

南沙群岛西南部陆架区底层鱼类营养结构研究*

宁加佳 杜飞雁 王雪辉 王亮根 谷阳光 李亚芳

(中国水产科学研究院南海水产研究所 广东省渔业生态环境重点实验室 农业部南海渔业资源环境科学观测实验站
农业部南海渔业资源开发利用重点实验室 广州 510300)

摘要 为了解南沙群岛西南部陆架区底层鱼类食物网的营养结构特征,于2013年9月利用稳定同位素方法分析了24种底层鱼类的碳和氮稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值),并计算了基于 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 量化的6个营养结构的群落范围指标。结果显示:南沙群岛西南部陆架区底层鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -20.4‰ — -17.0‰ 之间,均值为 $(-19.1\pm 0.8)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值的范围为 7.9‰ — 12.2‰ ,均值为 $(9.7\pm 1.0)\text{‰}$ 。鱼类的营养位置在3.06—4.33之间,平均值为 3.58 ± 0.29 ,表明均以肉食性为主。根据群落范围指标结果分析,鱼类群落的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围(CR和NR)分别为3.4和4.3,表明南沙群岛西南陆架区底层鱼类的初始食源较为单一,营养层次较少;总面积(TA)和到重心的平均距离(CD)分别为5.8和1.0,意味着鱼类食物网营养级多样性的总程度和平均程度均较低;平均最近相邻距离(NND)及最近相邻距离的标准偏差(SDNN)分别为0.37和0.43,说明研究海域底层鱼类食物网的营养冗余程度较高,不同种类之间的营养生态位幅宽较小,重叠程度较高。此外,浅海长尾鲨(*Alopias pelagicus*)和狐形长尾鲨(*Alopias vulpinus*)在南沙群岛西南部陆架区底层鱼类群落的营养结构中起着重要作用。因此在对该海域渔业资源进行开发利用时,应禁止捕捞这些种类,而对一些冗余种类,如多齿蛇鲭(*Saurida tumbil*)、条尾鲱鲤(*Upeneus bensasi*)和带鱼(*Trichiurus haumela*)等,可以适度捕捞,以维持底层鱼类群落营养结构的完整性,在渔业资源合理开发、持续利用的同时,有效地保护海洋生态系统的安全发展。

关键词 南沙群岛西南部陆架区;营养结构;碳和氮稳定同位素;群落范围指标;底层鱼类
中图分类号 Q143 **doi:** 10.11693/hyh20151100282

生物群落结构特征的定量分析是比较生物群落是否发生演替的重要基础,在生态学研究中具有非常重要的作用。传统的研究方法主要根据基本指数如物种组成、丰富度及丰度衡量生物群落的结构特征。但是在不同时空尺度上的物种和功能群是不断发生变化的,尤其是对于动物群落来说(Sheaves, 2006; Heino, 2009),而这些变化并不表明群落的稳定性发生改变。

因此,可以利用能最终反映能量流动过程的食物网分析,对群落结构特征进行描述(Lindeman, 1942; Bersier *et al.*, 2002; Kaartinen *et al.*, 2012)。食物网历来

都是生态学研究的热点,实际上食物网主要表现为物种和物种之间的营养关系(Paine, 1980; Polis *et al.*, 1996)。营养关系是群落内生物数量变动的重要调节因素,其变动直接影响种群和群落的结构和动态。

认清动物的食性是理解其营养关系的第一步,但是想要定量的收集它们的食物信息相当困难。过去定量研究的手段主要通过胃含物分析法进行,但此方法在食物辨认、反映食物的吸收和估算营养级等方面还存在着一些不足(Bitterlich *et al.*, 1984; Michener *et al.*, 1994; Gu *et al.*, 1996)。随着技术的发展,稳定同

* 广东省自然科学基金资助项目, 2014A030310232 号; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院南海水产研究所)资助项目, 2014TS02 号; 国家科技支撑计划课题, 2013BAD13B06 号; 广东省省级科技计划项目, 2014A020217011 号; 农业部财政重大专项, NFZX2013 号。宁加佳, 助理研究员, E-mail: njpiao1981@163.com

通讯作者: 杜飞雁, 研究员, E-mail: feiyanegg@163.com

收稿日期: 2015-11-13, 收修改稿日期: 2016-01-03

位素分析方法已经成为研究食物网营养结构的重要手段之一(Fry, 2006), 该方法可提供物种时空变化整合过程中长期积累的营养数据, 能准确便捷地反映各种生物的营养信息(Michener *et al.*, 1994)。碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)常用于判断生物间的营养关系(DeNiro *et al.*, 1978; Fry *et al.*, 1984), 氮稳定同位素比值($\delta^{15}\text{N}$)能计算消费者在食物网中的营养位置(Cabana *et al.*, 1996; Vander Zanden *et al.*, 1999)。此外, Layman 等(2007a)根据生态形态学研究中的物种形态特征二维表示法, 提出了基于 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 量化的营养结构的群落范围指标, 这些指标不仅可以量化食物网的营养多样性程度和冗余程度, 而且还能用于描述物种水平的生态位宽度和重叠度, 评价每个物种在食物网中的营养生态位及其作用。近年来, 该方法已广泛应用于环境变化及生物干扰等因素对水生食物网影响的研究中(Layman *et al.*, 2007b; Delong *et al.*, 2011; Jackson *et al.*, 2012)。

目前国内南海区域相关的生态学研究多侧重于生物群落多样性及其结构特征的季节和空间变化等方面, 而关于营养结构的研究十分欠缺, 仅有的报道所采用的方法为胃含物分析法(张月平, 2005)和模型法(陈作志等, 2010), 在应用稳定同位素方法示踪生态系统能流途径和分析食物网营养结构等方面的研究鲜有报道(杨国欢等, 2013)。为此, 本研究利用碳氮稳定同位素技术探讨南沙群岛西南部陆架区底层鱼类的碳和氮稳定同位素组成特征, 分析底层鱼类的营养位置, 评析食物网的营养层次、冗余程度及生态位宽幅等, 以期在丰富生态学研究内容的同时, 为南沙群岛西南部陆架区渔业资源的科学管理和持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

鱼类样品采自 2013 年 9 月在南沙群岛西南部陆架区(图 1)进行的底层单拖网调查, 网具规格为 128.00m×92.26m (48.90m), 网衣全长 92.26m, 网口周长 128.00m, 浮纲长 48.90m, 沉纲长 59.40m, 网口目大 300mm, 网囊目大 50mm, 拖网时间为 1h, 航速 3 节。样品带回实验室分类鉴定和个体全长测定后, 进行稳定同位素样品采集。鱼类取其背部白色肌肉作为分析样品。浮游动物桡足类采用大型浮游生物网(网孔直径为 505 μm)由水底至水表垂直采集, 用孔径为 0.7 μm 玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)抽滤过的海

水清养 2h 使其排除消化道内含物, 再用蒸馏水将其洗净后取整体作为分析样品。将以上稳定同位素样品在 60°C 下烘 48h 至恒重, 用研钵将样品研磨成粉末, 放入干燥器中保存待测。

1.2 稳定同位素测定

样品的稳定同位素比值在中国农业科学院农业环境稳定同位素实验室进行测定。所用仪器为 Vario PYRO Cube 型元素分析仪和 Isoprime—100 型稳定同位素比值分析仪, 获得的稳定同位素比值用 δ 表示:

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

其中, $X = ^{13}\text{C}$ 或 ^{15}N ; $R = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$; R_{sample} 为样品的同位素比值, R_{standard} 为标准物质的同位素比值。碳和氮同位素标准样品分别采用 VPDB(拟箭石)和大气氮, 为保证实验结果的准确性和仪器的稳定性, 每测试 12 个样品穿插一个标样进行校正。样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

1.3 数据处理与分析

鱼类的营养位置(TP)通过如下公式计算:

$$\text{TP} = \lambda + (\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / \Delta\delta^{15}\text{N}$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为基线生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(即 $\lambda=1$ 时, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为生产者 $\delta^{15}\text{N}$, 而 $\lambda=2$ 时, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为初级消费者 $\delta^{15}\text{N}$ 值), 本研究用浮游动物桡足类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 。 $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为营养级传递过程中 $\delta^{15}\text{N}$ 的富集值, 每营养级的平均值约为 3.4‰(Post, 2002)。

另外, 以 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 为横及纵坐标, 绘制不同鱼类种类的 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 值的双位图, 并以此计算了基于稳定同位素量化的营养结构的群落范围指标(Community-wide metrics) (Cornwell *et al.*, 2006; Layman *et al.*, 2007a, 2007b), 该指标包括如下六个参数:

(1) $\delta^{13}\text{C}$ 的范围(CR): 具有最高 $\delta^{13}\text{C}$ 和最低 $\delta^{13}\text{C}$ 值的两个物种之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值距离($\delta^{13}\text{C}$ 最高值 - $\delta^{13}\text{C}$ 最低值)。

(2) $\delta^{15}\text{N}$ 的范围(NR): 具有最高 $\delta^{15}\text{N}$ 和最低 $\delta^{15}\text{N}$ 值的两个物种之间的 $\delta^{15}\text{N}$ 值距离($\delta^{15}\text{N}$ 最高值 - $\delta^{15}\text{N}$ 最低值)。

(3) 总面积(TA): 由所有物种在 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 双位图上组成的多边形面积。

(4) 到重心的平均距离(CD): 每一个物种到 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 双位图重心的平均欧氏距离, 此重心是食物网中所有物种的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值。

(5) 平均最近相邻距离(NND): $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 双位图内每个物种与其最近的相邻物种的平均欧氏距离。

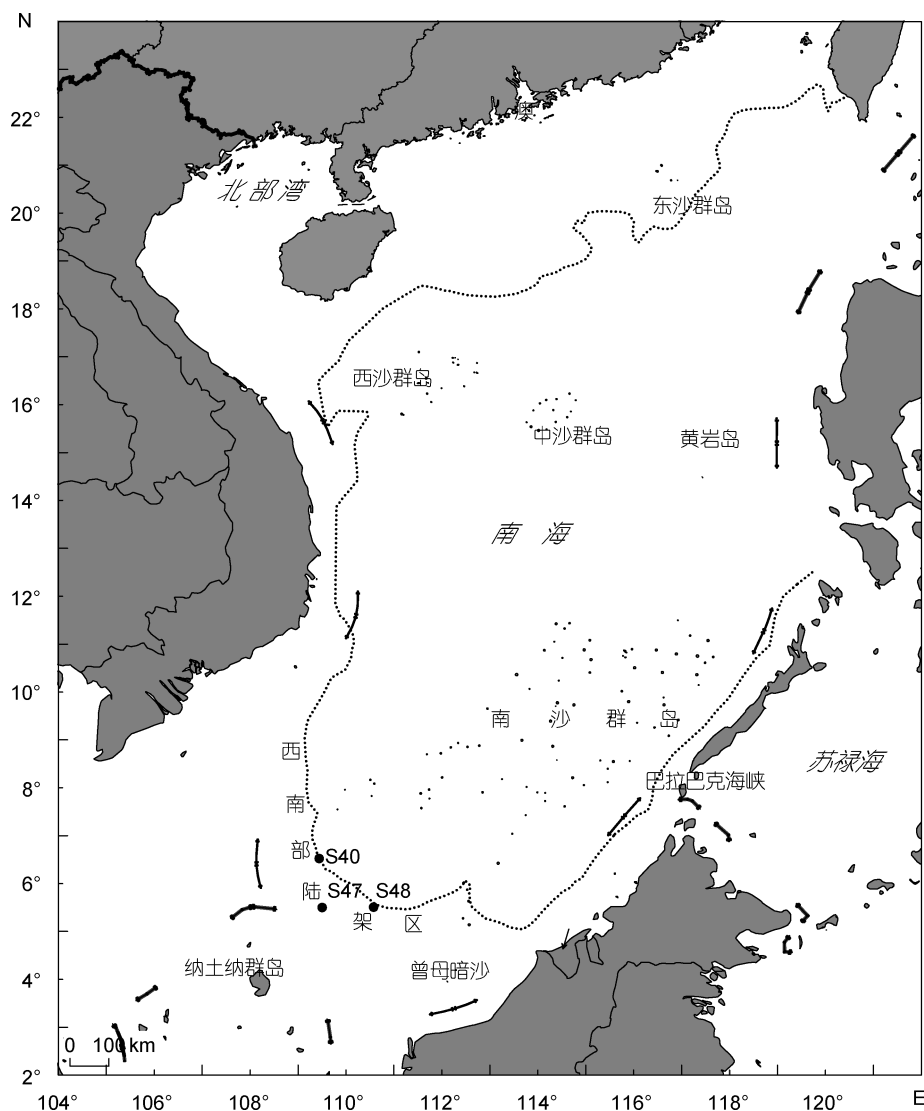


图1 南沙群岛西南部陆架区地理位置和采样站示意图

Fig.1 Map of the southwestern continental shelf of Nansha Islands and location of sampling stations

(6) 最近相邻距离的标准偏差(SDNNND): $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 双位图上每个物种与其最近相邻物种欧氏距离标准偏差的平均值。

以上各参数计算方法参考 Layman 等(2007a)。

2 结果

2.1 鱼类的种类组成

调查期间共采集鱼类 24 种, 隶属于 8 目 20 科 22 属, 分别为鲈形目 9 科 9 属 9 种, 鲉形目 2 科 2 属 2 种, 鲉形目 2 科 3 属 3 种, 鲷形目 1 科 1 属 1 种, 鲈形目 3 科 3 属 3 种, 灯笼鱼目 1 科 2 属 3 种, 鼠鲨目 1 科 1 属 2 种及鳐形目 1 科 1 属 1 种。

鱼类的全长范围为 5.6—336cm, 除带鱼(*Trichiurus haumela*)、斑鲳(*Raja kanojei*)、狐形长尾鲨(*Alopias*

vulpinus)和浅海长尾鲨(*Alopias pelagicus*)外, 其它鱼类的全长均小于 30cm(表 1)。

2.2 鱼类的碳、氮稳定同位素特征

稳定同位素结果显示, 南沙群岛西南部陆架区底层鱼类的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -20.4‰ (鳞首方头鱼 *C. squamiceps*)— -17.0‰ (浅海长尾鲨 *A. pelagicus*)之间, 均值为 $(-19.1 \pm 0.8)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 的均值范围为 7.9‰ (弓背鰐齿鱼 *C. atridorsalis*)— 12.2‰ (浅海长尾鲨 *A. pelagicus*), 均值为 $(9.7 \pm 1.0)\text{‰}$ (表 1)。

2.3 鱼类群落的营养结构

根据 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 值的双位图(图 2), 得出基于稳定同位素量化的营养结构的群落范围指标: CR 和 NR 值分别为 3.4 和 4.3, TA 值约为 5.8, CD 值为 1.0, NND 及 SDNNND 值分别为 0.37 和 0.43。

表 1 南沙群岛西南部陆架区底层鱼类的全长范围、 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值和全长的平均值及标准差
Tab.1 Average total length, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$ value(average $\pm$ SD) of demersal fish species in southwestern continental shelf of Nansha Islands

代码	种类	全长范围(cm)	全长 (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)	$\delta^{15}\text{N}$ 值 (‰)	样本量(n)
1	弓背鳄齿鱼 <i>Champsodon atridorsalis</i>	8.9—9.6	9.2 $\pm$ 0.4	-19.2 $\pm$ 0.1	7.9 $\pm$ 0.1	3
2	绿鳍鱼 <i>Cheilodichthys kumu</i>	7.6—12.3	9.6 $\pm$ 2.4	-19.5 $\pm$ 0.2	8.4 $\pm$ 0.5	3
3	颌圆鲹 <i>Decapterus lajang</i>	16.1—20.4	17.9 $\pm$ 2.2	-19.2 $\pm$ 0.5	8.5 $\pm$ 0.4	3
4	绿鳍马面鲀 <i>Navodon septentrionalis</i>	22.4	22.4	-19.8	8.5	1
5	日本红娘鱼 <i>Lepidotrigla japonica</i>	12.9	12.9	-19.5	8.7	1
6	斑鲳 <i>Raja kanojei</i>	44.5—71	57.7 $\pm$ 13.3	-18.4 $\pm$ 0.2	8.7 $\pm$ 0.3	3
7	尾斑鲷状鱼 <i>Bembrops caudimacula</i>	7.2—8.9	8.2 $\pm$ 0.9	-19.3 $\pm$ 0.2	9.2 $\pm$ 0.2	3
8	大鳞拟棘鲆 <i>Citharoides macrolepidotus</i>	13.6	13.6	-18.9	9.3	1
9	条尾鲱鲤 <i>Upeneus bensasi</i>	10.5—11.2	10.7 $\pm$ 0.4	-20.0 $\pm$ 0.3	9.4 $\pm$ 0.3	3
10	勒氏蓑鲉 <i>Pterois russelli</i>	5.6—15.3	10.5 $\pm$ 6.9	-20.1 $\pm$ 1.8	9.4 $\pm$ 1.2	2
11	瓦氏软鱼 <i>Malakichthys wakiyai</i>	6.6—7.6	7.1 $\pm$ 0.5	-19.7 $\pm$ 0.1	9.6 $\pm$ 0.2	3
12	棘茄鱼 <i>Halieutaea stellata</i>	5.7	5.7	-19.0	9.6	1
13	鳞首方头鱼 <i>Cubiceps squamiceps</i>	15.0—19.0	16.8 $\pm$ 2.0	-20.4 $\pm$ 0.4	9.7 $\pm$ 0.6	3
14	带鱼 <i>Trichiurus haumela</i>	43.1—48.2	45.7 $\pm$ 3.6	-19.6 $\pm$ 0.1	9.8	2
15	白点宽吻鲀 <i>Amblyrhynchotus honcheni</i>	6.6—14.2	10.1 $\pm$ 3.8	-19.4 $\pm$ 0.4	9.9 $\pm$ 1.2	3
16	叉斑狗母鱼 <i>Synodus macrops</i>	11.4—24.7	15.9 $\pm$ 7.6	-19.2 $\pm$ 0.6	9.9 $\pm$ 0.2	3
17	短蛇鲭 <i>Rexea prometheoides</i>	19.4—25.1	22.3 $\pm$ 4.0	-18.9 $\pm$ 0.4	10.0 $\pm$ 0.9	2
18	长蛇鲭 <i>Saurida elongata</i>	12.5—19.1	15.9 $\pm$ 3.3	-18.8 $\pm$ 0.2	10.2 $\pm$ 0.3	3
19	多齿蛇鲭 <i>Saurida tumbil</i>	13.5—16.0	14.5 $\pm$ 1.3	-18.7 $\pm$ 0.3	10.2 $\pm$ 0.3	3
20	单棘鲷鱼 <i>Chaunax fimbriatus</i>	10.7—14.5	12.3 $\pm$ 2.0	-18.7 $\pm$ 0.1	10.2 $\pm$ 0.2	3
21	黑鲛鰈 <i>Lophiomus setigerus</i>	13.9—23.1	18.9 $\pm$ 4.6	-18.3 $\pm$ 0.2	10.8 $\pm$ 0.3	3
22	短尾大眼鲷 <i>Priacanthus macracanthus</i>	9.5—22.4	17.1 $\pm$ 6.8	-18.9 $\pm$ 0.2	10.9 $\pm$ 0.7	3
23	狐形长尾鲨 <i>Alopias vulpinus</i>	102—301	202 $\pm$ 141	-17.4 $\pm$ 0.3	11.1 $\pm$ 0.5	2
24	浅海长尾鲨 <i>Alopias pelagicus</i>	138—336	237 $\pm$ 140	-17.0 $\pm$ 0.1	12.2 $\pm$ 0.4	2

此外, 通过 $\delta^{15}\text{N}$ 值及营养位置的计算公式得出, 南沙群岛西南部陆架区底层鱼类的平均营养位置为 3.58 ± 0.29 , 弓背鳄齿鱼(*C. atridorsalis*)的最低, 为 3.06 ± 0.02 ; 浅海长尾鲨(*A. pelagicus*)的最高, 为 4.33 ± 0.11 。除狐形长尾鲨(*A. vulpinus*)和浅海长尾鲨(*A. pelagicus*)的营养位置高于 4.0 外, 其余 22 种鱼类均集中在 3.0—4.0 之间(图 3)。

3 讨论

近二十多年来, 南沙群岛西南部陆架区底拖网作业成为我国南沙群岛海域渔业的重要组成部分(陈丕茂, 2003; 陈国宝等, 2005; 黄梓荣, 2005)。长期的生产和渔业资源调查资料表明, 该海域主要渔获种类有 20 多种, 其中以蛇鲭属(*Saurida*)、大眼鲷属(*Priacanthus*)等底层鱼类为主(钟智辉等, 2005), 与本研究获取的样本种类类似。随着捕捞强度的增大, 该海域的渔获率和渔获质量已有所下降, 鱼类种类

呈现小型化、低龄化趋势, 渔业资源结构发生了变化(陈丕茂, 2003)。在开发利用的同时, 合理的保护已成为渔业资源可持续发展的重要前提。因此, 利用科学有效的方法评估鱼类生物群落的食物网结构和营养关系是持续利用和科学保护渔业资源的重要基础。

3.1 南沙群岛西南部陆架区鱼类群落的营养结构特征

本研究结果显示, 南沙群岛西南部陆架区底层鱼类群落的 CR 值为 3.4, 远低于澳大利亚莫顿湾的 9.0 及美国红树林生境的 11.2(Melville *et al*, 2005; Vaslet *et al*, 2012)。CR 值表征食物网中初始食源的多样性特征, CR 值越低, 表明食物网中的初始食源越少, 反之则越多(Layman *et al*, 2007a)。澳大利亚莫顿湾和美国红树林生境均位于沿岸海域, 初始食源丰富多样, 有红树植物、海草、底栖藻类和浮游植物等, 该区域鱼类及其饵料生物的食物网选择性大, 是这些海域鱼类食物网营养结构具有较高 CR 值的主要原因

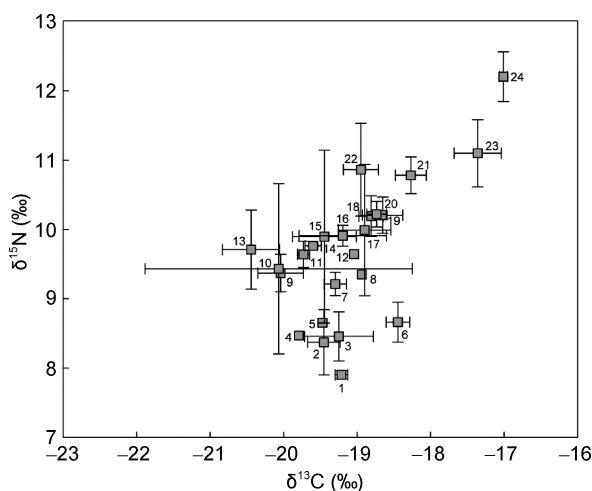


图2 鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的双位图

Fig.2 Stable isotope biplots of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of the demersal fish species

数字编号代表鱼类: 1=弓背鳄齿鱼、2=绿鳍鱼、3=颌圆鲀、4=绿鳍马面鲀、5=日本红娘鱼、6=斑鲷、7=尾斑鲷状鱼、8=大鳞拟棘鲷、9=条尾鲷、10=勒氏菱鲷、11=瓦氏软鱼、12=棘茄鱼、13=鳞首方头鱼、14=带鱼、15=白点宽吻鲷、16=叉斑狗母鱼、17=短尾蛇鲷、18=长蛇鲷、19=多齿蛇鲷、20=单棘鲷、21=黑鲷、22=短尾大眼鲷、23=弧形长尾鲷和 24=浅海长尾鲷

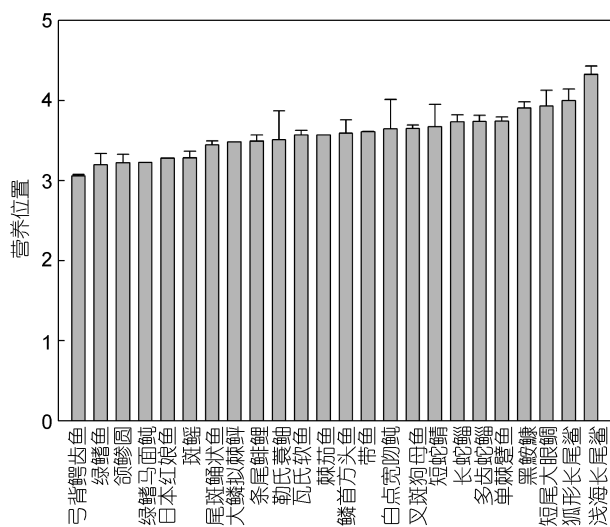


图3 鱼类的平均营养位置

Fig.3 Mean trophic positions ($\pm$ SD) of the demersal fish species

(Melville *et al*, 2005)。同时多样化的初始食源也为鱼类食物网营养生态位的多样化提供了物质基础。而南沙群岛西南部陆架区远离大陆, 而且水深较深, 除浮游植物外, 没有发现大型藻类和陆源输入的初始食源。与加泰罗尼亚海域和坎伯兰海峡的鱼类营养结构研究结果一致(Fanelli *et al*, 2011; McMeans *et al*, 2013), 初始食源单一, 是导致南沙群岛西南部陆架区底层鱼类群落 CR 值较低的主要原因。

NR 值代表食物网的垂直结构, NR 值越高表示食物网中消费者占有更多的营养层次, 也意味着食物链长度越长(Layman *et al*, 2007a)。南沙群岛西南部陆架区底层鱼类群落的 NR 值为 4.3, 即鱼类群落的 $\delta^{15}\text{N}$ 差值为 4.3‰, 由于 $\delta^{15}\text{N}$ 值在营养级传递过程中每营养级的平均值约为 3.4‰(Post, 2002), 由此换算成营养层次为 1.3 个营养层次, 而鱼类的营养级通常在 2.0—5.0 之间(Pauly *et al*, 2005), 为 3 个营养层次, 因此表明鱼类食物网的营养层次较少, 其与鱼类的营养位置跨度仅为 1.27 这一计算结果是相吻合的。Al-Habsi 等(2008)对西阿拉伯海及 Nilsen 等(2008)对挪威南峡湾鱼类营养结构的研究中也有类似报道。但是, 南沙群岛西南部陆架区食物网中消费者最高营养位置为浅海长尾鲷的 4.33 ± 0.11 , 也即是该海域的食物链长度, 却高于西阿拉伯海及挪威南峡湾(Al-Habsi *et al*, 2008; Nilsen *et al*, 2008)。Pimm(1982)认为, 初级生产力较高的区域, 能量可以维持并传递给更高营养级的生物。因此, 南沙群岛西南部陆架区因受温跃层阻隔及长期性内波现象的影响, 底层营养盐丰富、有较高的生产力, 饵料生物生物量高(杜飞雁等, 2014; 中国科学院南沙综合科学考察队等, 1996), 致使该海域食物链长度较阿拉伯海和挪威南峡湾长。

TA 和 CD 值分别代表食物网营养级多样性的总程度和平均程度(Layman *et al*, 2007a)。通过计算, 南沙群岛西南部陆架区底层鱼类群落的 TA 和 CD 值分别为 5.8 和 1.0, 均低于 Murdoch 等(2013)及 Schmidt 等(2009)对水域生态系统鱼类群落的研究结果, 表明该海域底层鱼类食物网营养级多样性的总程度和平均程度均较低。TA 值在一定程度上与 CR 和 NR 值相关(Layman *et al*, 2007a), 因此 CR 和 NR 值影响了 TA 值的高低。CR 和 NR 值主要受人为因素的影响, 如人工填海所造成的栖息地破坏能降低食物网初始食源的多样性程度, 使得 CR 值降低; 过度捕捞导致鱼类营养级降低(Pauly *et al*, 1998), 造成 NR 值降低。陈丕茂(2003)和黄梓荣(2005)认为, 过度捕捞使得南沙群岛西南部陆架区大型捕食者缺乏, 导致系统的捕食压力降低, 结果小型鱼类容易在系统内占据优势地位, 使得渔获物的平均营养级下降(Pauly *et al*, 1998)。由于南沙群岛西南部陆架区不存在栖息地破坏, 因此底层鱼类食物网营养级多样性的总程度和平均程度较低主要应与该海域捕捞强度较大有关。

NND 和 SDNND 值反映了食物网营养冗余度的

高低。当食物网中具有相似生态营养级的物种占多数时, NND 值较低, 而此时食物网营养冗余程度较高, 群落中不同种类之间的营养生态位比较均匀, 宽幅较小。与之类似, 较低的 SDNND 值意味着营养级分布更均匀, 营养冗余程度较高(Layman *et al.*, 2007a)。南沙群岛西南部陆架区底层鱼类群落 NND 和 SDNND 值仅分别为 0.37 和 0.43, 远低于河口及滨海生境(Abrantes *et al.*, 2014; Sabeel *et al.*, 2015), 说明该海域底层鱼类食物网的营养冗余程度较上述两个海域的高。由营养位置的计算结果可知, 本研究所获取的鱼类均为肉食性鱼类, 而且很多种类食性相近(杨纪明, 2001; 张月平, 2005)。其中, 除狐形长尾鲨和浅海长尾鲨为三级消费者外, 其余 22 种鱼类的营养位置均集中在 3.0—4.0 之间。此外, 还存在一些同类相食的种类, 如多齿蛇鲭和带鱼等(颜云榕等, 2010, 2012)。表明南沙群岛西南部陆架区底层鱼类不同种类之间的营养生态位宽幅较小, 重叠程度较高, 食物竞争激烈。

3.2 基于鱼类群落营养结构特征的渔业管理建议

在 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值所围成的双位图中, 位于不规则多边形顶点的浅海长尾鲨和狐形长尾鲨作为顶级捕食者, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均大于其它鱼类, 在整个营养框架中具有重要的作用。如果这两种鱼类在食物网中缺失, 将导致度量参数 CR、NR 和 TA 值降低, 也就是说鱼类食物网的营养多样性总程度会下降, 从而影响整个食物网的营养结构(Layman *et al.*, 2007a)。与之不同, 如果多齿蛇鲭($\delta^{13}\text{C}=(-18.7\pm 0.3)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}=(10.2\pm 0.3)\text{‰}$)缺失将不会导致 CR、NR 和 TA 值发生变化, 因为长蛇鲭($\delta^{13}\text{C}=(-18.8\pm 0.2)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}=(10.2\pm 0.3)\text{‰}$)和单棘鲷鱼($\delta^{13}\text{C}=(-18.7\pm 0.1)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}=(10.2\pm 0.2)\text{‰}$)的营养生态位与多齿蛇鲭的很相似, 它们相当于冗余种类。它们当中某一种类的缺失不会影响食物网的营养多样性总程度, 也不会引起生态系统内其它物种的缺失, 同时对整个群落和生态系统的结构和功能不会造成太大的影响。与此类似的还有条尾鲱鲤和勒氏蓑鲉以及瓦氏软鱼和带鱼。因此, 根据以上分析, 在对南沙群岛西南部陆架区渔业资源进行开发利用时, 可根据目标鱼种在该海域生态系统营养结构中的实际位置和作用, 确定相应可捕量, 加大对关键物种和功能群的保护力度。如在南沙群岛西南部陆架区应禁止捕捞浅海长尾鲨和狐形长尾鲨等高营养等级鱼类, 而对多齿蛇鲭、条尾鲱鲤和带鱼等冗余种类可进行适度捕捞, 以维持鱼类群落营养结构

的完整性, 在渔业资源合理开发和持续利用的同时, 有效的保护海洋生态系统的安全发展。

4 结论

本文利用稳定同位素方法初步分析了南沙群岛西南部陆架区底层鱼类的营养结构, 结果表明: 该海域鱼类以肉食性为主, 初始食源较为单一; 鱼类食物网营养层次较少, 营养级多样性的总程度和平均程度均较低, 营养冗余程度较高, 不同种类之间的营养生态位幅宽较小, 重叠程度较高。此外, 在对该海域渔业资源进行开发利用时, 应禁止捕捞浅海长尾鲨和狐形长尾鲨这类在南沙群岛西南部陆架区底层鱼类群落营养结构中起着重要作用的种类, 而一些冗余种类(如多齿蛇鲭、条尾鲱鲤和带鱼等)可以适度捕捞, 以维持底层鱼类群落营养结构的完整性, 确保海洋生态系统的安全发展。

致谢 中国水产科学研究院南海水产研究所邱永松研究员在写作过程给予指导, 刘华雪副研究员、钟智辉、许友伟、周艳波、杨兵和“南锋”调查船全体工作人员在样品采集过程提供的帮助和支持, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 中国科学院南沙综合科学考察队, 中国水产科学研究院南海水产研究所, 1996. 南沙群岛西南部陆架海区底拖网渔业资源调查研究专集. 北京: 海洋出版社, 1—125
- 杜飞雁, 王雪辉, 谷阳光等, 2014. 南沙群岛西南大陆斜坡海域浮游动物的垂直分布. 海洋学报, 36(6): 94—103
- 杨纪明, 2001. 渤海鱼类的食性和营养级研究. 现代渔业信息, 16(10): 10—19
- 杨国欢, 侯秀琼, 孙省利等, 2013. 流沙湾食物网结构的初探——基于稳定同位素方法的分析结果. 水生生物学报, 37(1): 150—156
- 张月平, 2005. 南海北部湾主要鱼类食物网. 中国水产科学, 12(5): 621—631
- 陈丕茂, 2003. 南沙群岛西南部陆架 17 种鱼类最佳开捕规格和多鱼种拖网最佳网目尺寸. 中国水产科学, 10(1): 41—45
- 陈作志, 邱永松, 2010. 南海北部生态系统食物网结构、能量流动及系统特征. 生态学报, 30(18): 4855—4865
- 陈国宝, 李永振, 2005. 南海主要珊瑚礁科鱼类的组成与分布. 南方水产科学, 1(3): 18—25
- 钟智辉, 陈作志, 刘桂茂, 2005. 南沙群岛西南陆架区底拖网主要经济渔获种类组成和数量变动. 中国水产科学, 12(6): 796—800
- 黄梓荣, 2005. 南沙群岛西南陆架区金线鱼资源与管理的研究. 南方水产, 1(4): 18—23
- 颜云榕, 王田田, 侯刚等, 2010. 北部湾多齿蛇鲭摄食习性及随生长发育的变化. 水产学报, 34(7): 1089—1098

- 颜云榕, 张武科, 卢伙胜等, 2012. 应用碳、氮稳定同位素研究北部湾带鱼(*Trichiurus lepturus*)食性及营养级. 海洋与湖沼, 43(1): 192—200
- Abrantes K G, Barnett A, Bouillon S, 2014. Stable isotope-based community metrics as a tool to identify patterns in food web structure in east African estuaries. Functional Ecology, 28(1): 270—282
- Al-Habshi S H, Sweeting C J, Polunin N V C *et al*, 2008. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ elucidation of size structured food webs in a Western Arabian Sea demersal trawl assemblage. Marine Ecology Progress Series, 353: 55—63
- Bersier L F, Banašek-Richter C, Cattin M F, 2002. Quantitative descriptors of food web matrices. Ecology, 83(9): 2394—2407
- Bitterlich G, Gnaiger E, 1984. Phytoplanktivorous or omnivorous fish? Digestibility of zooplankton by silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.). Aquaculture, 40(3): 261—263
- Cabana G, Rasmussen J B, 1996. Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 93(20): 10844—10847
- Cornwell W K, Schwillk D W, Ackerly D D, 2006. A trait-based test for habitat filtering: convex hull volume. Ecology, 87(6): 1465—1471
- Delong M D, Thorp J H, Thoms M C *et al*, 2011. Trophic niche dimensions of fish communities as a function of historical hydrological conditions in a Plains river. River Systems, 19(3): 177—187
- DeNiro M J, Epstein S, 1978. Influence of the diet on the distribution of carbon isotopes in animals. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42(5): 495—506
- Fanelli E, Cartes J E, Papiol V, 2011. Food web structure of deep-sea macrozooplankton and micronekton off the Catalan slope: insight from stable isotopes. Journal of Marine Systems, 87(1): 79—89
- Fry B, 2006. Stable Isotope Ecology. New York: Springer, 1—308
- Fry B, Sherr E B, 1984. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. Contributions in Marine Sciences, 27: 13—47
- Gu B, Schell D M, Huang X H *et al*, 1996. Stable isotope evidence for dietary overlap between two planktivorous fishes in aquaculture ponds. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 53(12): 2814—2818
- Heino J, 2009. Biodiversity of aquatic insects: spatial gradients and environmental correlates of assemblage-level measures at large scales. Freshwater Reviews, 2(1): 1—29
- Jackson M C, Donohue I, Jackson A L *et al*, 2012. Population-level metrics of trophic structure based on stable isotopes and their application to invasion ecology. PLoS One, 7(2): e31757
- Kaartinen R, Roslin T, 2012. High temporal consistency in quantitative food web structure in the face of extreme species turnover. Oikos, 121(11): 1771—1782
- Layman C A, Arrington D A, Montaña C G *et al*, 2007a. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure? Ecology, 88(1): 42—48
- Layman C A, Quattrochi J P, Peyer C M *et al*, 2007b. Niche width collapse in a resilient top predator following ecosystem fragmentation. Ecology Letters, 10(10): 937—944
- Lindeman R L, 1942. The trophic-dynamic aspect of ecology. Ecology, 23(4): 399—417
- McMeans B C, Rooney N, Arts M T *et al*, 2013. Food web structure of a coastal Arctic marine ecosystem and implications for stability. Marine Ecology Progress Series, 482: 17—28
- Melville A J, Connolly R M, 2005. Food webs supporting fish over subtropical mudflats are based on transported organic matter not in situ microalgae. Marine Biology, 148(2): 363—371
- Michener R H, Schell D M, 1994. Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs. In: Lajtha K, Michener R H eds. Stable Isotopes in Ecology and Environmental Sciences. Oxford: Blackwell, 138—157
- Murdoch A, Klein G, Doidge D W *et al*, 2013. Assessing the food web impacts of an anadromous Arctic charr introduction to a sub-Arctic watershed using stable isotopes. Fisheries Management and Ecology, 20(4): 302—314
- Nilsen M, Pedersen T, Nilssen E M *et al*, 2008. Trophic studies in a high-latitude fjord ecosystem—a comparison of stable isotope analyses ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) and trophic-level estimates from a mass-balance model. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 65(12): 2791—2806
- Paine R T, 1980. Food webs: linkage, interaction strength and community infrastructure. Journal of Animal Ecology, 49(3): 666—685
- Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J *et al*, 1998. Fishing down marine food webs. Science, 279(5352): 860—863
- Pauly D, Palomares M L, 2005. Fishing down marine food web: it is far more pervasive than we thought. Bulletin of Marine Science, 76(2): 197—212
- Pimm S L, 1982. Food Webs. Netherlands: Springer, 1—11
- Polis G A, Winemiller K O, 1996. Food Webs: Integration of Patterns & Dynamics. US: Springer, 1—464
- Post D M, 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. Ecology, 83(3): 703—718
- Sabeel R A O, Ingels J, Pape E *et al*, 2015. Macrofauna along the Sudanese Red Sea coast: potential effect of mangrove clearance on community and trophic structure. Marine Ecology, 36(3): 794—809
- Schmidt S N, Vander Zanden M J, Kitchell J F, 2009. Long-term food web change in Lake Superior. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 66(12): 2118—2129
- Sheaves M, 2006. Scale-dependent variation in composition of fish fauna among sandy tropical estuarine embayments. Marine Ecology Progress Series, 310: 173—184
- Vander Zanden M J, Rasmussen J B, 1999. Primary consumer

$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers. Ecology, 80(4): 1395—1404

Vaslet A, Phillips D L, France C *et al*, 2012. The relative importance of mangroves and seagrass beds as feeding areas

for resident and transient fishes among different mangrove habitats in Florida and Belize: evidence from dietary and stable-isotope analyses. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 434—435: 81—93

THE TROPHIC STRUCTURE OF DEMERSAL FISH SPECIES IN SOUTHWESTERN CONTINENTAL SHELF OF NANSHA ISLANDS, SOUTH CHINA SEA

NING Jia-Jia, DU Fei-Yan, WANG Xue-Hui, WANG Liang-Gen, GU Yang-Guang, LI Ya-Fang

(South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment; Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environments, Ministry of Agriculture; Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Development and Utilization, Ministry of Agriculture; Guangzhou 510300, China)

Abstract We investigated carbon and nitrogen stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of demersal fish species collected in September 2013 in southwestern continental shelf of Nansha Islands, South China Sea by trawling (the net was 92m long, perimeter 128m, floating line 49m, lead line 59m, mesh size 50mm, trawling time 1h at 3kn/h) to study the trophic structure of the fish species. Several quantitative metrics based on the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ ratios were calculated to quantitatively characterize the trophic structure in community-wide aspect. The results show that, the average $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of the demersal fish species in the study region were $(-19.1 \pm 0.8)\text{‰}$ and $(9.7 \pm 1.0)\text{‰}$, in range of -20.4‰ — -17.0‰ and 7.9‰ — 12.2‰ , respectively. The average trophic position was 3.58 ± 0.29 and ranged in 3.06—4.33, indicating that these demersal fish species were mostly carnivorous. $\delta^{13}\text{C}$ range and $\delta^{15}\text{N}$ range values based on the quantitative metrics were 3.4 and 4.3 respectively, suggesting a few basal resources in low trophic level of the fish food web in the study area. Total area and mean distance to centroid values were 5.8 and 1.0 respectively, indicating that the overall and average degree of trophic diversity were low. Mean nearest neighbor distance and standard deviation of nearest neighbor distance values were 0.37 and 0.43 respectively, suggesting that the fish food web in this study area has high trophic redundancy, small trophic niche width as well as low degree of trophic niche separation. In addition, fish species *Alopias vulpinus* and *Alopias pelagicus* played an important role in trophic structure of fish community of this area. To maintain the integrity of the trophic structure, ensure the sustainable use of fishery resources, and protect marine ecosystem, we recommend forbidding the capture of these two species and moderately fishing some redundant species (*Saurida tumbil*, *Upeneus bensasi*, *Trichiurus haumela*, etc.).

Key words southwestern continental shelf of Nansha Islands; trophic structure; carbon and nitrogen stable isotopes; community-wide metrics; demersal fish