

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19257

## 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

高春霞<sup>1,2,3,4</sup>, 戴小杰<sup>1,2,3,4,5</sup>, 田思泉<sup>1,2,3,5</sup>, 王家启<sup>1,3</sup>, 韩东燕<sup>1,2</sup>, 麻秋云<sup>1,2</sup>, 汤艾佳<sup>1</sup>

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
4. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306;
5. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306

**摘要:** 2016 年 2 月和 5 月在浙江南部近海拖网采集到 33 种鱼类和 18 种无脊椎动物, 利用稳定同位素技术测定渔业生物的稳定碳、氮同位素比值( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ), 并以此估算其营养级。研究结果表明: (1)浙江南部近海主要渔业生物同位素比值跨度范围大,  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-19.71\text{\textperthousand} \sim -14.01\text{\textperthousand}$  (跨度  $5.70\text{\textperthousand}$ ),  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $7.05\text{\textperthousand} \sim 13.69\text{\textperthousand}$  (跨度  $6.64\text{\textperthousand}$ ), 其中鱼类的碳、氮同位素跨度范围最大; (2)以滤食性双壳类为基线生物估算浙江南部近海鱼类平均营养级范围为 2.66~4.21, 甲壳类营养级范围为 3.08~3.72, 头足类营养级范围为 2.83~3.49, 腹足类营养级范围为 3.54~3.62, 渔业生物营养级主要处于 3.0~4.0 营养级, 以初级和中级肉食性种类为主; (3)根据聚类和食性文献资料分析浙江南部近海主要渔业生物存在 5 种食性类型, 包括浮游动物食性、杂食性、底栖生物食性、混合食性和游泳动物食性; (4)根据营养结构特征, 浙江南部近海食物网营养结构可划分为 4 个营养群, 初级消费者主要为杂食性种类, 次级消费者主要为小型鱼类、虾类及头足类, 中级消费者主要为底栖蟹类、腹足类和混合食性鱼类, 高级消费者为凶猛肉食性鱼类。本研究建立了浙江南部近海主要渔业生物的连续营养谱, 为生态系统的食物网能量流动和物质循环研究提供科学参考。

**关键词:** 碳氮稳定同位素比值; 浙江南部近海; 渔业生物; 营养级

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)04-0438-16

营养级表征生物在生态系统或群落食物网中的位置, 是海洋食物网结构的重要组成部分, 揭示了生态系统或群落的营养格局和结构组成特征<sup>[1-2]</sup>, 尤其在基于生态系统的渔业管理(ecosystem-based fisheries management, EBFM)中, 营养级有助于划分群落功能群来简化食物网, 对生态系统模型构建及营养动力学研究具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。传统胃含物分析(stomach content analysis, SCA)和现代稳定同位素技术(stable isotope analysis, SIA)是定量开展营养级研究的主要方法<sup>[5-6]</sup>, 其中稳定同位素是近年来在水域生态系统食物网结构及生物食

性来源、营养级位置研究中被广泛应用的一项示踪技术<sup>[7]</sup>, 通过生物组织中富集度低的天然碳稳定同位素  $\Delta\delta^{13}\text{C}$  ( $0 \sim 1\text{\textperthousand}$ ) 来指示食物来源<sup>[8]</sup>, 相对稳定且高富集度的天然氮稳定同位素  $\Delta\delta^{15}\text{N}$  ( $3 \text{\textperthousand} \sim 5 \text{\textperthousand}$ ) 确定生物营养级<sup>[9-10]</sup>。相较 SCA 的瞬时分析及营养级必须整数量化的局限性, SIA 能反映一定时间的生物摄食情况, 且可以连续测出生物的营养位置, 能更准确的量化评估生物的营养级<sup>[3, 5]</sup>, 这在国内外的研究中均有体现, Amezcuia 等<sup>[3]</sup>运用 SIA 和 SCA 对比估算加利福尼亚湾 66 种河口鱼类营养级, 发现 SCA 具有低估现象, SIA 的结

收稿日期: 2019-09-01; 修订日期: 2019-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31902372, 41906074); 浙江省渔业资源专项调查项目(158053); 上海市大学生创新创业项目(201810); 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室开放基金项目(200908).

作者简介: 高春霞(1988-), 女, 博士研究生, 从事渔业资源评估和管理研究. E-mail: cxgao@shou.edu.cn

通信作者: 田思泉, 男, 教授, 从事海洋生态学、渔业资源评估和管理研究. E-mail: sqtian@shou.edu.cn

果更具真实性; 麻秋云等<sup>[11]</sup>通过与历史文献对比, 证实氮稳定同位素是研究食物网营养位置的有效方法。稳定同位素示踪技术现已广泛应用于我国海洋、河口和淡水生态系统的食物网研究中, 蔡德陵等<sup>[4]</sup>以碳、氮同位素建立黄东海从浮游植物到顶级捕食者的食物网连续营养谱; 李忠义等<sup>[12]</sup>运用氮同位素示踪技术比较分析长江口、南黄海海域渔获物的营养级位置; 李云凯等<sup>[13]</sup>通过碳、氮稳定同位素技术发现东太湖食物网主要由浮游营养传递途径和近岸底层营养传递途径组成。

浙江南部近海位于东海中南部, 属于暖温带海区, 受浙江沿岸上升流和台湾暖流影响, 水域内温度适宜, 营养盐类丰富, 小型饵料生物聚集, 是东海渔区高生产力的渔场之一, 渔业生物种类繁多, 海域内食物网结构复杂<sup>[14]</sup>, 对该区域开展生物营养层次研究对后续的食物网结构和功能研究具有重要意义。目前浙江南部近海仅开展了群落结构特征、生物多样性及资源分布等方面研究<sup>[14-16]</sup>, 有关生物的营养层次及海域食物网结构等方面的研究尚未见报道。因此, 本研究运用稳定同

位素技术研究该海域主要渔业生物的碳氮稳定同位素特征, 计算其营养级位置, 进而构建该海域主要生物的连续营养谱, 以期为后续深入开展食物网结构、生态系统物质循环和能量流动研究提供基础资料, 也为浙江沿岸区域生态系统修复、渔业资源保护及合理利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本采集和处理

根据《海洋调查规范》(第6部分海洋生物调查 GB/T 12763.6-2007)<sup>[17]</sup>, 2016年2月和5月在浙江南部近海(120.93°E~122.95°E, 27.21°N~28.97°N)利用大型单船网板底拖作业船开展定点拖网调查(图1)。调查船为浙洞渔10109, 总吨位800 t, 主机马力540 hp, 全网长95 m, 底纲和浮子纲长度80 m, 网囊网目2 cm, 调查期间平均船速为(3.18±0.27) kt, 平均拖时(0.89±0.46) h。调查渔获冷冻保存带回至实验室分析。

在实验室对渔获物开展种类鉴定<sup>[18]</sup>、生物学测定及肌肉样本采集。生物学测定包括体长和体

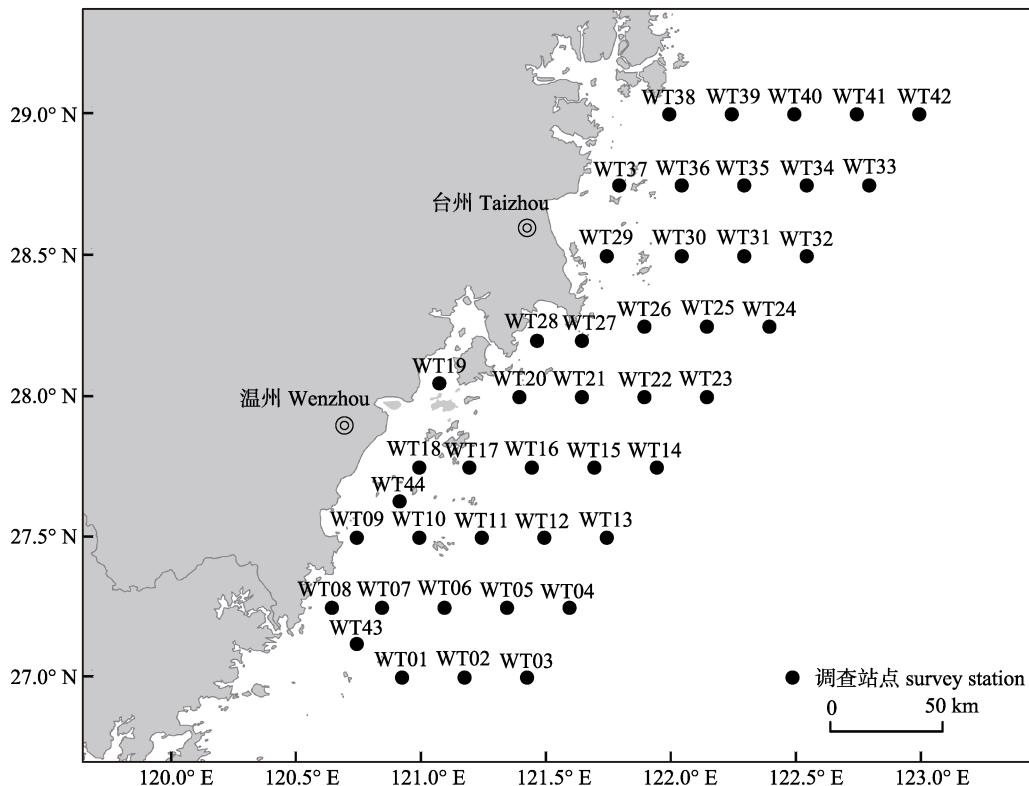


图1 浙江南部近海调查站点

Fig. 1 Survey stations in offshore waters of Southern Zhejiang

重测定, 长度精确到 0.1 cm, 重量精确到 0.1 g。鱼类和无脊椎动物取肌肉组织为分析样品, 样品采集方法为鱼类采集背部肌肉, 虾类取腹部肌肉, 蟹类取第一螯足肌肉, 头足类取腕部肌肉, 螺类去壳取肌肉, 贝类取闭壳肌。所有肌肉样品经 Milli-Q 超纯水清洗后置于德国 Christ Alpha 1-4 冷冻干燥机中于-50 ℃下冷冻干燥 24 h 以上, 干燥后样品经 Restch 球磨仪研磨成均匀粉末, 过 100 目筛再放入样品瓶中干燥保存, 待测。

## 1.2 碳氮稳定同位素分析

所有样品测定在上海海洋大学大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室稳定同位素分析测试平台进行。样品  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  稳定同位素比值由英国 Isoprime 100 质谱仪测定, 碳稳定同位素测定的标准物质为美洲拟箭石(PDB), 氮稳定同位素分析的标准物质为纯化大气中的氮气( $\text{N}_2$ )。为确保仪器的稳定和结果的准确性, 每 10 个待测样品插同位素标准样品 3 个, 仪器测定精度为  $\delta^{13}\text{C} < \pm 0.2\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{15}\text{N} < \pm 0.2\text{\textperthousand}$ 。

C、N 稳定同位素比值计算公式如下:

$$\delta X = [(R_s - R_{st}) - 1] \times 10^3$$

式中,  $\delta X$  表示待测样品  $^{13}\text{C}$  或  $^{15}\text{N}$  稳定同位素比值;  $R_s$  表示样品重同位素与轻同位素比值( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ );  $R_{st}$  为标准美洲拟箭石或大气氮同位素比值。

## 1.3 营养级计算

营养级计算公式为

$$TL = [(\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / \Delta\delta^{15}\text{N}] + 2$$

式中, TL 表示所计算生物的营养级;  $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$  表示消费者氮稳定同位素比值;  $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$  表示食物网基准生物(初级生产者或初级消费者)的氮稳定同位素比值;  $\Delta\delta^{15}\text{N}$  为相邻营养级的富集度, 取平均值 3.4‰<sup>[9]</sup>。基准值和富集度决定营养级计算的正确度, 本研究基于 Post<sup>[9]</sup> 和徐军等<sup>[19]</sup>基线生物的选择准则, 选取东海中北部海域 3 种双壳类软体动物魁蚶(*Scapharca broughtonii*)、文蛤(*Meretrix meretrix*)和四角蛤蜊(*Mactra veneriformis*)作为基线生物(初级消费者), 取这三种基线生物氮稳定同位素比值均值 5.34‰为基准值( $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ ), 2 为基线生物(初级消费者)的营养级。以国际通用的海洋食物网营养层次 1~5 级划分标准确定营养级<sup>[20]</sup>,

第 1 营养级是绿色植物和碎屑, 第 2 营养级是植食性浮游动物或碎屑食性底栖动物, 第 3 营养级为摄食 2 级肉食性动物的肉食性动物, 以此类推。

## 1.4 聚类分析

以  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  作为共同变量, 基于欧式距离(Euclidean distance)开展浙江南部近海主要生物种类的营养类群层次聚类分析(hierarchical cluster analysis), 考虑到指标的数量级上存在较大差异且非正态分布, 选择标准化的欧式距离进行聚类。采用相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)检验聚类后的营养组间稳定同位素比值的差异, 显著性为  $P < 0.05$ 。

## 1.5 统计分析

利用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验各类群间、种间稳定同位素比值的差异性, 数据分析前需进行正态检验和方差齐性检验。以上绘图和统计分析均通过 R 3.5.1 和 Origin 2018 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 碳、氮稳定同位素比值特征

浙江南部近海调查共采集主要渔业生物 5 类 51 种, 测定碳、氮稳定同位素样品 331 个。其中, 鱼类样品 33 种 252 尾, 甲壳类 10 种 55 尾, 头足类 4 种 11 尾, 腹足类 3 种 10 尾, 双壳类 1 种 3 尾, 样品  $\delta^{13}\text{C}$  范围为-19.71‰~ -14.01‰, 总跨度为 5.70‰, 平均值为(-17.06±1.02)‰;  $\delta^{15}\text{N}$  范围为 7.05‰~13.69‰, 总跨度为 6.64‰, 平均值为(10.98±1.23)‰, 其中鱼类和甲壳类、头足类具有一定的营养重叠(图 2)。

浙江南部近海主要鱼类  $\delta^{13}\text{C}$  均值范围为-19.07‰ [日本鳀(*Engraulis japonicus*)]~-15.53‰ [尖头斜齿鲨(*Scoliodon laticaudus*)], 跨度为 3.54‰, 平均值为(-17.32±0.87)‰;  $\delta^{15}\text{N}$  均值范围为 7.57‰ [(虹鮈 *Erisphex pottii*)]~12.87‰ [六指马鲅(*Polydactylus sextarius*)], 跨度为 5.30‰, 平均值为(11.04±1.15)‰。甲壳类  $\delta^{13}\text{C}$  均值范围为-17.30‰ [东海红虾(*Plesionika izumiae*)]~-15.32‰ [三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)], 跨度为 1.98‰, 平均值为(-16.29±0.63)‰;  $\delta^{15}\text{N}$  均值范围为 9.02‰(东海红虾)~11.17‰ [锈斑蟳(*Charybdis*

*feriatus*]), 跨度为 2.15, 平均值为  $(10.24 \pm 0.86)\text{‰}$ 。头足类  $\delta^{13}\text{C}$  均值范围为  $-18.09\text{‰}$  [四盘耳乌贼 (*Euprymna morsei*)]~ $-16.71\text{‰}$  [曼氏无针乌贼 (*Sepiella inermis*)], 跨度为 1.38‰, 平均值为  $(-17.41 \pm 0.61)\text{‰}$ ;  $\delta^{15}\text{N}$  均值范围为 8.15‰ (四盘耳乌贼)~ $10.41\text{‰}$  [剑尖枪乌贼 (*Uroteuthis edulis*)],

跨度为 2.26‰, 平均值为  $(9.34 \pm 0.98)\text{‰}$ 。腹足类  $\delta^{13}\text{C}$  均值范围为  $-15.19\text{‰}$  [习见赤蛙螺 (*Bufonaria rana*)]~ $-14.58\text{‰}$  [铁皮棱鹑螺 (*Tonna zonata*)], 跨度为 0.61‰, 平均值为  $(-14.81 \pm 0.33)\text{‰}$ ;  $\delta^{15}\text{N}$  均值范围为 10.57‰ (铁皮棱鹑螺)~ $10.83\text{‰}$  (习见赤蛙螺), 跨度为 0.26, 平均值为  $(10.71 \pm 0.13)\text{‰}$ 。双

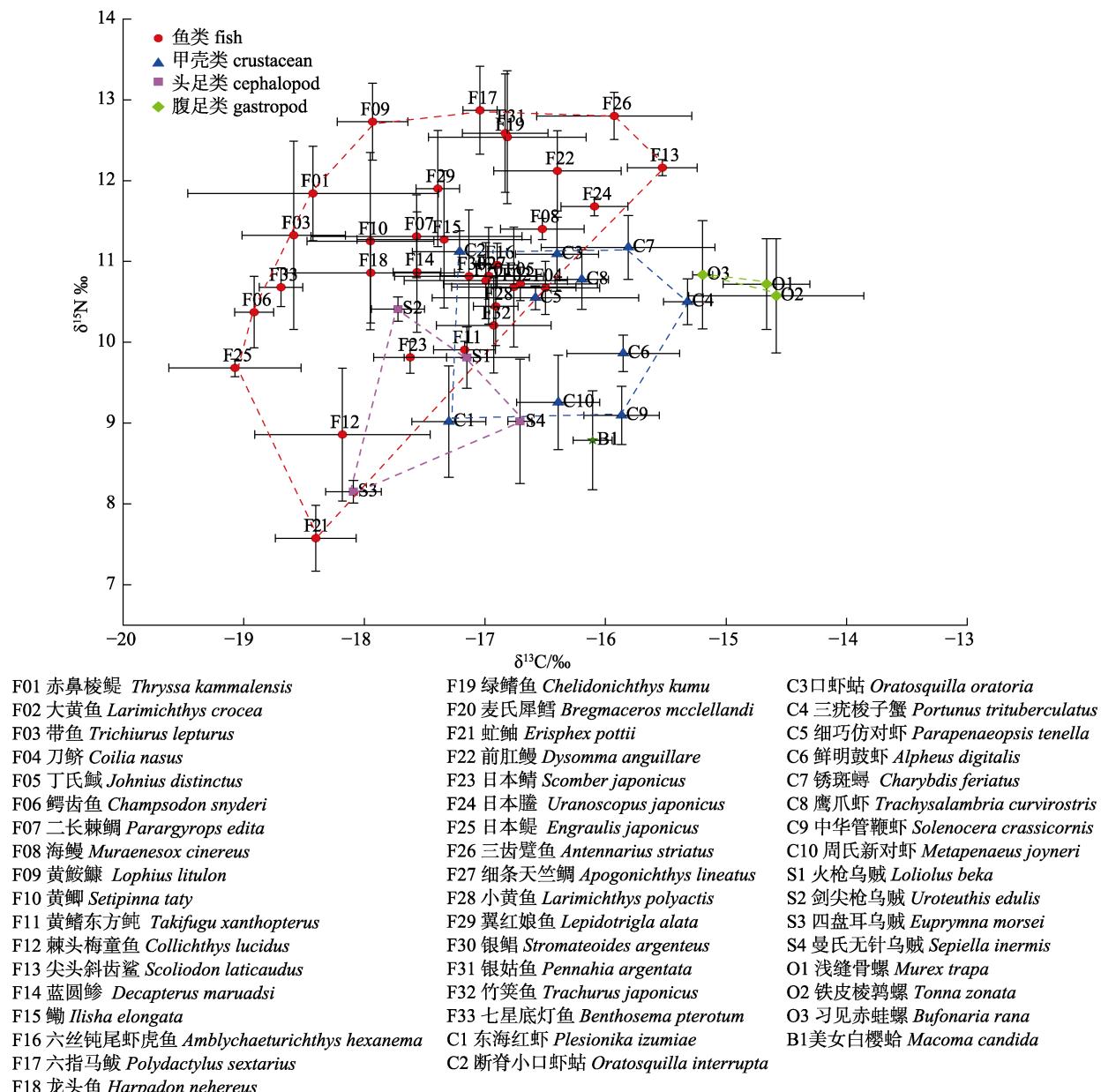


图 2 浙江南部近海主要渔业生物  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  值 ( $\bar{x} \pm \text{SD}$ ) 双位图

红色虚线表示鱼类数据的 95% 置信区间, 蓝色虚线表示甲壳类数据的 95% 置信区间, 粉色虚线表示头足类数据的 95% 置信区间, 绿色虚线表示腹足类数据的 95% 置信区间。

Fig. 2 Stable isotope biplots of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values ( $\bar{x} \pm \text{SD}$ ) of the major fishery organisms from the offshore waters of Southern Zhejiang. Red dashed line represents a 95% confidence interval for fish data; blue dashed line represents a 95% confidence interval for crustacean data; pink dashed line represents a 95% confidence interval for cephalopod data; green dashed line represents a 95% confidence interval for gastropod data.

壳类仅 1 种, 美女白樱蛤(*Macoma candida*)的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $(-16.11 \pm 0.16)\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值为  $(8.79 \pm 0.61)\text{\textperthousand}$ 。

从图 2 可见, 鱼类种间稳定碳、氮同位素比值范围较大, 甲壳类、头足类和腹足类的种间碳、氮同位素比值范围相对较小; 底栖无脊椎动物(甲壳类和腹足类)与鱼类相比, 总体上有更低的  $\delta^{15}\text{N}$  值和更高的  $\delta^{13}\text{C}$  值。经方差齐性检验, 浙江南部近海食物网碳、氮稳定同位素比值的总体方差呈齐性( $P_{\text{C}}=0.21 > 0.05$ ;  $P_{\text{N}}=0.30 > 0.05$ ); 通过单因素方差分析, 不同类群间的碳稳定同位素比值呈极显著差异( $F=9.499$ ,  $P<0.01$ ), 氮稳定同位素比值呈显著差异( $F=3.760$ ,  $P=0.014 < 0.05$ )。两两比较结果显示, 碳稳定同位素比值除鱼类-头足类

间无显著性差异( $P=0.826 > 0.05$ )外, 其他两两组间均呈显著差异( $P<0.05$ ); 氮稳定同位素比值方面, 鱼类-甲壳类、鱼类-头足类间有显著差异( $P<0.05$ ), 其他两两组间无显著差异。

## 2.2 主要渔业生物的聚类分析

基于稳定碳、氮同位素的聚类是将具有相近最终营养来源和营养级的生物聚为一类, 因此同一生物类群会反映出相似的营养和生境信息。以主要渔业生物的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  作为食源和营养级因子展开种间聚类分析, 以 1.5 的标准化欧式距离, 将浙江南部近海的主要渔获消费者划分为 5 个组群(图 3), 经 ANOSIM 分析, 各组群间具有显著差异( $P=0.001 < 0.01$ )。其中, 第一类群(G1,

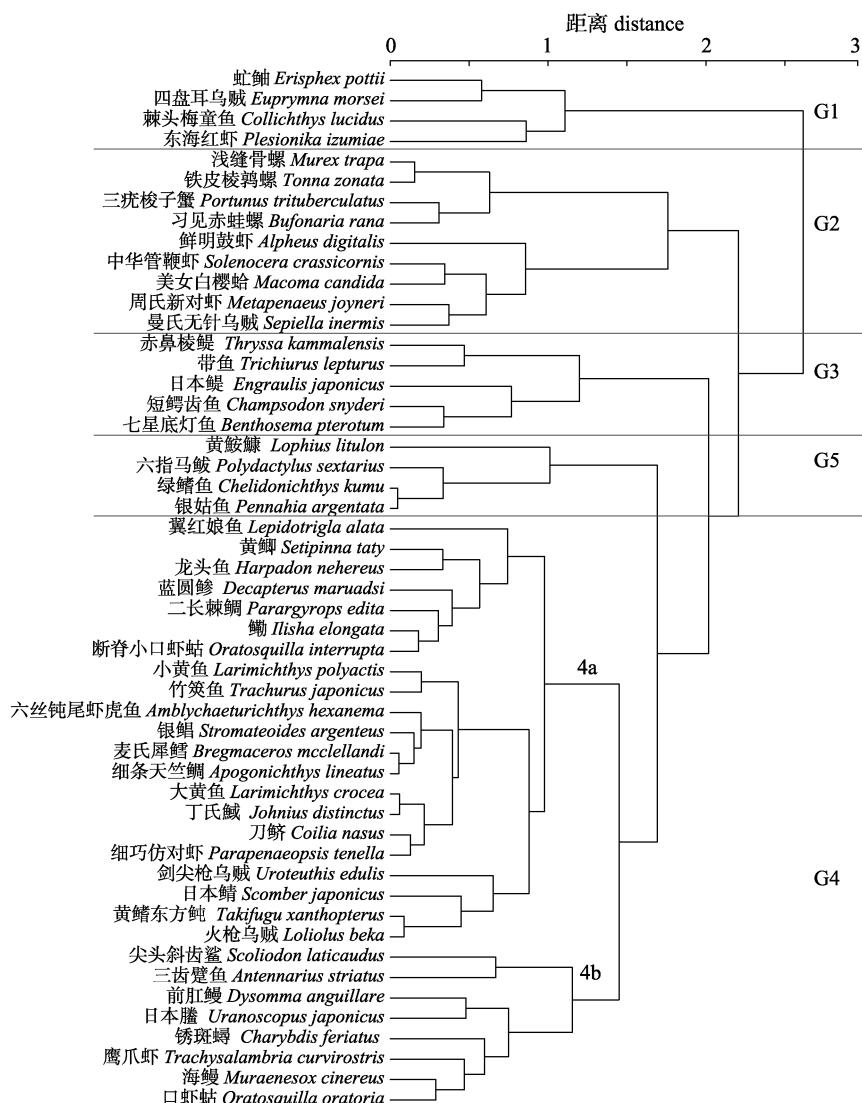


图 3 浙江南部近海主要生物种类  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值的聚类分析

Fig. 3 Hierarchical clustering of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of the major fishery organisms from the offshore waters of Southern Zhejiang

种)  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-17.30\text{\textperthousand} \sim -18.340\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $7.57\text{\textperthousand} \sim 9.02\text{\textperthousand}$ , 主要由虻鮋、四盘耳乌贼和东海红虾等小型近底层种类组成。第二类群(G2, 9 种)  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-16.71\text{\textperthousand} \sim -14.58\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $8.79\text{\textperthousand} \sim 10.89\text{\textperthousand}$ , 主要由浅缝骨螺(*Murex trapa*)、习见赤蛙螺、中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)和三疣梭子蟹等营底栖生活的甲壳类和腹足类组成。第三类群(G3, 5 种)  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-19.07\text{\textperthousand} \sim -18.43\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $9.68\text{\textperthousand} \sim 11.84\text{\textperthousand}$ , 主要由日本鳀、赤鼻棱鳀(*Thryssa kammalensis*)和七星底灯鱼(*Benthosema pterotum*)等中上层浮游动物食性的鱼类组成。第四类群 (G4, 29 种) 种类数量最多, 广食性种类较多, 占总数 56.9%, 又可细分为 4a (21 种) 和 4b (8 种) 两组, 两组差异极显著(ANOVA,  $P < 0.01$ ), 其中 4a 组的  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-17.95\text{\textperthousand} \sim$

$-16.50\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $9.81\text{\textperthousand} \sim 11.90\text{\textperthousand}$ , 以银鲳(*Pennahia argentata*)、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、龙头鱼(*Harpodon nehereus*)和二长棘鲷(*Parargyrops edita*)等混合食性鱼类为主, 混合食性包括浮游和游泳生物混合食性、浮游和底栖生物混合食性; 4b 组由前肛鳗(*Dysomma anguillare*)、尖头斜齿鲨等底栖高级肉食性鱼类组成,  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-16.52\text{\textperthousand} \sim -15.53\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $10.78\text{\textperthousand} \sim 12.80\text{\textperthousand}$ 。第五类群 (G5, 4 种)  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-17.93\text{\textperthousand} \sim -16.81\text{\textperthousand}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $12.54\text{\textperthousand} \sim 12.87\text{\textperthousand}$ , 以六指马鲅、银姑鱼(*Pennahia argentata*)和黄鮟鱇(*Lophius litulon*)等凶猛的肉食性鱼类为主。

### 2.3 主要生物的营养级和连续营养谱

根据营养级计算公式计算浙江南部近海主要渔业生物的营养级并构建连续营养谱(表 1, 图 4)。

表 1 浙江南部近海主要渔业生物营养级

Tab. 1 The trophic levels for the major fishery organisms from the offshore waters of Southern Zhejiang

类群 class	种类 species	数目 number	全长范围/mm body length	营养级 TL		$\Delta \text{TL}$
				$\bar{x} \pm \text{SD}$	TLp	
鱼类 fish	赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i>	11	106–130	$3.91 \pm 0.31$	3.39*	0.52
	大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	10	163–211	$3.57 \pm 0.15$	3.72*	-0.15
	带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>	3	83–115 (肛长 anal length)	$3.76 \pm 0.13$	3.76 <sup>[2]</sup>	0.00
	刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	15	161–305	$3.57 \pm 0.13$	3.00*	0.57
	丁氏鱥 <i>Johnius distinctus</i>	3	132–150	$3.58 \pm 0.19$		
	短鄂齿鱼 <i>Champsodon snyderi</i>	2	81–94	$3.48 \pm 0.05$	3.19 <sup>[2]</sup>	0.29
	二长棘鲷 <i>Parargyrops edita</i>	15	65–182	$3.76 \pm 0.26$		
	海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>	4	370–685	$3.78 \pm 0.10$	3.91 <sup>[2]</sup>	-0.13
	黄鮟鱇 <i>Lophius litulon</i>	11	290–398	$4.17 \pm 0.09$	4.16 <sup>[2]</sup>	0.01
	黄卿 <i>Setipinna taty</i>	11	94–188	$3.74 \pm 0.15$	3.80 <sup>[2]</sup>	-0.06
	黄鳍东方鲀 <i>Takifugu xanthopterus</i>	4	167–263	$3.34 \pm 0.08$	3.37*	-0.03
	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	9	48–161	$3.03 \pm 0.21$	3.64*	-0.61
	尖头斜齿鲨 <i>Scoliodon laticaudus</i>	2	496–497	$4.01 \pm 0.08$		
	蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	4	65–214	$3.63 \pm 0.06$	3.61 <sup>[2]</sup>	0.02
	鳓 <i>Ilisha elongata</i>	7	140–371	$3.74 \pm 0.21$	3.79*	-0.05
	六丝钝尾虾虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>	6	91–162	$3.65 \pm 0.05$	3.40*	0.25
	六指马鲅 <i>Polydactylus sextarius</i>	3	100–140	$4.21 \pm 0.04$	3.79*	0.22
	龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>	17	140–300	$3.62 \pm 0.20$	$3.41^{[2]},$ $4.14^{[22]}$	$0.21$ $-0.52$

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

类群 class	种类 species	数目 number	全长范围/mm body length	营养级 TL		
				$\bar{x} \pm SD$	TLp	$\Delta TL$
鱼类 fish	绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys kumu</i>	26	181–399	4.12±0.19	3.59 <sup>[2]</sup> , 3.68 <sup>*</sup>	0.53 0.44
	麦氏犀鳕 <i>Bregmaceros mcclellandii</i>	9	64–90	3.59±0.20		
	虹鮋 <i>Erisphex pottii</i>	5	39–94	2.66±0.10		
	前肛鳗 <i>Dysomma anguillare</i>	9	313–600	3.99±0.16	3.78 <sup>*</sup>	0.21
	日本鲭 <i>Scomber japonicus</i>	9	140–223	3.32±0.09	3.38 <sup>*</sup>	-0.06
	日本䲢 <i>Uranoscopus japonicus</i>	5	127–214	3.86±0.08		
	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	2	89–134	3.28±0.16	3.16 <sup>[2]</sup>	0.12
	三齿璧鱼 <i>Antennarius striatus</i>	3	104–170	4.19±0.19	4.20 <sup>*</sup>	-0.01
	细条天竺鲷 <i>Apogonichthys lineatus</i>	4	59–90	3.61±0.12	3.29 <sup>[22]</sup>	0.32
	小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	5	108–218	3.5±0.05	3.66 <sup>[2]</sup> , 3.62 <sup>[22]</sup>	-0.16 -0.12
	翼红娘鱼 <i>Lepidotrigla alata</i>	6	111–195	3.93±0.05	3.47 <sup>*</sup>	0.46
	银鲳 <i>Stromateoides argenteus</i>	7	120–297	3.61±0.18	3.52 <sup>[2]</sup>	0.09
	银姑鱼 <i>Pennahia argentata</i>	13	135–235	4.13±0.10	3.93 <sup>[2]</sup> 4.03 <sup>[22]</sup>	0.20 0.10
	竹筍鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	6	68–190	3.43±0.14	3.67 <sup>[2]</sup>	-0.24
	七星底灯鱼 <i>Benthosema pterotum</i>	6	42–50	3.57±0.05	3.23 <sup>[2]</sup> 3.34 <sup>[22]</sup>	0.34、 0.23
甲壳类 crustacean	东海红虾 <i>Plesionika izumiae</i>	3	34–45	3.08±0.2		
	断脊小口虾蛄 <i>Oratosquilla interrupta</i>	11	55–94	3.7±0.08		
	口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	8	77–142	3.69±0.13		
	三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	5	62–80	3.52±0.08		
	细巧仿对虾 <i>Parapenaeopsis tenella</i>	3	32–60	3.53±0.04		
	鲜明鼓虾 <i>Alpheus digitalis</i>	3	36–57	3.33±0.07	3.34 <sup>[2]</sup>	-0.01
	锈斑蟳 <i>Charybdis feriatus</i>	3	43–72	3.72±0.12		
	鹰爪虾 <i>Trachysalambria curvirostris</i>	6	69–155	3.6±0.11	3.55 <sup>[2]</sup>	0.05
	中华管鞭虾 <i>Solenocera crassicornis</i>	6	56–109	3.1±0.11		
	周氏新对虾 <i>Metapenaeus joyneri</i>	7	68–113	3.15±0.17		
头足类 cephalopod	火枪乌贼 <i>Loliolus beka</i>	4	36–79	3.31±0.11		
	剑尖枪乌贼 <i>Uroteuthis edulis</i>	3	73–86	3.49±0.04	4.01 <sup>[2]</sup>	-0.52
	四盘耳乌贼 <i>Euprymna morsei</i>	2	34–35	2.83±0.23		
	曼氏无针乌贼 <i>Sepiella inermis</i>	2	62–109	3.08±0.04		
腹足类 gastropod	浅缝骨螺 <i>Murex trapa</i>	5		3.58±0.17		
	铁皮棱鹑螺 <i>Tonna zonata</i>	3		3.54±0.21		
	习见赤蛙螺 <i>Bufonaria rana</i>	2		3.62±0.20		
双壳类 bivalve	美女白樱蛤 <i>Macoma candida</i>	3		3.01±0.18		

注: \*表示数据来源于 Fishbase (www.fishbase.org).

Note: \* indicates data from Fishbase (www.fishbase.org).

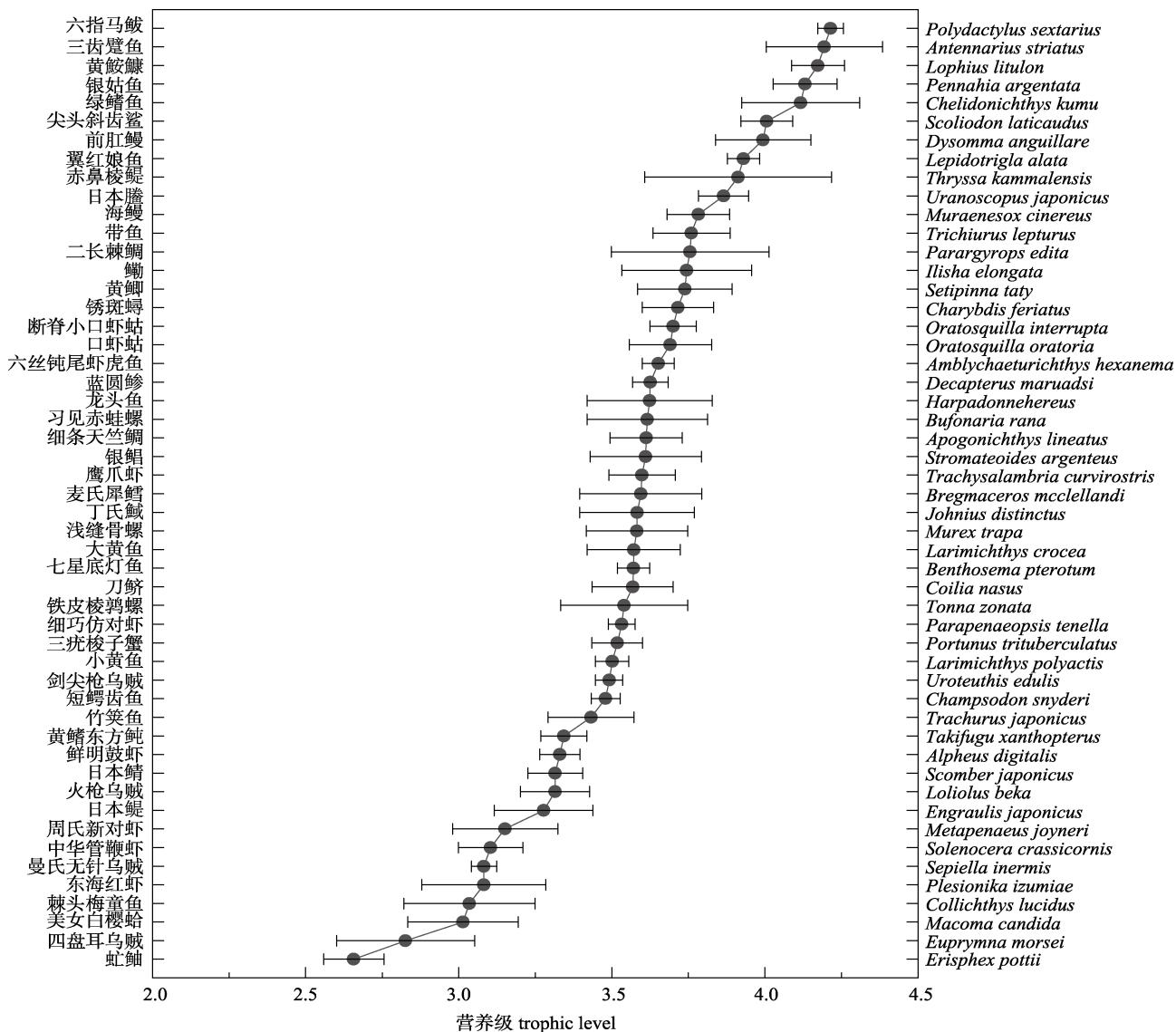


图4 浙江南部近海主要渔业生物连续营养谱

Fig. 4 Continuous nutrition spectra of the major fishery organisms in offshore waters of Southern Zhejiang

消费者营养级范围为 2.66~4.21, 平均值为 3.57, 营养层次长度为 3 级。鱼类营养级范围为 2.66~4.21, 平均值为 3.57, 其中虹鮀营养级最低, 小于 3.00; 尖头斜齿鲨、黄鮟鱇和三齿躄鱼(*Antennarius striatus*)等的营养级均高于 4.00, 位于食物链顶端。甲壳类营养级范围为 3.08~3.72, 其中锈斑蟳的营养级最高, 东海红虾的营养级最低, 虾蛄的营养级高于多数虾类。头足类营养级范围为 2.83~3.49, 其中四盘耳乌贼营养级低于 3.00, 剑尖枪乌贼的营养级最高。腹足类营养级范围为 3.54~3.62, 种内营养级间差异较小。

浙江南部近海位于 2.5~3.0 营养级的渔业生

物有 2 种, 占总种类数的 3.92%, 包括虹鮀和四盘耳乌贼; 位于 3.0~4.0 营养级的生物种类有 43 种, 占总数的 84.31%, 包括 27 种鱼类、10 种甲壳类、3 种头足类、3 种腹足类, 其中处于 3.5~4.0 之间的渔业生物有 29 种(56.86%), 均为鱼类, 包括小黄鱼、龙头鱼及二长棘鲷等肉食性鱼类, 而处于 3.0~3.5 之间的渔业生物有 14 种(27.45%), 包括小型鱼类、虾类和头足类, 代表生物有东海红虾、日本鳀和火枪乌贼(*Loligo beka*)等; 位于 4.0~4.5 营养级的种类有 6 种, 占总数的 11.76%, 主要包括尖头斜齿鲨、黄鮟鱇和六指马鲅等凶猛性鱼类。

### 3 讨论

考虑到中国近海生态系统生物种类的多样性和食物网的复杂性,本研究基于唐启升<sup>[21]</sup>“简化食物网”的策略,根据张波等<sup>[22]</sup>重要生物种类筛选方法,选择占总生物量绝对多数(90%)的生物种类为主要研究对象,研究类群覆盖鱼类、甲壳类和头足类等,基本涵盖浙江南部近海的主要渔业生物种类,能全面反映该海域食物网的基本营养结构状况,对基于种群的生态能量通道模型中功能群划分具有重要意义。

#### 3.1 不同水域稳定同位素特征分析

本研究水域位于东海中南部,纵观东海邻近水域的研究报道,纪炜炜等<sup>[23]</sup>调查东海中北部游泳动物 23 种,  $\delta^{13}\text{C}$  值范围  $-20.70\text{\textperthousand} \sim -14.70\text{\textperthousand}$ (均值  $-16.69\text{\textperthousand}$ , 跨度  $6.00\text{\textperthousand}$ ),  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $6.90\text{\textperthousand} \sim 13.40\text{\textperthousand}$ (均值  $10.89\text{\textperthousand}$ , 跨度  $6.50\text{\textperthousand}$ ); 东海北部及邻近水域<sup>[24]</sup>游泳生物 38 种,  $\delta^{13}\text{C}$  值范围  $-19.02\text{\textperthousand} \sim -14.19\text{\textperthousand}$ (跨度  $4.83\text{\textperthousand}$ ),  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $8.67\text{\textperthousand} \sim 12.29\text{\textperthousand}$ (跨度  $3.62\text{\textperthousand}$ ); 本研究与东海中北部水域相同种类数达到 17 种,基本重合东海中、北部水域中的重要生物种类,水域内  $\delta^{13}\text{C}$  范围为  $-19.71\text{\textperthousand} \sim -14.01\text{\textperthousand}$ (均值  $-17.06\text{\textperthousand}$ , 跨度  $5.70\text{\textperthousand}$ )、 $\delta^{15}\text{N}$  范围为  $7.05\text{\textperthousand} \sim 13.69\text{\textperthousand}$ (均值  $10.98\text{\textperthousand}$ , 跨度  $6.64\text{\textperthousand}$ ),与纪炜炜等<sup>[23]</sup>研究范围基本一致,进一步证实了稳定同位素作为一项示踪技术能有效揭示长时间尺度生物的栖息环境信息。另外,本研究与南海中西部<sup>[25]</sup>、长江口<sup>[12]</sup>及胶州湾<sup>[11]</sup>等南北方其他水域研究相比(图 5),南海中西部的  $\delta^{13}\text{C}$ 、

$\delta^{15}\text{N}$  特征比本研究贫化的多,究其原因,除了调查水域不同外,也可能与研究缺少底栖样本有关;本研究与胶州湾( $\delta^{15}\text{N}: 9.68\text{\textperthousand} \sim 14.11\text{\textperthousand}$ , 均值  $12.39\text{\textperthousand}$ ;  $\delta^{13}\text{C}: -17.16\text{\textperthousand} \sim -22.49\text{\textperthousand}$ , 均值  $-18.83\text{\textperthousand}$ )相比, $\delta^{15}\text{N}$  稍贫化, $\delta^{13}\text{C}$  稍富集,实际上浙江南部与胶州湾分属南北方典型水域,水文环境特征不同会造成食物源的稳定同位素比值差异,进而影响消费者的稳定同位素组成;与长江河口区域相比,近海水域食物网  $\delta^{13}\text{C}$  范围远小于长江口水域(跨度  $15.53\text{\textperthousand}$ ),河口为咸淡水交汇区,浮游植物、底栖藻类、淡水植物和悬浮物等食物网基础食源丰富<sup>[26]</sup>,水生生物的食物源选择性要更大,而近海水域初始食物源相对单一,主要为浮游植物和悬浮颗粒物等<sup>[4]</sup>,生物的饵料选择性相对贫乏。纵观南北水域渔业生物碳稳定同位素比值特征,随着纬度的升高,水域食物网中最负  $\delta^{13}\text{C}$  值出现贫化趋势,这与蔡德陵等<sup>[27]</sup>研究 9 个不同生态系统中  $\delta^{13}\text{C}$  变动趋势基本一致,其中最北的格陵兰东北海域  $\delta^{13}\text{C}$  值最负,热带区域的马来西亚海域  $\delta^{13}\text{C}$  值最高,温带的胶州湾  $\delta^{13}\text{C}$  值居中,这一现象反映了栖息环境在同位素分布上的影响,一般较高的日照水平会引起初级生产者的碳富集<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 $\delta^{13}\text{C}$ 和食源分析

生物组织内的稳定同位素信息可以真实地反映生物体长生活周期的生存状况,其中稳定碳同位素比值范围可以表征食物网的食源多样性水平,范围越大,食源多样性水平越高<sup>[25]</sup>。有研究<sup>[29-30]</sup>发现食源多样性水平高的海域,饵料种类多,生

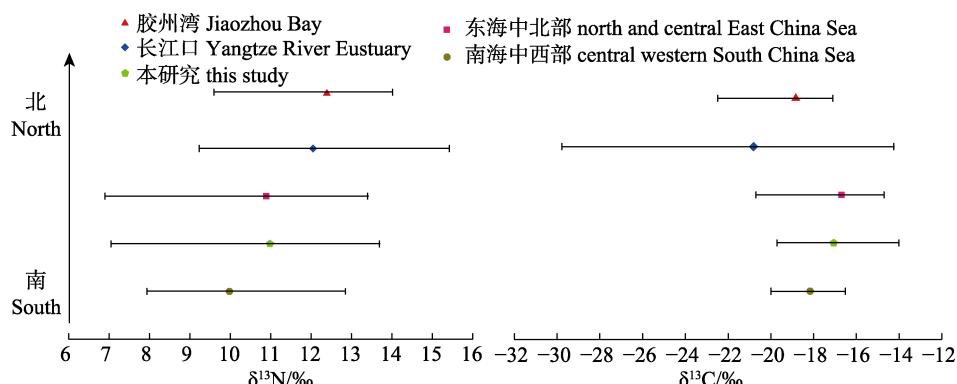


图 5 不同水域稳定碳、氮同位素比值比较

Fig. 5 Comparison of stable isotope ratios of carbon and nitrogen among different water areas

物摄食特化程度不高, 广食性种类居多。本研究海域  $\delta^{13}\text{C}$  值跨度范围达到 5.70‰, 食物来源呈现多样性, 且不同类群间的  $\delta^{13}\text{C}$  比值差异极显著 ( $P<0.01$ ), 各类群间的饵料来源组成复杂, 摄食特化程度低, 这一研究结果与纪炜炜等<sup>[23]</sup>和魏虎进等<sup>[28]</sup>一致。

稳定碳同位素比值在食物网中富集较低, 被广泛用于示踪和区分食物来源<sup>[7]</sup>。本研究中鱼类与甲壳类、腹足类的  $\delta^{13}\text{C}$  值间均呈极显著差异 ( $P<0.01$ ), 尤其是鱼类和腹足类  $\delta^{13}\text{C}$  最大差值达 4.49‰, 这主要与栖息水层有关, 中上层与底层生物所摄取的营养源和能量不同, 也间接说明浙江南部近海可能存在浮游食物链和底栖食物链。Davenport 等<sup>[31]</sup>、Pinnegar 等<sup>[32]</sup>发现碳同位素高的生物基本与底栖食物网有关, 底栖生物具有强碳同位素富集能力, 低的生物则与浮游食物网有关, 浮游种类比底栖种类的碳稳定同位素比值要贫许多, 而 Chandra 等<sup>[33]</sup>发现介于两水层之间的生物, 其稳定同位素比值也介于两者之间, 这种现象在本研究中较为明显, 营底栖生活的刮食性腹足类如浅缝鼓螺  $\delta^{13}\text{C}$  值为 -14.67‰, 而栖息于中上层的以浮游动物为食的日本鳀  $\delta^{13}\text{C}$  值为 -19.07‰, 远贫于底栖种类; 其他种类  $\delta^{13}\text{C}$  值主要集中在 -16.00‰~18.00‰。浙江南部近海底栖的 3 种腹足类  $\delta^{13}\text{C}$  值范围与蔡德陵等<sup>[27]</sup>崂山湾腹足类  $\delta^{13}\text{C}$  值范围 (-14.10‰~16.00‰) 一致, 反映了底栖硅藻或食物有机碎屑等可能是腹足类的主要食源; 底层甲壳类多营底栖生物食性, 一般植食性的甲壳类  $\delta^{13}\text{C}$  值会较低, 本研究的甲壳类  $\delta^{13}\text{C}$  值 (-17.30‰~15.32‰) 相对较高, 多为底栖生物食性种类, 如三疣梭子蟹 (-15.32‰) 主要以底栖爬行或埋栖种类为食, 鲜明鼓虾 [*Alpheus digitalis* (-15.85‰)] 主要摄食双壳类和腹足类<sup>[34-35]</sup>。调查渔获的美女白樱蛤 (-16.11‰) 与底栖腹足类聚为一类, 表现了底栖生物食性, 崂山湾<sup>[27]</sup>双壳类 (-17.80‰~21.00‰) 的食物来源为悬浮有机物 (particulate organic matter, POM) 和再悬浮底泥有机物 (soil organic matter, SOM), 而本研究双壳类的  $\delta^{13}\text{C}$  值比之更富集, 食性还需进一步研究。浙江南部近海的鱼类 (-19.07‰~15.53‰) 种类多,

食性广, 如七星底灯鱼为浮游动物食性、龙头鱼和小黄鱼等营混合食性, 黄鮟鱇是典型的游泳动物食性等<sup>[36]</sup>, 食源呈现多样化。近海生态系统的基础碳源有浮游植物、有机碎屑和悬浮颗粒物等<sup>[4]</sup>, 今后将对本研究的可能碳源及其贡献率开展深入研究。

### 3.3 聚类与摄食习性分析

稳定同位素聚类分析为描述同一类群的摄食模式提供了方法支持, Davenport 等<sup>[31]</sup>曾基于稳定碳、氮同位素将澳大利亚东南大陆架水域的 87 种鱼类划分为 5 组类群, 并描述了各类群的组成特征及对应的摄食模式。本研究基于稳定碳、氮同位素特征将浙江南部近海渔业生物分成 5 组(图 6), 根据 Fishbase 和现有食性文献资料<sup>[20, 23-24, 34, 36-44]</sup>比对分析各类群的摄食习性特征, 其中 G1 组由小型近底层杂食性生物组成, 主要摄食浮游生物、底栖藻类和残屑等, 小型个体缺少随机摄食高营养级猎物的机会且捕食范围较窄<sup>[31]</sup>, 因此本类群的营养级都较低。G2 组主要由小型底栖生物组成, 包括 4 种甲壳类、3 种腹足类和 1 种双壳类, 主要为底栖食性, 三疣梭子蟹和习见赤蛙螺的胃含物分析资料<sup>[34, 42]</sup>显示小型鱼类、虾蟹类、蛇尾类和贝类是其主要生物饵料, 饵料营养级相对较低; 另外, 因底栖生物的固碳能力较强, 故该类群的  $\delta^{13}\text{C}$  值最富集。G3 组主要由浮游动物食性鱼类组成,  $\delta^{13}\text{C}$  值最贫化, 胃含物文献资料<sup>[20, 37]</sup>显示饵料种类有桡足类、太平洋磷虾 (*Euphausia pacifica*) 和细螯虾 (*Leptochela gracilis*) 等大型浮游动物, 该类群中个别种群的营养级较高, 尤其赤鼻棱鳀的营养级远高于 Fishbase 记录, 其可能并不属于浮游动物食性, 李忠义等<sup>[45]</sup>研究发现南黄海水域的赤鼻棱鳀食物源主要为仔稚鱼, 本研究中赤鼻棱鳀的  $\delta^{13}\text{C}$  值、 $\delta^{15}\text{N}$  值与其相近, 推测本研究水域的赤鼻棱鳀摄食对象与该研究可能相似。G4 组种类最多, 包括 22 种鱼类、5 种甲壳类和 2 种头足类, 多为底栖和游泳捕食者, 营混合食性, 存在最大的摄食随机性; 该类群的 4a 组包括 17 种鱼类和 4 种无脊椎动物, 包括小黄鱼、刀鲚 (*Coilia nasus*)、二长棘鲷、龙头鱼和麦氏犀鳕 (*Bregmaceros mcclellandi*) 等中小型混合食性鱼类,  $\delta^{13}\text{C}$  值位于 G2 组(底栖) 和 G3 组(浮游) 之间, 结合

胃含物文献<sup>[20, 23, 34, 36-37]</sup>, 该类群摄食模式可归为浮游和游泳动物混合食性; 4b 组由 5 种肉食性鱼类和 3 种肉食性甲壳类组成,  $\delta^{13}\text{C}$  值相对偏高, 与 G2 组存在摄食重叠, 生物食性趋于底栖食物链特征, 摄食模式可归为底栖和游泳动物混合食性。G5 组主要由高级肉食性捕食者组成, 其中黄鮟鱇 (F09) 为游泳动物食性, 摄食的小型鱼类和头足类等拥有相对较高的营养级; 另外的 4 种鱼类与底

栖动物组(G4-4b)存在摄食重叠, 主要摄食较高营养级的虾蟹类。纵观各类群的生物组成及摄食特征, 浙江南部近海生物食性类型包括杂食性、底栖食性、浮游动物食性、混合食性和游泳动物食性, 其中除底栖食性类群(G2 组)和浮游食性类群(G3 组)摄食存在显著差异外, 其他食性类群都具有一定的摄食重叠, 尤其混合食性类群(G4 组)与其他组的摄食重叠最高。

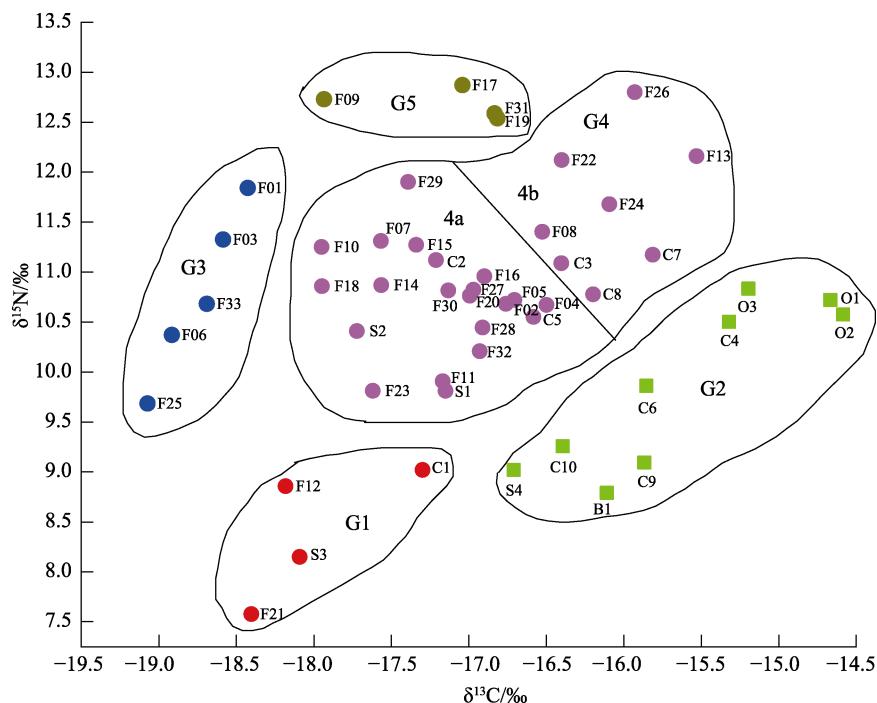


图 6 浙江南部近海主要渔业生物不同类群稳定同位素比值

图中各点和五组类群含义见图 2 与图 3.

Fig. 6 Stable isotope values for different groups of major fishery organisms from the offshore waters of Southern Zhejiang  
The meanings of data points and five groups in the figure are shown in Fig. 2 and Fig. 3.

### 3.4 基线值和富集因子分析

在利用稳定同位素技术开展食物网结构研究时, 需要选择准确的氮稳定同位素基准(baseline)以及富集因子(trophic enrichment factor, TEF)来定量生物营养位置。由于基线反映的是最初物质来源的同位素特征, 通常研究者的选对象多为初级生产者或初级消费者<sup>[46-47]</sup>。然而, 由于初级生产者的同位素时空变化较大, 而小型底栖动物的季节变化不显著<sup>[48]</sup>, 因此研究多建议选择低周转率、长寿命的初级消费者如螺、贝类作为同位素基准<sup>[9]</sup>。徐军等<sup>[19]</sup>认为在跨生态系统比较研究中, 选择相同或相似的  $\delta^{15}\text{N}$  基准可以避免营养级

变化引起的误判。在基线生物的选择上, Post<sup>[9]</sup>发现滤食性贻贝 (*Mytilus edulis*) 的氮稳定同位素能较好地反映海洋浮游食物网的同位素特征; Jennings 等<sup>[49]</sup>认为滤食性双壳类软体动物生活史周期长、同位素周转速率慢, 适合作为基准生物; 国内研究中双壳类的栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*)<sup>[40]</sup>、贻贝<sup>[4]</sup>等都有作为基线生物开展营养级研究。本研究中的美女白樱蛤是双壳类, 但是考虑其  $\delta^{15}\text{N}$  值较高, 无法真实反映初级生产者特征, 因此不选择其为基线, 而是参照纪炜炜<sup>[2]</sup>的研究, 选取滤食性双壳类稳定氮同位素的平均值作为基准, 开展东海海域食物网营养级的计算和比较。

在食物网的能量传递过程中, 稳定氮同位素会出现一定程度的分馏, 从而在消费者体内富集, 即相邻营养级间存在稳定的富集因子, 此值通常取已发表经验值或室内模拟实验值作为富集因子。不同组织的同位素分馏效应差异很大, Roth 等<sup>[50]</sup>发现肌肉的氮同位素富集为 3.3‰~3.5‰。考虑到本研究样本为肌肉组织, 并且为确保研究方法的一致性, 本研究基于实际选择通用的 3.4‰ 作为营养富集因子, 国内其他研究者根据实际情况有不同的选择, 蔡德陵等<sup>[4]</sup>通过室内饲养鯷获得氮富集因子为 2.5‰, 闫光松等<sup>[51]</sup>考虑室内饲养环境过于理想化以及河口区域食源的多样性, 选取两者的平均值作为富集因子。选择合适的基准和富集因子对评价高营养级生物功能及多生态系统比较至关重要, 而在实际研究中, 需要根据具体的研究问题分析, 充分考虑基准可变性的影响因子。

### 3.5 营养级比较分析

稳定氮同位素比值用于确定生物的营养位置, 浙江南部近海主要渔业生物的营养级范围为 2.66~4.21, 营养层次为 3 级, 与同样采用稳定同位素技术的东海中北部<sup>[2]</sup>(27°N~34°N, 122°E~127°E)游泳生物平均营养级范围(2.71~4.16)基本一致。可比较的 14 种鱼类和 3 种无脊椎动物中(表 1), 10 种鱼类和 1 种无脊椎动物在本研究中的结果略高于东海中北部, 营养级差值范围在 0.00~0.53, 其余种类略低于东海中北部研究结果, 差值范围为 0.01~0.52, 与蔡德陵等<sup>[4]</sup>比较黄东海基于稳定同位素与胃含物分析计算的营养级偏差在 0.5 个营养级以内的结果基本一致。总体来看, 基于稳定同位素技术的两项研究中共同种类的营养级相差不大, 七星底灯鱼( $\Delta TL=0.34$ )和短鄂齿鱼[*Champsodon snyderi* ( $\Delta TL=0.29$ )]等低级肉食性饵料生物的营养级出现小幅提高, 竹筴鱼[*Trachurus japonicus* ( $\Delta TL=-0.24$ )]、海鳗[*Muraenesox cinereus* ( $\Delta TL=-0.13$ )]等中级肉食性种类的营养级出现小幅下降, 而高级肉食性种类的绿鳍鱼(*Chelidonichthys kumu*)和剑尖枪乌贼的营养级差值最大( $>0.50$ )。本研究的绿鳍鱼营养级为 4.12, 高于东海中北部 0.53 个营养级; 剑尖枪乌贼营养级为 3.41, 低于东海中北部 0.52 个营养级, 这种

营养级的变动可能与由个体发育引起的摄食习性转变有关<sup>[52]</sup>, 不同体长的同种生物可能在生态系统食物网中处于不同的营养级。研究中绿鳍鱼的平均体长为( $230.69\pm51.73$ ) mm, 远高于东海中北部的( $119.2\pm16.6$ ) mm, 文献资料显示其幼体时期主要摄食底栖虾、蟹类, 至成体时期, 尤其是体长大于 200 mm 后食性转变为以小型鱼类为主要摄食对象<sup>[43]</sup>, 这种个体发育引起的食性转变现象在棘头梅童鱼和黄鮟鱇上都曾有发生<sup>[38-39]</sup>。剑尖枪乌贼是为凶猛性肉食性种类, 本研究中平均胴长为 ( $77.3\pm9.2$ ) mm, 小于东海中北部 [( $118.7\pm22.7$ ) mm], 与营养级特征一致, 然而由于并无该种类食性的相关报道, 因此仅推测是体长差异造成的营养级差异, 后续将对其不同发育阶段的食性组成展开深入研究。

本研究中 18 种鱼类的营养级与 Fishbase 和张波等<sup>[20]</sup>东海区域胃含物分析结果相比, 差值范围在 -0.61~0.57, 其中 16 种鱼类基于稳定同位素分析的营养级与胃含物分析营养级的差值范围在 0.5 个营养级范围之内, 麻秋云等<sup>[11]</sup>、蔡德陵等<sup>[4]</sup>认为 0.5 个营养级差值在误差控制范围内, 表明两方法的结果基本一致; 另外的 2 种鱼类营养级计算结果略高于 0.5, 究其原因, 棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)和刀鲚为广食性和洄游性种类, 食谱宽广, 其生态习性(即摄食饵料种类组成的变化)可能是造成营养级波动的主要原因, 这种波动在其他研究中已有体现, 如杨纪明<sup>[37]</sup>估算渤海的刀鲚营养级为 3.40 (与本研究差值 0.17), 贺舟挺等<sup>[38]</sup>估算东海北部近海棘头梅童鱼的营养级为 3.28 (与本研究差值 0.25), 与本研究结果基本一致, 表明广食性种类存在一定的营养级波动范围。因此, 在本研究的 18 种鱼类营养级估算上, 稳定同位素技术和胃含物分析并无太大差异。

### 3.6 食物网营养结构分析

稳定同位素为海洋食物网营养结构研究提供了重要工具, 基于稳定氮同位素的生物营养位置揭示了海洋生态系统的食物网营养结构<sup>[4]</sup>。浙江南部近海鱼类的营养级范围为 2.66~4.21, 其中虻鮋、四盘耳乌贼等营养级最低; 初级和中级肉食性鱼类如小黄鱼、银鲳等营养级居中, 是食物网

的主要组成种类；营游泳动物食性的鱼类如黄鮟鱇等营养级处于食物链顶端。本研究中无脊椎动物的营养级范围为 2.83~3.72，属于 2 个营养层次，其中甲壳类的营养级要高于头足类，与纪炜炜<sup>[2]</sup>研究结果相反，这可能与本研究采集的头足类种类相对较少及摄食饵料组成差异有关。

本研究参考纪炜炜<sup>[2]</sup>食物网营养结构划分标准，将浙江南部近海食物网渔业生物划分为 4 个营养群：初级消费者(2 种，2.5~3.0)，包括虹鮨和四盘耳乌贼两种小型杂食性生物，主要摄食浮游生物、底栖藻类和残屑<sup>[41]</sup>；次级消费者(14 种，3.0~3.5)，由无脊椎动物虾类、小型鱼类和头足类组成，包括以日本鳀和短鳄齿鱼为代表的小型鱼类，以及以东海红虾、曼氏无针乌贼、剑尖枪乌贼、中华管鞭虾、鲜明鼓虾等为代表的无脊椎动物，其中小型鱼类多为浮游动物食性，主要摄食糠虾类、磷虾类和桡足类等<sup>[36-37]</sup>，无脊椎动物以中国毛虾(*Acetes chinensis*)、细螯虾、虾类幼体和鱼类幼体等为食<sup>[34-35]</sup>。中级消费者(28 种，3.5~4.0)，种类最多，由底栖肉食性虾蟹类和腹足类、混合食性鱼类和低级肉食性鱼类组成，其中底栖虾蟹类包括三疣梭子蟹、鹰爪虾(*Trachysalambria curvirostris*)、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)和锈斑蟳等，腹足类有铁皮棱鹑螺和习见赤蛙螺等，混合食性鱼类包括小黄鱼、刀鲚、银鲳等，低级肉食性鱼类包括六丝钝尾虾虎鱼(*Amblychaetrichthys hexanema*)、带鱼(*Trichiurus lepturus*)、海鳗和翼红娘鱼(*Lepidotrigla alata*)等，该营养类群的摄食对象主要有磷虾类浮游动物、小型鱼类、头足类和底栖甲壳类等<sup>[36-37, 41]</sup>。高级消费者(7 种，≥4.0)，均为鱼类，以前肛鳗、尖头斜齿鲨、黄鮟鱇和六指马鲅为代表，主要摄食底层虾蟹类和低级肉食性鱼类<sup>[36, 39, 41]</sup>，属于凶猛的大中型肉食性种类，处于食物链顶端。

纵观浙江南部近海主要渔业生物的营养状况，一些小型饵料鱼类如短鳄齿鱼、七星底灯鱼、细条天竺鲷(*Apogonichthys lineatus*)和黄卿(*Setipinnataty*)等<sup>[2, 53]</sup>在食物网中的营养地位显著提升，这些种类在食物网中起承上启下作用，与优势种类小黄鱼和带鱼等、高级捕食者黄鮟鱇和银姑鱼等

作为浙江南部近海的重要种，共同维持近海生态系统食物网结构稳定性。

### 参考文献：

- [1] Pauly D, Palomares M L D. Fishing down marine food webs: An update[M]//Waters in Peril. Boston: Springer US, 2001: 47-56.
- [2] Ji W W. Ecological studies on the food web structures and trophic relationships of Northern and Central East China Sea using stable carbon and nitrogen isotopes[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011. [纪炜炜. 东海中北部主要游泳动物的食物网结构和营养关系初步研究: 基于稳定同位素技术[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.]
- [3] Amezcua F, Muro-Torres V, Soto-Jiménez M F. Stable isotope analysis versus TROPH: A comparison of methods for estimating fish trophic positions in a subtropical estuarine system[J]. Aquatic Ecology, 2015, 49(2): 235-250.
- [4] Cai D L, Li H Y, Tang Q S, et al. Construction of a continuous trophic spectrum for the food web of Yellow Sea and East China Sea: insight from carbon and nitrogen stable isotope results[J]. Science in China (Series C), 2005, 35(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, 35(2): 123-130.]
- [5] Carscadden W M A, Vandenberg K, Lawson J M, et al. Estimating trophic position in marine and estuarine food webs[J]. Ecosphere, 2012, 3(3): 1-20.
- [6] Divine L M, Bluhm B A, Mueter F J, et al. Diet analysis of Alaska Arctic snow crabs (*Chionoecetes opilio*) using stomach contents and  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  stable isotopes[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2017, 135: 124-136.
- [7] Lin G H. Stable Isotope Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013. [林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 159-175]
- [8] Peterson B J, Howarth R W, Garrett R H. Sulfur and carbon isotopes as tracers of salt-marsh organic matter flow[J]. Ecology, 1986, 67(4): 865-874.
- [9] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [10] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1987, 18(1): 293-320.
- [11] Ma Q Y, Han D Y, Liu H, et al. Construction of a continuous trophic spectrum for the food web in Jiaozhou bay using stable isotope analyses[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7207-7218. [麻秋云, 韩东燕, 刘贺, 等. 应用稳定同位素技术构建胶州湾食物网的连续营养谱[J]. 生态学报, 2015,

- 35(21): 7207-7218.]
- [12] Li Z Y, Zuo T, Dai F Q, et al. Trophic level analysis of organisms from Changjiang estuary and adjacent waters of southern Yellow Sea in spring with stable isotope technology[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(1): 103-109. [李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 运用稳定同位素技术研究长江口及南黄海水域春季拖网渔获物的营养级[J]. 中国水产科学, 2010, 17(1): 103-109.]
- [13] Li Y K, Gong Y. Food web structure of the East Lake Taihu by analysis of stable carbon and nitrogen isotopes[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1534-1538. [李云凯, 贡艺. 基于碳、氮稳定同位素技术的东太湖水生食物网结构[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1534-1538.]
- [14] Zhang H L, Song Z Q, Pan G L, et al. Diversity analysis of fish in the coastal area of Zhejiang during spring[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(1): 126-134. [张洪亮, 宋之琦, 潘国良, 等. 浙江南部近海春季鱼类多样性分析[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(1): 126-134.]
- [15] Dai L B, Tian S Q, Peng X, et al. Distribution of *Larimichthys polyactis* and its relationship with environmental factors in offshore water of southern Zhejiang[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1352-1358. [戴黎斌, 田思泉, 彭欣, 等. 浙江南部近海小黄鱼资源分布及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1352-1358.]
- [16] Du X X, Tian S Q, Wang J Q, et al. Spatial and temporal variations in fish community off shore southern Zhejiang Province, East China sea[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018, 33(4): 522-531. [杜晓雪, 田思泉, 王家启, 等. 浙江南部近海鱼类群落结构的时空特征[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(4): 522-531.]
- [17] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Specifications for Oceanographic Survey-Part 6: Marine Biological Survey[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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [18] Zhao S L, Xu H X, Zhong J S, et al. Marine Fish Flora of Zhejiang Province[M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 2016. [赵盛龙, 徐汉祥, 钟俊生, 等. 浙江海洋鱼类志[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2016.]
- [19] Xu J, Zhang M, Xie P. Variability of stable nitrogen isotopic baselines and its consequence for trophic modeling[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 8-20. [徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的可变性及对营养级评价的影响[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 8-20.]
- [20] Zhang B, Tang Q S. Study on trophic level of important resources species at high trophic levels in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(4): 393-404. [张波, 唐启升. 渤、黄、东海高营养层次重要生物资源种类的营养级研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(4): 393-404.]
- [21] Tang Q S. Strategies of research on marine food web and trophodynamics between high trophic levels[J]. Marine Fisheries Research, 1999, 20(2): 1-6. [唐启升. 海洋食物网与高营养层次营养动力学研究策略[J]. 海洋水产研究, 1999, 20(2): 1-6.]
- [22] Zhang B, Jin X S, Tang Q S. Functional groups of high trophic level communities in adjacent waters of Changjiang estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 344-351. [张波, 金显仕, 唐启升. 长江口及邻近海域高营养层次生物群落功能群及其变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 344-351.]
- [23] Ji W W, Chen X Z, Jiang Y Z, et al. Stable isotope analysis of some representative nektonic organisms in the central and northern part of East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2011, 33(3): 241-250. [纪炜炜, 陈雪忠, 姜亚洲, 等. 东海中北部游泳动物稳定碳氮同位素研究[J]. 海洋渔业, 2011, 33(3): 241-250.]
- [24] Ji W W, Li S F, Chen X Z, et al. Variation in trophic structure of nekton organisms from the northern East China Sea and adjacent waters based on stable isotope values[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(6): 494-500. [纪炜炜, 李圣法, 陈雪忠, 等. 基于稳定同位素方法的东海北部及其邻近水域主要游泳动物营养结构变化[J]. 海洋渔业, 2015, 37(6): 494-500.]
- [25] 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, 徐珊楠, 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.]
- [26] Ke Z X, Tan Y H, Huang L M, et al. Trophic structure of shrimp-trawl catches in the Pearl River estuary in winter, using stable isotope analyses[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2016, 19(4): 468-475.
- [27] Cai D L, Hong X G, Mao X H, et al. Preliminary studies on trophic structure of tidal zone in the Laoshan Bay by using carbon stable isotopes[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(4): 41-47. [蔡德陵, 洪旭光, 毛兴华, 等. 崂山湾潮间带食物网结构的碳稳定同位素初步研究[J]. 海洋学报(中文版), 2001, 23(4): 41-47.]
- [28] Wei H J, Zhu X M, Ji Y N, et al. Study on the food web structure and their trophic levels of marine ranching area in Xiangshan Harbor[J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(2): 250-257. [魏虎进, 朱小明, 纪雅宁, 等. 基于稳定同位素技术的象山港海洋牧场区食物网基础与营养级的研究[J]. 应用海洋学报, 2013, 32(2): 250-257.]
- [29] Wang L, Du S C, Yang T Y, et al. Using stable isotopes to evaluate food web structure in Dalian coastal water[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1452-1457. [王革, 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.]
- [30] Madurell T, Fanelli E, Cartes J E. Isotopic composition of carbon and nitrogen of suprabenthic fauna in the NW Baleares Islands (western Mediterranean)[J]. Journal of Marine Systems, 2008, 71(3-4): 336-345.
- [31] 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.
- [32] Pinnegar J K, Polunin N V C. Contributions of stable-isotope data to elucidating food webs of Mediterranean rocky littoral fishes[J]. Oecologia, 2000, 122(3): 399-409.
- [33] Chandra S, Vander Zanden M J, Heyvaert A C, et al. The effects of cultural eutrophication on the coupling between pelagic primary producers and benthic consumers[J]. Limnology and Oceanography, 2005, 50(5): 1368-1376.
- [34] Yang J M. A study on food and trophic levels of Bohai Sea invertebrates[J]. Modern Fisheries Information, 2001, 16(9): 8-16. [杨纪明. 渤海无脊椎动物的食性和营养级研究[J]. 现代渔业信息, 2001, 16(9): 8-16.]
- [35] Cheng J S, Zhu J S. Study on the feeding habit and trophic level of main economic invertebrates in the Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 19(6): 102-108. [程济生, 朱金声. 黄海主要经济无脊椎动物摄食特征及其营养层次的研究[J]. 海洋学报(中文版), 1997, 19(6): 102-108.]
- [36] Zhang B, Tang Q S, Jin X S. Functional groups of fish assemblages and their major species at high trophic level in the East China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2007, 14(6): 939-949. [张波, 唐启升, 金显仕. 东海高营养层次鱼类功能群及其主要种类[J]. 中国水产科学, 2007, 14(6): 939-949.]
- [37] Yang J M. A study on food and trophic levels of Bohai Sea fish[J]. Modern Fisheries Information, 2001, 16(10): 10-19. [杨纪明. 渤海鱼类的食性和营养级研究[J]. 现代渔业信息, 2001, 16(10): 10-19.]
- [38] He Z T, Xue L J, Jin H W. On feeding habits and trophic level of *Collichthys lucidus* in inshore waters of northern East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2011, 33(3): 265-273. [贺舟挺, 薛利建, 金海卫. 东海北部近海棘头梅童鱼食性及营养级的探讨[J]. 海洋渔业, 2011, 33(3): 265-273.]
- [39] Zhang X J, Cheng J H, Shen W, et al. Feeding ecology of *Lophius litulon* in the south of Yellow Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(12): 3117-3125. [张学健, 程家骅, 沈伟, 等. 黄海南部黄鮟鱇摄食生态[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3117-3125.]
- [40] Peng S M, Shi Z H, Yin F, et al. Feeding habits of silver pomfret (*Pampus argenteus*) in East China Sea based on stable isotope techniques[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1565-1569. [彭士明, 施兆鸿, 尹飞, 等. 利用碳氮稳定同位素技术分析东海银鲳食性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1565-1569.]
- [41] Zhang Q Y, Lin Q M, Lin Y T, et al. Food web of fishes in Minnan-taiwanchientan fishing ground[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1981, 3(2): 275-290. [张其永, 林秋眠, 林尤通, 等. 闽南-台湾浅滩渔场鱼类食物网研究[J]. 海洋学报(中文版), 1981, 3(2): 275-290.]
- [42] Wang Z. A preliminary study on the common biological and ecological characteristics of *Bursa rana*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015. [王柱. 习见赤蛙螺生物与生态学特性的初步研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.]
- [43] Li Z H, Xu K D, Jiang R J, et al. Diet composition and feeding habits variation with body length of *Chelidonichthys spinosus* in central and northern East China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(1): 185-193. [李振华, 徐开达, 蒋日进, 等. 东海中北部小眼绿鳍鱼的食物组成及摄食习性的体长变化[J]. 中国水产科学, 2011, 18(1): 185-193.]
- [44] Li C N. Study on species diversity and community characters of marine organisms of nekton in Wenzhou Bay[D]. Zhouzhuang: Zhejiang Ocean University, 2017. [李超男. 温州湾游泳动物群落结构及多样性研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.]
- [45] Li Z Y, Jin X S, Zhuang Z M, et al. Food competition of *Engraulis japonicas* and *Thrissa kammalensis* from the southern Yellow Sea in spring[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2007, 14(4): 630-636. [李忠义, 金显仕, 庄志猛, 等. 南黄海春季鳀和赤鼻棱鳀的食物竞争[J]. 中国水产科学, 2007, 14(4): 630-636.]
- [46] Vander Zanden M J, Rasmussen J B. Primary consumer  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  and the trophic position of aquatic consumers[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1395-1404.
- [47] Cabana G, Rasmussen J B. Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1996, 93(20): 10844-10847.
- [48] Goering J, Alexander V, Haubenstock N. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope ratios of organisms in a North Pacific Bay[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1990, 30(3): 239-260.
- [49] Jennings S, Greenstreet S, Hill L, et al. Long-term trends in the trophic structure of the North Sea fish community: Evidence from stable-isotope analysis, size-spectra and community metrics[J]. Marine Biology, 2002, 141(6): 1085-1097.
- [50] Roth J D, Hobson K A. Stable carbon and nitrogen isotopic fractionation between diet and tissue of captive red fox: Implications for dietary reconstruction[J]. Canadian Journal of Zoology, 2000, 78(5): 848-852.
- [51] 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.]
- [52] Šantić M, Rađa B, Pallaoro A. Diet and feeding strategy of thornback ray *Raja clavata*[J]. Journal of Fish Biology, 2012, 81(3): 1070-1084.
- [53] Lin L S, Zheng Y J, Liu Y, et al. The ecological study of small-sized fish in the East China Sea I—the species composition and seasonal variation of small-sized fish[J]. Marine Sciences, 2006, 30(8): 58-63. [林龙山, 郑元甲, 刘勇, 等. 东海区小型鱼类生态研究 I——小型鱼类的种类组成及季节变化[J]. 海洋科学, 2006, 30(8): 58-63.]

## Trophic structure of major fishery organisms in the offshore waters of southern Zhejiang: insights from stable isotope analysis

GAO Chunxia<sup>1, 2, 3, 4</sup>, DAI Xiaojie<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>, TIAN Siquan<sup>1, 2, 3, 5</sup>, WANG Jiaqi<sup>1, 3</sup>, HAN Dongyan<sup>1, 2</sup>, Ma Qiuyun<sup>1, 2</sup>, TANG Aijia<sup>1</sup>

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
4. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

**Abstract:** Stable isotope analysis has become increasingly popular in the determination of trophic relationships in marine ecosystem. In this study, based on bottom trawl surveys, 33 species of fish and 18 species of invertebrates were collected in February and May 2016 in the offshore waters of southern Zhejiang. All of these species accounted for 90% of the total catch biomass, highlighting them as being the dominant fish species and invertebrates in the offshore waters of southern Zhejiang. Stable isotope ratios of carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and nitrogen ( $\delta^{15}\text{N}$ ) of the fishery organisms were calculated with an element analysis-isotope ratio mass spectrometer (EA-IRMS), and the  $\delta^{15}\text{N}$  values were applied to estimate their trophic levels. The results revealed that the major fishery organisms had great variations in their composition of stable carbon and nitrogen isotopes, especially the fish species, with statistical difference ( $P<0.01$ ) being observed. The  $\text{c}\delta^{13}\text{C}$  values of the fishery organisms ranged from  $-19.71\text{\textperthousand}$  to  $-14.01\text{\textperthousand}$ , with an average of  $-17.06\text{\textperthousand}$ , and the  $\delta^{15}\text{N}$  values ranged from  $7.05\text{\textperthousand}$  to  $13.69\text{\textperthousand}$ , with the average of  $10.98\text{\textperthousand}$ . Filter-feeding bivalves were set as the baseline. The average trophic levels of fish, crustaceans, cephalopods and gastropods were  $2.66\text{--}4.21$ ,  $3.08\text{--}3.72$ ,  $2.83\text{--}3.49$  and  $3.54\text{--}3.62$ , respectively. The major fishery organisms were mainly in the range of 3.0 to 4.0, most of which were primary and intermediate carnivorous species. Cluster analysis on the stable isotope results of the major fishery organisms produced organism groups that could be interpreted with trophic and feeding information. Based on hierarchical cluster analysis and feeding literatures, five feeding groups of the major fishery organisms from the offshore waters of southern Zhejiang were classified: zooplankton feeding, omnivorous, benthic feeding, mixed feeding and nekton feeding. The trophic structure of the food web could be divided into four trophic groups, which includes primary consumers, secondary consumers, intermediate consumers and senior consumers. According to the characteristics of trophic structure, the primary consumers were composed of omnivorous species, and the secondary consumers mainly included small fish, shrimps and cephalopods. The intermediate consumers were mainly benthic crabs, gastropods and mixed carnivorous fish, while the senior consumers were carnivorous fish. In this study, the continuous trophic spectrum of fishery organisms in the offshore waters of southern Zhejiang was established to provide an important reference for the study of energy flow and matter cycles in marine food webs.

**Key words:** stable isotope ratios of carbon and nitrogen; offshore waters of Southern Zhejiang; fishery organism; trophic level

**Corresponding author:** TIAN Siquan. E-mail: sqtian@shou.edu.cn