisha elongata</i>                 | 2        | 3.79      | 14.19                                                          | -17.33                                                          | 294-340                      |
| 66                     |                | 勒氏笛鲷 <i>Lutjanus russellii</i>           | 4        | 3.52      | 13.25                                                          | -16.63                                                          | 120-180                      |
| 67                     |                | 丽蝴蝶鱼 <i>Chaetodon wiebeli</i>            | 4        | 3.47      | 13.08                                                          | -18.01                                                          | 115-143.35                   |
| 68                     |                | 鳞烟管鱼 <i>Fistularia petimba</i>           | 4        | 3.54      | 13.33                                                          | -16.15                                                          | 630-764                      |
| 69                     |                | 六指马鲛 <i>Polydactylus sextarius</i>       | 1        | 3.79      | 14.19                                                          | -16.05                                                          | 138-138                      |
| 70                     |                | 卵鲷 <i>Solea ovata</i>                    | 1        | 3.10      | 11.82                                                          | -17.64                                                          | 62-62                        |
| 71                     |                | 卵形鲷 <i>Trachinotus ovatus</i>            | 7        | 2.54      | 9.93                                                           | -20.78                                                          | 99.65-250                    |
| 72                     |                | 皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangerii</i>          | 13       | 3.75      | 14.06                                                          | -16.82                                                          | 98.54-165.95                 |
| 73                     |                | 平鲷 <i>Rhabdosargus sarba</i>             | 145      | 3.21      | 12.20                                                          | -17.38                                                          | 123-159                      |
| 74                     |                | 七带豆娘鱼 <i>Abudefduf septemfasciatus</i>   | 3        | 3.43      | 12.96                                                          | -17.25                                                          | 118-118                      |
| 75                     |                | 青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i>          | 3        | 3.10      | 11.83                                                          | -18.84                                                          | 16.8-105                     |
| 76                     |                | 青斑鲷 <i>Crossorhombus azureus</i>         | 10       | 2.68      | 10.42                                                          | -16.71                                                          | 73-110                       |
| 77                     |                | 日本十级银鲈 <i>Gerres japonicus</i>           | 1        | 3.22      | 12.24                                                          | -15.56                                                          | 154.2-154.2                  |
| 78                     |                | 乳香鱼 <i>Lactarius lactarius</i>           | 1        | 3.63      | 13.64                                                          | -18.67                                                          | 123-123                      |
| 79                     |                | 三线矶鲈 <i>Parapristipoma trilineatum</i>   | 57       | 3.81      | 14.26                                                          | -17.00                                                          | 135-186                      |
| 80                     |                | 少牙斑鲷 <i>Pseudorhombus oligodon</i>       | 6        | 2.95      | 11.33                                                          | -17.35                                                          | 115-155                      |
| 81                     |                | 双带黄鲈 <i>Diploprion bifasciatum</i>       | 82       | 3.61      | 13.56                                                          | -16.52                                                          | 90-152                       |
| 82                     |                | 双带天竺鲷 <i>Apogonichthyoides taeniatus</i> | 17       | 3.46      | 13.07                                                          | -16.11                                                          | 90-140.38                    |
| 83                     |                | 双线舌鲷 <i>Cynoglossus bilineatus</i>       | 6        | 2.91      | 11.19                                                          | -16.93                                                          | 210-241                      |

(待续 to be continued)

(续表 continued)

| 序号<br>serial<br>number | 类群<br>category | 种名 species                               | 样本量<br>n | 营养级<br>TL | $\delta^{15}\text{N}$ 值<br>‰ $\delta^{15}\text{N}$<br>value | $\delta^{13}\text{C}$ 值/‰<br>$\delta^{13}\text{C}$<br>value | 体长范围/mm<br>body length range |
|------------------------|----------------|------------------------------------------|----------|-----------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 84                     |                | 丝背细鳞鲷 <i>Stephanolepis cirrhifer</i>     | 1        | 3.25      | 12.35                                                       | -16.71                                                      | 122.75-122.75                |
| 85                     |                | 四线天竺鲷 <i>Ostorhinchus fasciatus</i>      | 4        | 3.26      | 12.39                                                       | -14.93                                                      | 70-70                        |
| 86                     |                | 尾斑光鳃鱼 <i>Chromis notata</i>              | 23       | 3.21      | 12.20                                                       | -17.41                                                      | 89.99-109.91                 |
| 87                     |                | 五带豆娘鱼 <i>Abudefduf vaigiensis</i>        | 24       | 3.29      | 12.48                                                       | -17.55                                                      | 92.67-123                    |
| 88                     |                | 五眼斑鲆 <i>Pseudorhombus pentophthalmus</i> | 2        | 3.05      | 11.68                                                       | -17.95                                                      | 155.33-155.33                |
| 89                     |                | 细刺鱼 <i>Microcanthus strigatus</i>        | 17       | 3.75      | 14.05                                                       | -17.81                                                      | 10.96-148                    |
| 90                     |                | 细鳞鲷 <i>Terapon jarbua</i>                | 4        | 3.06      | 11.70                                                       | -17.13                                                      | 110-130                      |
| 91                     |                | 细纹鲷 <i>Leiognathus berbis</i>            | 10       | 3.08      | 11.76                                                       | -17.43                                                      | 76-76                        |
| 92                     |                | 细线天竺鲷 <i>Apogon endekataenia</i>         | 1        | 3.24      | 12.30                                                       | -16.36                                                      | 74-74                        |
| 93                     |                | 线纹鳗鲶 <i>Plotosus lineatus</i>            | 20       | 3.37      | 12.75                                                       | -16.52                                                      | 0.17-210                     |
| 94                     |                | 须拟鲷 <i>Scorpaenopsis cirrosa</i>         | 33       | 3.24      | 12.31                                                       | -15.97                                                      | 60-176                       |
| 95                     |                | 曳丝鲷 <i>Equulites leuciscus</i>           | 6        | 3.31      | 12.55                                                       | -16.90                                                      | 88-91                        |
| 96                     |                | 印度副绯鲤 <i>Parupeneus indicus</i>          | 3        | 3.59      | 13.52                                                       | -16.10                                                      | 180.83-185                   |
| 97                     |                | 鲷 <i>Echeneis naucrates</i>              | 1        | 3.60      | 13.52                                                       | -18.17                                                      | 265-265                      |
| 98                     |                | 鲷 <i>Platycephalus indicus</i>           | 5        | 3.19      | 12.14                                                       | -16.19                                                      | 145-280                      |
| 99                     |                | 游鳍叶鲷 <i>Atule mate</i>                   | 1        | 3.73      | 13.96                                                       | -16.56                                                      | 186-186                      |
| 100                    |                | 圆吻海鲷 <i>Nematalosa nasus</i>             | 5        | 2.81      | 10.85                                                       | -20.26                                                      | 160-218                      |
| 101                    |                | 云斑海猪鱼 <i>Halichoeres nigrescens</i>      | 66       | 3.18      | 12.10                                                       | -16.64                                                      | 81.63-145                    |
| 102                    |                | 匀斑裸胸鲷 <i>Gymnothorax reevesii</i>        | 1        | 3.48      | 13.13                                                       | -16.04                                                      | 0-0                          |
| 103                    |                | 长沟须鲷 <i>Paraplagusia bilineata</i>       | 1        | 3.31      | 12.54                                                       | -16.74                                                      | 156-156                      |
| 104                    |                | 长棘银鲈 <i>Gerres filamentosus</i>          | 1        | 3.25      | 12.34                                                       | -15.65                                                      | 153-153                      |
| 105                    |                | 长圆银鲈 <i>Gerres oblongus</i>              | 53       | 3.36      | 12.74                                                       | -15.32                                                      | 105-155                      |
| 106                    |                | 指脚鲷 <i>Dactylopus dactylopus</i>         | 1        | 3.09      | 11.79                                                       | -16.25                                                      | 116-116                      |
| 107                    |                | 中颌棱鲷 <i>Thryssa mystax</i>               | 1        | 3.52      | 13.26                                                       | -19.54                                                      | 183.38-183.38                |
| 108                    |                | 中华单角鲷 <i>Monacanthus chinensis</i>       | 10       | 3.11      | 11.86                                                       | -16.47                                                      | 76-157.15                    |
| 109                    |                | 中华海鲶 <i>Akysis sinensis</i>              | 5        | 3.12      | 11.89                                                       | -17.85                                                      | 16-160                       |
| 110                    |                | 中华鲷 <i>Uranoscopus chinensis</i>         | 1        | 3.65      | 13.70                                                       | -15.42                                                      | 150-150                      |
| 111                    |                | 鲷 <i>Mugil cephalus</i>                  | 5        | 3.52      | 13.26                                                       | -21.23                                                      | 188-259.18                   |
| 112                    |                | 脂眼凹肩鲷 <i>Selar crumenophthalmus</i>      | 11       | 2.78      | 10.76                                                       | -19.73                                                      | 185-220                      |
| 113                    | 甲壳类            | 阿氏强蟹 <i>Eucrater alcocki</i>             | 1        | 3.18      | 12.10                                                       | -17.00                                                      |                              |
| 114                    | crustaceans    | 公鸡馒头蟹 <i>Calappa gallus</i>              | 1        | 3.20      | 12.19                                                       | -16.25                                                      |                              |
| 115                    |                | 广阔爱洁蟹 <i>Atergatis latissimus</i>        | 1        | 2.86      | 11.01                                                       | -16.51                                                      |                              |
| 116                    |                | 卷折馒头蟹 <i>Calappa lophos</i>              | 4        | 2.75      | 10.65                                                       | -16.25                                                      |                              |
| 117                    |                | 看守长眼蟹 <i>Podophthalmus vigil</i>         | 5        | 2.52      | 9.88                                                        | -16.55                                                      |                              |
| 118                    |                | 鳞斑蟹 <i>Demania scaberrima</i>            | 1        | 2.92      | 11.21                                                       | -15.94                                                      |                              |
| 119                    |                | 日本蜆 <i>Charybdis japonica</i>            | 6        | 2.90      | 11.17                                                       | -16.34                                                      |                              |
| 120                    |                | 细足梭子蟹 <i>Portunus pubescens</i>          | 1        | 2.85      | 10.97                                                       | -16.43                                                      |                              |
| 121                    |                | 下齿细螯寄居蟹 <i>Clibanarius infraspinus</i>   | 1        | 2.60      | 11.78                                                       | -16.88                                                      |                              |
| 122                    |                | 逍遥馒头蟹 <i>Calappa philargius</i>          | 2        | 3.08      | 10.89                                                       | -15.33                                                      |                              |
| 123                    |                | 虾类 <i>Shrimp sp.</i>                     | 5        | 2.82      | 10.15                                                       | -17.10                                                      |                              |
| 124                    | 软体动物类          | 单齿螺 <i>Monodonta labio</i>               | 10       | 2.07      | 8.34                                                        | -16.06                                                      |                              |
|                        | mollusca       |                                          |          |           |                                                             |                                                             |                              |

(待续 to be continued)

(续表 continued)

| 序号<br>serial<br>number | 类群<br>category | 种名 species                        | 样本量<br><i>n</i> | 营养级<br>TL | $\delta^{15}\text{N}$ 值<br>/ $\%$ $\delta^{15}\text{N}$<br>value | $\delta^{13}\text{C}$ 值/ $\%$<br>$\delta^{13}\text{C}$<br>value | 体长范围/mm<br>body length range |
|------------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 125                    |                | 方斑东风螺 <i>Babylonia areolata</i>   | 1               | 2.05      | 8.28                                                             | -16.55                                                          |                              |
| 126                    |                | 翡翠贻贝 <i>Perna viridis</i>         | 9               | 2.00      | 8.10                                                             | -17.60                                                          |                              |
| 127                    |                | 狗爪螺 <i>Pollicipes pollicipes</i>  | 2               | 2.68      | 10.42                                                            | -18.18                                                          |                              |
| 128                    |                | 密鳞牡蛎 <i>Ostrea denselamellosa</i> | 3               | 2.51      | 8.63                                                             | -18.20                                                          |                              |
| 129                    |                | 浅缝骨螺 <i>Murex trapa</i>           | 2               | 2.16      | 10.41                                                            | -16.08                                                          |                              |
| 130                    |                | 镶珠核果螺 <i>Drupa musiva</i>         | 10              | 2.68      | 10.57                                                            | -17.50                                                          |                              |
| 131                    |                | 疣荔枝螺 <i>Thais clavigera</i>       | 1               | 2.73      | 9.82                                                             | -16.13                                                          |                              |
| 132                    |                | 其他螺类 <i>Screw sp.</i>             | 10              | 2.51      | 9.84                                                             | -16.08                                                          |                              |