#### DOI: 10.5846/stxb202011082861

尹洪洋,朱文涛,马文刚,章翔,夏景全,许强,李建龙,何法庆,李秀保.三亚蜈支洲岛海洋牧场区域夏季食物网研究.生态学报,2022,42(8): 3241-3253.

Yin H Y, Zhu W T, Ma W G, Zhang X, Xia J Q, Xu Q, Li J L, He F Q, Li X B.The summer food web in the marine ranch area of Wuzhizhou Island in Sanya, Hainan. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3241-3253.

## 三亚蜈支洲岛海洋牧场区域夏季食物网研究

### 尹洪洋<sup>1,3</sup>,朱文涛<sup>2,3</sup>,马文刚<sup>1,3</sup>,章 翔<sup>1,3</sup>,夏景全<sup>1,3</sup>,许 强<sup>1,3</sup>,李建龙<sup>1,3</sup>,何法庆<sup>1,3</sup>, 李秀保<sup>1,3,\*</sup>

1 海南大学海洋学院,海口 570228

2 海南大学生态与环境学院,海口 570228

3 海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室,海口 570228

摘要:三亚蜈支洲岛海洋牧场在针对珊瑚礁修复工作、热带海洋牧场建设等方面取得了不错的效果,但海洋牧场区域的营养结构仍需要长期的监测评估。于 2020 年 7 月海洋生物调查共采集 52 种主要消费者,以碳(8<sup>13</sup>C)、氮(8<sup>15</sup>N)稳定同位素技术为基础,首次构建三亚蜈支洲岛海洋牧场区域食物网并进行研究。结果表明:(1)主要消费者的8<sup>13</sup>C 值范围在-19.10%e—12.74%e之间,平均值为(-16.99±1.52)%e;8<sup>15</sup>N 值范围为6.43%e—14.03%e,平均值(11.24±1.70)%e。单因素方差分析结果显示,不同类群之间碳氮稳定同位素均有显著性差异(P < 0.01)。(2)大型海藻和底栖微藻对主要消费者的贡献率最大为41.50%,沉积有机物(SOM)和浮游植物也是消费者的重要碳源(贡献率分别为20.05%、19.97%),悬浮颗粒有机物(POM)对消费者的碳源贡献率最低,为18.48%。(3)三亚蜈支洲岛牧场区域主要消费者的营养级范围为1.53—3.76,主要消费者营养层次分布两端少,中间多。通过系统聚类分析发现,三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统可以分为4种营养类群:第一类群主要由混合食性的底栖性鱼类以及头足类组成;第二类群主要是以底栖微藻为主,SOM 为辅的虾蟹类构成;第三类群的食源以大型海藻为主,主要为肉食性鱼类;第四类群为SOM、底栖藻类食性的初级消费者(棘皮类和腹足类)。(4)应用 SIBER 模型分析三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统的营养结构指标,与邻近海域的研究结果比较发现,牧场区域生态系统的摄食来源多样性水平(CR)、营养级长度(NR)、生态位总空间(TA)和平均营养级多样性程度(CD)相对较高;且研究海域食物网的营养冗余程度(MNND、SDNND)偏高。研究构建了三亚蜈支洲岛海洋牧场生态系统食物网,为了解该生态系统营养结构提供了基础资料和参考数据。

# The summer food web in the marine ranch area of Wuzhizhou Island in Sanya, Hainan

YIN Hongyang<sup>1,3</sup>, ZHU Wentao<sup>2,3</sup>, MA Wengang<sup>1,3</sup>, ZHANG Xiang<sup>1,3</sup>, XIA Jingquan<sup>1,3</sup>, XU Qiang<sup>1,3</sup>, LI Jianlong<sup>1,3</sup>, HE Faqing<sup>1,3</sup>, LI Xiubao<sup>1,3,\*</sup>

1 College of Marine Science, Hainan University, Haikou 570228, China

2 College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China

3 State Key Laboratory of Marine Resources Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: The marine ranching area of Wuzhizhou Island in Sanya has achieved good results in terms of coral reef restoration and tropical marine ranching construction, but the nutritional structure and stability of the ecosystem in the ranch area still need long-term monitoring and evaluation. Based on the stable isotope technology of carbon ( $\delta^{13}$ C) and nitrogen

收稿日期:2020-11-08; 网络出版日期:2021-12-17

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD0901304);国家自然科学基金资助项目(42076108);海南大学引进人才启动项目(KYQD(ZR)1805)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xiubaoli@ hainanu.edu.cn

 $(\delta^{15}N)$ , the regional food web of the Wuzhizhou Island Marine Ranching in Sanya was constructed and studied for the first time. In July 2020, the marine biology survey collected 52 major consumers. The results revealed that the  $\delta^{13}$ C values of the dominant consumers ranged from -19.10% to -12.74% (with an average of  $(-16.99\pm1.52)\%$ ). The  $\delta^{15}N$  values of the dominant consumers ranged from 6.43% to -14.03% (with an average of (11.24±1.70)%). One-way analysis of variance (ANOVA) showed that the stable carbon and nitrogen isotopes of different groups were significantly different (P < 0.01). The contribution rate of macroalgae and benthic microalgae to major consumers was 41.50%. Sedimentation organic matter (SOM) and phytoplankton were also important carbon sources for consumers (contribution rates are 20.05% and 19.97% respectively). Suspended particulate organic matter (POM) contributed the lowest carbon source to consumers by 18.48%. The nutritional level of the main consumers in the Wuzhizhou Island Ranch area in Sanya ranged from 1.53 to 3.76. The nutrition level of major consumers was less at both ends and more in the middle. Hierarchical cluster analysis showed 4 trophic groups in marine ranching area of Wuzhizhou Island in Sanya. The first group was mainly composed of mixed-feeding benthic fishes and cephalopods; the second group was shrimp and crabs eating mainly benthic microalgae, and SOM as the supplement; the food source of the third group was mainly macroalgae, especially carnivorous fish; the fourth group was SOM and primary consumers eating on benthic algae (e.g. echinoderms and gastropod). The SIBER model was used to analyze the nutritional structure indicators of the Wuzhizhou Island pasture ecosystem in Sanya. Compared with the results in the adjacent sea areas, it was found that the level of food source diversity (CR), trophic level length (NR), total area (TA) and mean distance to centroid (CD) were relatively high; and the nutritional redundancy (MNND, SDNND) of the food web in the research sea area was relatively high. This study initially constructed a food web for the marine ranching area of Wuzhizhou Island in Sanya to provide basic information and reference data for understanding the nutritional structure of the ecosystem.

Key Words: ecosystem; stable isotope; nutritional relationship; food web; Wuzhizhou Island, Sanya

随着热力学理论的研究及 Nier 型质谱仪的不断改进,稳定同位素技术(Stable Isotope Analysis,SIA)不断 发展,其主要用于食物网中营养结构和营养级的分析、确定食物来源及食物贡献、生态位空间及水生生物洄游 分布的研究等<sup>[1-5]</sup>。不同的碳源、碳氮比在珊瑚礁生态系统的结构和功能中所起的作用不同,可系统分析不 同生物的营养关系、确定食物网以及食物网的相互作用关系等<sup>[6-8]</sup>,如 Graham 等<sup>[9]</sup>利用 250 个珊瑚礁的经验 数据,分析了人为介导下的珊瑚礁鱼类生物量的数量级梯度。海洋牧场生态系统功能复杂、渔业资源丰富,具 有复杂的食物网结构<sup>[10]</sup>。目前,基于稳定同位素技术构建生态系统食物网分析不同生物的营养关系及生态 系统的结构和功能已成为重要的研究手段之一<sup>[3]</sup>。有关食物网结构与功能的研究,国内外多采用稳定同位 素方法来评估生态系统的营养关系,McMahon 等<sup>[6]</sup>采用贝叶斯混合模型对稳定碳同位素比值(<sup>13</sup>C)进行分 析,定量研究了红海初级生产者对珊瑚礁鱼类在不同摄食阶段和营养位置的碳流量。郭卫东等<sup>[11]</sup>利用稳定 碳同位素分析技术研究了南沙渚碧礁生态系食物网主要生物类群之间的营养关系。朱文涛等<sup>[12]</sup>以碳、氮同 位素分析了大亚湾底栖群落营养结构的季节性变化。相较传统胃含物技术的瞬时分析及样本量大的局限性, SIA 能反映一定时间的生物摄食和消化吸收情况,能更准确的量化评估生物的营养级<sup>[1-2,13]</sup>。Dromard 等<sup>[14]</sup> 运用稳定同位素技术及胃含物方法分析了加勒比海珊瑚礁草食性鱼类的营养位置,发现 SIA 的结果较为准 确。杨国欢等<sup>[15]</sup>根据δ<sup>13</sup>C、δ<sup>15</sup>N 值分析珊瑚礁鱼类营养层次并与传统胃含物技术比较得出,SIA 与传统的胃 含物分析法所得的结果有很好的一致性。

三亚蜈支洲岛海域资源丰富,共记录造礁石珊瑚 13 科 40 属 90 种,珊瑚礁鱼类 33 科 52 属 75 种,大型无脊椎动物种类多样性也非常丰富<sup>[16]</sup>。目前在该海域的研究主要集中于珊瑚礁修复技术<sup>[17]</sup>、环境胁迫对珊瑚 生理状态的影响<sup>[18-19]</sup>、人为因素对珊瑚群落的扰动<sup>[20]</sup>等,但关于三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统食物网结构的研究尚未见报道。本研究基于碳氮稳定同位素技术初步建立了三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统食物网, 研究主要消费者稳定同位素特征,分析营养级层次并构建牧场区域食物网的连续营养谱。通过比较邻近海域的营养结构特征,揭示食物网内不同层次消费者的主要食源,旨在为了解该生态系统营养结构提供基础资料和参考数据。

#### 1 材料及方法

#### 1.1 样品采集和处理

2020年7月对海南省蜈支洲岛牧场区域共布设10 个站点进行了生物样品的采样工作(图1)。其中,核心 区(珊瑚礁区域 D1、D2、D3、D4)四个站位进行浮游生 物、底栖生物及游泳生物调查;外围区进行游泳生物样 品采集(以拖网作业为主),平均拖速为2.1节,每站拖 网 40 min 左右。在核心区站位分别选用浅水 III 型和 浅水Ⅱ型浮游生物网采集浮游植物和浮游动物;并以垂 钓等方式采集核心区鱼类;大型底栖生物由潜水及采样 带法相结合的方法收集,采集生物样品进行物种鉴定与 同位素样品处理。大型海藻经蒸馏水清洗干净,烘干后 使用锡箔纸包裹备用。取5L表层海水经浮游植物网 过滤后抽滤至灼烧后的 GF/F 滤膜上,经浓盐酸酸熏 5 h后烘干,所得样品即悬浮颗粒有机物(POM);沉积有 机物(SOM)及底栖微藻样品采集制备方法参考徐 军<sup>[21]</sup>,取适量沉积物研磨后,加入1 mol/L 稀盐酸进行 酸化,充分反应至无气泡产生,再用去离子水洗涤3次 后烘干。在各个站点取适量礁石,刮取分离底栖藻类 后,将样品抽滤至灼烧后的 GF/F 滤膜直接烘干以测定



图1 三亚蜈支洲岛牧场区域采样站位图



C1—C4:核心区调查站位 Core area survey station;01—O6:外围区 调查站位 Outer area survey station

底栖微藻同位素。浮游植物样品用 160 μm 的筛绢进行过滤,过滤后的样品抽滤到预先经马弗炉 450℃灼烧 5 h 的 Whatman GF/F 膜上,浮游动物挑选出杂质后过滤到同样处理后的滤膜上。鱼类取其背部肌肉,头足类取 胴体部位,虾类取适量肌肉,蟹类取螯肢或腹部肌肉,海参取体壁肌肉,海胆取亚氏提灯附属肌肉及性腺,海星 取其性腺。

经处理的上述样品置于-50℃真空冷冻干燥机中冷冻干燥 48 h 至恒重,装入研磨器中研磨 60 s 至粉末状,存于 5 mL 棕色瓶中装入自封袋后,冷冻保存以待后续的同位素样品分析。

1.2 稳定同位素分析

所有样品碳、氮稳定同位素比值通过元素分析仪(PYRO Cube,德国 Elementar 公司)和稳定同位素质谱 仪(Isoprime 100,英国 Isoprime 公司)测定,碳氮同位素比值以δ值的形式表达。为保持实验结果的准确性, 每测试 10个样品后加测 1—2个标准样,个别样品进行3次重复测定,δ<sup>13</sup>C值和δ<sup>15</sup>N值的分析精度均为 ±0.2‰。碳、氮稳定同位素值计算公式如下:

$$\delta = \left[ \left( \mathbf{R}_{\text{sample}} / \mathbf{R}_{\text{standard}} \right) -1 \right] \times 10^3$$

式中, $\delta$ 代表碳、氮同位素 ( $\delta^{13}$ C 和  $\delta^{15}$ N); R<sub>sample</sub>表示所测样品的同位素比值 ( $^{13}$ C/ $^{12}$ C 或 $^{15}$ N/ $^{14}$ N); R<sub>standard</sub>是国际上通用的标准物的同位素丰度之比,碳、氮稳定同位素标准物分别为咖啡因 (IAEA-600)和大气氮。

1.3 不同食源对主要消费者贡献率的计算

利用 IsoSource 模型计算三亚蜈支洲岛牧场区域珊瑚礁食物网中主要食源对消费者的贡献率,计算原理如下:

# $$\begin{split} \delta j_E = & f_A \delta j_A + f_B \delta j_B + f_C \delta j_C + f_D \delta j_D \\ \delta k_E = & 1 \times f_A \delta k_A + f_B \delta k_B + f_C \delta k_C + f_D \delta k_D \\ & 1 = & f_A + f_B + f_C + f_D \end{split}$$

式中, $j_E$ 、 $k_E$ 表示生物消费者 E 的 2 种同位素 j、k 的比值; A、B、C、D 为食物源; f 为食物对消费者的贡献率。本 研究利用 Phillips<sup>[22]</sup>等利用质量守恒原理反复叠代编写的 IsoSource 程序来计算各食源对珊瑚礁海域主要消费者的贡献率。

#### 1.4 数据处理及分析

以珊瑚礁生态系统中消费者的δ<sup>15</sup>N平均值来计算平均营养级,营养级的计算公式如下:

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

式中,δ<sup>15</sup><sub>Nsample</sub>表示各生物的氮稳定同位素比值;δ<sup>15</sup>N<sub>baseline</sub>表示基准生物氮稳定同位素平均比值,本研究取浮游动物<sup>[23-24]</sup>,实验室计算其平均值为8.04‰;Δ<sup>15</sup>N表示相邻营养级的氮富集度,参考文献取3.4‰<sup>[25]</sup>;λ作为基准生物的营养级,其取值参照朱文涛<sup>[12]</sup>采用的相关标准,营养级定为2。

基于标准化欧氏距离(Standardised Euclidean distance)对三亚蜈支洲岛牧场区域主要消费者的营养类群 层次进行聚类分析,聚类分析(Hierarchical Cluster Analysis)方法采用瓦尔德法;基于 IsoSource 模型分析主要 食源对消费者的贡献率。单因素方差分析(ANOVA)检验三亚蜈支洲岛珊瑚礁海域食物网各成分之间的稳定 同位素差异。用 R 语言(R CoreTeam, 2018)的 SIBER 模型计算食物网中的 6 个群落营养结构指标<sup>[26]</sup>,利用 Excel 2019、ArcGIS 10.2、SPSS 25.0、Origin 75、Adobe Illustrator 2020 等软件进行数据处理及绘图。

#### 2 结果分析

#### 2.1 种类鉴定

ol3 cr ol5 v

2020年7月海洋生物调查共采集鱼类24科24属31种,头足类3科3属3种,虾蟹类7科9属10种,腹 足类2科2属2种,海参2科2属3种、海胆2科2属2种、海星1科1属1种,大型海藻4科4属4种(表1)。

Table 1 The of C, of N values and tropnic level (1L) of major consumers in the regional ecosystem of wuznizhou island kanch in Sanya								
物种	样本数	$\delta^{13}C$	$\delta^{15} N$	TL				
Species	n	Average $\pm$ SD	Average ± SD	Average $\pm$ SD				
大型海藻 Macroalgae								
紫衫状海门冬 Asparagopsis taxiformis	1	-28.24‰	5.22‰	1.17				
圆果胞藻 Tricleocarpa fragilis	1	-24.44‰	5.90‰	1.37				
包式团扇藻 Padina boryana	1	-12.60‰	6.54‰	1.56				
喇叭藻 Turbinaria ornata	1	-15.44‰	5.63‰	1.29				
棘皮类 Echinoderms								
刺冠海胆 Diadema setosum	4	(-15.47±0.10)‰	$(6.43 \pm 0.49)\%$	$1.53 \pm 0.14$				
长棘海星 Acanthaster planci	4	(-15.37±0.12)‰	(7.21±0.17)‰	$1.76 \pm 0.05$				
黑海参 Halodeima atra	2	(-13.27±1.02)‰	$(7.50\pm0.01)\%$	1.84				
紫海胆 Anthocidaris crassispina	1	-15.90‰	7.90‰	1.96				
绿刺参 Stichopus chloronotus	3	(-12.85±0.11)%	(9.15±0.26)‰	$2.33 \pm 0.08$				
红腹海参 Holothuria edulis	3	$(-12.74\pm0.14)\%$	(9.75±0.38)‰	2.50±0.11				
腹足类 Gastropod								
核果螺 Drupa cornus	4	(-12.87±0.37)‰	(9.37±0.70)‰	$2.39 \pm 0.17$				
节蝾螺 Turbo bruneus	4	(-15.57±0.67)‰	(9.53±0.41)‰	$2.44 \pm 0.13$				
头足类 Cephalopods								
弯斑鮹 Octopus dollfusi	1	-18.04‰	10.10‰	2.61				
枪乌贼 Uroteuthis chinensis	1	-18.64‰	11.02‰	2.88				

表 1 三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统主要消费者  $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{15}N$  值及营养级(TL)

3244

8期

续表

物种	样本数	$\delta^{13}C$	$\delta^{15}N$	TL
Species	n	Average $\pm$ SD	Average ± SD	Average ± SD
双喙耳乌贼 Sepiola birostrata	1	-17.14‰	11.28‰	2.95
虾蟹类 Shrimp and crab				
伪装仿关公蟹 Dorippoides facchino	1	-17.34‰	9.96‰	2.56
日本对虾 Penaeus japonicus	4	$(-16.24 \pm 0.13)\%$	$(10.43 \pm 0.11)\%$	$2.70 \pm 0.03$
逍遥馒头蟹 Calappa philargius	3	$(-15.93 \pm 0.04)\%$	$(10.50\pm0.15)\%$	$2.72 \pm 0.04$
红星梭子蟹 Portunus sanguinolentus	1	-16.98	-10.64‰	2.76
锯缘青蟹 Scylla serrata	3	$(-17.03 \pm 0.12)\%$	$(10.72 \pm 0.07)\%$	$2.79 \pm 0.02$
须赤虾 Metapenaeopsis barbata	4	$(-16.67 \pm 0.32)$ %	(10.74±0.22)‰	$2.79 \pm 0.07$
直额蟳 Charybdis truncata	3	$(-17.45 \pm 0.07)\%$	$(10.79 \pm 0.14)\%$	$2.81 \pm 0.04$
口虾蛄 Oratosquilla oratoria	3	$(-16.38 \pm 0.17)\%$	(11.27±0.21)‰	$2.95 \pm 0.06$
看守长眼蟹 Podophthalmus vigil	3	$(-17.87 \pm 0.03)\%$	(11.32±0.09)‰	$2.96 \pm 0.03$
锈斑蟳 Charybdis feriatus	1	-16.57‰	11.66‰	3.06
鱼类 Fish				
斑臀斷 Callionymus octostigmatus	3	$(-18.59 \pm 0.11)\%$	9.86±0.13‰	$2.54 \pm 0.04$
短鳄齿鱼 Champsodon snyderi	3	$(-18.67 \pm 0.07)\%$	$(10.44 \pm 10.25)\%$	$2.71 \pm 0.07$
日本瞳鲬 Inegocia japonicus	3	$(-18.08 \pm 0.18)\%$	(10.64±0.18)‰	$2.76 \pm 0.05$
大鳞斑额鲆 Engyprosopon grandisquama	3	$(-18.35 \pm 0.06)\%$	(10.64±0.30)‰	$2.76 \pm 0.09$
单斑天竺鲷 Jaydia carinata	3	$(-18.40\pm0.11)\%$	$(10.68 \pm 0.38)\%$	$2.78 \pm 0.11$
少鳞鰧 Uranoscopus oligolepis	3	$(-18.20\pm0.13)\%$	$(11.07 \pm 0.35)\%$	$2.89 \pm 0.10$
日本金线鱼 Nemipterus japonicus	3	$(-18.29 \pm 0.03)\%$	$(11.08\pm0.12)\%$	$2.89 \pm 0.04$
黑带光鳃雀鲷 Chromis retrofasciata	3	$(-19.10\pm0.05)\%$	$(11.16\pm0.17)\%$	$2.92 \pm 0.05$
细条天竺鲷 Jaydia lineata	3	$(-18.26 \pm 0.19)\%$	(11.17±0.23)‰	$2.92 \pm 0.07$
中华騰 Uranoscopus chinensis	3	$(-17.91 \pm 0.08)\%$	(11.50±0.26)‰	$3.01 \pm 0.08$
细纹鲾 Leiognathus berbis	3	(-18.23±0.17)‰	(11.57±0.11)‰	$3.04 \pm 0.03$
白方头鱼 Branchiostegus albus	1	-17.99‰	11.60‰	3.05
鳞眼鲽 Lepidoblepharon ophthalmolepis	3	$(-18.02\pm0.28)\%$	$(11.63 \pm 0.30)\%$	$3.06 \pm 0.09$
大头狗母鱼 Trachinocephalus myops	3	$(-17.29 \pm 0.35)\%$	$(11.72 \pm 0.36)\%$	$3.08 \pm 0.11$
小海猪鱼 Halichoeres miniatus	3	$(-18.09 \pm 0.14)\%$	$(11.85 \pm 0.15)\%$	$3.12 \pm 0.04$
绿尾唇鱼 Cheilinus chlorurus	2	$(-16.51\pm0.59)\%$	(12.32±0.35)‰	$3.26 \pm 0.10$
中线天竺鲷 Apogon kiensis	3	$(-17.47 \pm 0.32)\%$	$(-12.499 \pm 0.28)\%$	$3.31 \pm 0.08$
蠕纹裸胸鳝 Gymnothorax kidako	1	-18.14‰	13.15‰	3.35
东方豹鲂鮄 Dactyloptena orientalis	1	-17.23‰	12.68%	3.36
须拟鲉 Scorpaenopsis cirrosa	1	-15.56‰	12.75‰	3.39
克里裸胸鳝 Gymnothorax cribroris	1	-18.37‰	12.81‰	3.40
线纹叉鼻鲀 Arothron immaculatus	1	-18.384‰	-12.86‰	3.42
花斑蛇鲻 Saurida undosquamis	3	-18.14%	13.15%	3.50
日本绯鲤 Upeneus japonicus	1	-18.48%	13.22‰	3.52
伯恩斯裸胸鯙 Gymnothorax buroensis	1	-16.24‰	13.23‰	3.53
黄纹拟鲈 Parapercis xanthozona	3	$(-16.31 \pm 0.09)\%$	(13.55±0.12)‰	$3.62 \pm 0.03$
斑柄鹦天竺鲷 Ostorhinchus fleurieu	1	-17.49‰	13.60‰	3.64
齿颌眶棘鲈 Scolopsis ciliatus	1	-15.77%	13.64‰	3.65
密花裸胸鯙 Gymnothorax thyrsoideus	1	-16.91‰	13.70%	3.66
带纹躄鱼 Antennarius striatus	1	17.28‰	13.73‰	3.67
横带九棘鲈 Cephalopholis boenak	1	-16.90‰	14.03‰	3.76

TL:营养级 Trophic level

2.2 稳定同位素特征

2020 年 7 月海洋生物调查除浮游生物、大型海藻 外共采集 52 种主要消费者,以主要消费者的δ<sup>13</sup>C、δ<sup>15</sup>N 值为横纵坐标绘制珊瑚礁生态系统食物网的稳定同位 素双位图(图 2)。

三亚蜈支洲岛牧场区域珊瑚礁生态系统食物网  $\delta^{13}$ C值范围为-19.10‰—-12.74‰,平均值(-16.99± 1.52)‰;  $\delta^{15}$ N 值范围为 6.43‰—14.03‰,平均值 (11.24±1.70)‰(表1)。稳定同位素结果显示,棘皮类  $\delta^{13}$ C、 $\delta^{15}$ N 值范围分别为-15.90‰(紫海胆 Anthocidaris crassispina)—-12.74‰(红腹海参 Holothuria edulis)和 6.43‰(刺冠海胆 Diadema setosum)—9.75‰(红腹海参 Holothuria edulis),均值分别为(-14.27±1.33)‰、 (7.99±1.14)‰;鱼类  $\delta^{13}$ C、 $\delta^{15}$ N 值范围分别为-19.10‰ (黑带光鳃雀鲷 Chromis retrofasciata)—-15.56‰(须拟 鲉 Scorpaenopsis cirrosa)和 9.86‰(斑臀鰤 Callionymus



图 2 牧场区域生态系统主要消费者的  $\delta^{13}$ C 和  $\delta^{15}$ N 值的双位图 Fig.2 The stable isotope biplots of the  $\delta^{13}$ C and  $\delta^{15}$ N values of the main consumers in the marine ranch ecosystem

octostigmatus)—14.03‰(橫带九棘鲈 Cephalopholis boenak),均值分别为(-17.65±0.90)‰、(12.16±1.15)‰,  $\delta^{13}C_{\delta}\delta^{15}N$  值跨度较大。虾蟹类  $\delta^{13}C_{\delta}\delta^{15}N$  值范围分别是-17.87‰(看守长眼蟹 Podophthalmus vigil)— -15.93‰(逍遥馒头蟹 Calappa philargius)和 9.96‰(伪装仿关公蟹 Dorippe facchino)—11.66‰(锈斑蟳 Charybdis feriatus),均值分别为(-16.85±0.57)‰、(10.80±0.39)‰;腹足类  $\delta^{13}C_{\delta}\delta^{15}N$  值范围分别在 -15.06‰—-13.33‰,9.37‰—9.53‰之间;头足类  $\delta^{13}C_{\delta}\delta^{15}N$  值范围分别为-18.64‰—-17.14‰和 10.10‰— 11.28‰,均值分别为(-17.94±0.62)‰、(10.80±0.51)‰。单因素方差分析显示,棘皮类、虾蟹类、腹足类、鱼 类等不同类群  $\delta^{13}C_{\delta}\delta^{15}N$  值差异极显著(P < 0.01)。

2.3 营养级及连续营养谱

本研究以浮游动物为基线生物,计算牧场区域珊瑚礁生态系统主要消费者的营养级并绘制连续营养谱。 主要消费者的营养级范围为1.53—3.76,均值为2.94±0.50,跨度为2.23,属于3个营养级(图3)。其中,横带 九棘鲈 Cephalopholis boenak 营养级最高为3.76,刺冠海胆 Diadema setosum 营养级最低为1.53±0.14。各类群 营养级之间差异较大,棘皮类、虾蟹类、腹足类、头足类和鱼类的营养级范围分别为1.53—2.50、2.56—3.06、 2.39—2.44、2.61—2.95和2.54—3.76。珊瑚礁鱼类的碳氮值跨度最大,而其他种群生物碳氮值相对跨度 较小。

2.4 牧场区域生物群落营养结构指标特征

进一步应用 SIBER 模型分析三亚蜈支洲岛牧场区域稳定同位素数据的 6 个营养结构指标,通过与邻近海域的研究结果比较,发现主要消费者的摄食来源多样性水平(CR)、营养级长度(NR)分别为 6.36 和 7.60, 表明牧场区域珊瑚礁生态系统的食源多样性水平较高,但食物链长度较短;生态位空间(TA)和平均营养级多 样性(CD)分别为 29.52 和 1.96,说明该食物网营养级多样性的总程度和平均程度相对较高;平均最近相邻距 离(MNND)及最近相邻距离的标准偏差(SDNND)分别为 0.37 和 0.30(表 2)。

2.5 牧场区域的聚类分析及潜在碳源对不同消费者的贡献率

通过系统聚类分析(Hierarchical Cluster Analysis)及 IsoSource 模型分析发现,大型海藻和底栖微藻对主要 消费者的贡献率最大为 41.50%, 沉积有机物(SOM)和浮游植物也是消费者的重要碳源(贡献率分别为 20.05%、19.97%), 悬浮颗粒有机物(POM)对消费者的碳源贡献率最低,为 18.48%(表 3)。



![](_page_6_Figure_3.jpeg)

![](_page_6_Figure_4.jpeg)

#### 3 讨论

3.1 三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统营养结构特征

CR 值表示食物网中的食源多样性特征,CR 值越大初始食源越多。本研究碳值跨度为 6.36‰(即 CR 值),高于南海中西部渔场<sup>[27]</sup>(3.49‰)、华南典型海湾<sup>[28]</sup>(海陵湾 2.44‰、陵水湾 4.45‰)和浙江南部近海<sup>[30]</sup>(5.70‰)。三亚蜈支洲岛海洋牧场生态系统属于典型南方热带海洋牧场生态系统,与邻近海域相比,三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统中的食物来源除浮游植物、POM 及有机碎屑外,还有自养细菌、珊瑚共生藻、大型海藻等多类初级生产者<sup>[10]</sup>提供碳源,这会导致生态系统内主要消费者在摄食饵料范围上更广,其碳源更为复

杂。此外,三亚蜈支洲岛海域临近琼东上升流区域<sup>[31]</sup>,底层营养物质上涌使其更具高生产力,摄食来源多样 性水平(CR)的值可能会受其影响。但研究海域的 CR 值要低于胶州湾(8.47‰)<sup>[32]</sup>、珠江口(12.58‰)<sup>[24]</sup>的 研究,这可能与南北方水质环境差异有关,南方地区有较高的日照水平,初级生产者稳定同位素组成可能出现 明显的碳富集<sup>[33-34]</sup>,而且珠江口位于咸淡水交汇区域,水体、底质中有机质来源多样化,水域环境的生物种类 食源更为复杂<sup>[24]</sup>。三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统内主要消费者的 NR 值为 7.60,也明显高于邻近海域(表 2),这可能与研究区域资源量有关,蜈支洲岛牧场区物种多样性高。牧场区中棘皮类、虾蟹类等底栖动物,头 足类、腹足类等软体动物以及游泳动物的存在可能使食物链长度更长。TA 与 CD 表示食物网营养级多样性 的总程度和平均程度,MNND 和 SDNND 用来描述群落营养冗余的大小<sup>[35]</sup>。本研究中,生态系统的 TA 与 CD 值分别为 29.52、1.92,MNND 和 SDNND 值为 0.37、0.30,与黄佳兴<sup>[27]</sup>、张文博<sup>[28]</sup>、宁加佳<sup>[29]</sup>等人分别在南海 中西部、南海西南部、陵水湾、海陵湾的研究结果比较,三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统的营养多样性水平及 平均程度较高。三亚蜈支洲岛牧场区域食物网中具有相似营养特征的物种占多数,且营养生态位分布广<sup>[36]</sup>, 因此冗杂程度也比邻近海域高。

	Table 2 Community structure indicators of major consumers in different regions							
不同区域 Area	年份 Year	营养级长度 NR	摄食来源 多样性水平 CR	生态位总空间 TA	平均营养级 多样性 CD	物种聚集度 密度参数 MNND	物种聚集度 均匀度参数 SDNND	
三亚蜈支洲岛 Wuzhizhou Island, Sanya	2020	7.60	6.36	29.52	1.92	0.37	0.30	
南海中西部 <sup>[27]</sup> South China Sea	2017	4.91	3.49	9.48	1.20	1.69	0.74	
海陵湾 <sup>[28]</sup> Hailing Bay	2015	3.06	2.44	5.10	0.93	0.55	0.35	
陵水湾 <sup>[28]</sup> Lingshui Bay	2015	4.66	4.45	11.18	1.49	0.60	0.54	
南沙群岛西南部 Nansha Island <sup>[29]</sup>	2013	4.30	3.40	5.80	1.00	0.37	0.43	

表 2 不同区域主要消费者的群落结构指标

NR:营养级长度 Trophic level;CR:摄食来源多样性水平 The level of food source diversity;TA:生态位总空间 Total area;CD:平均营养级多样性 Mean distance to Centroid;MNND:物种聚集度密度参数 Species aggregation density parameter;SDNND:物种聚集度均匀度参数 Species aggregation uniformity parameter

表 3 三亚蜈支洲岛牧场区域生态系统不同食物碳源的贡献率

Table 3	The contribution rate of	of different food	carbon sources in the	regional ecosystem of	Wuzhizhou Island Ranch in Sanva
I able 5	The contribution rate (	л ишстент тооч	carbon sources in the	i celonal ccosystem of	wuzinznuu Isianu Nanun in Sanva

物种	编号	各类食物碳源占比/%				
Species	Codes	POM	SOM	浮游植物	底栖微藻	大型海藻
棘皮类 Echinoderms						
刺冠海胆	1	13.3(0-42)	27.6(0-56)	15.1(0-48)	28(0-62)	16(0-52)
长棘海星	2	13.0(0-40)	28.2(0-58)	14.6(0-46)	28.3(0-64)	15.8(0-50)
黑海参	3	6.9(0-24)	40.9(0-74)	7.7(0-26)	35.9(0-84)	8.6(0-30)
紫海胆	4	14.6(0-46)	25.2(0-54)	16.4(0-52)	26.3(0-60)	17.5(0-56)
绿刺参	5	5.7(0-18)	44.3(0-78)	6.5(0-22)	36.4(0-86)	7.1(0-24)
红腹海参	8	5.5(0-20)	46.3(0-80)	6.2(0-22)	35.3(0-88)	6.8(0-24)
腹足类 Gastropod						
核果螺	6	5.7(0-20)	44.0(0-78)	6.6(0-24)	36.5(0-88)	7.2(0-26)
节蝾螺	7	13.6(0-42)	27.0(0-56)	15.3(0-48)	27.6(0-62)	16.4(0-52)
头足类 Cephalopods						
弯斑鮹	11	21.8(0-62)	14.7(0-36)	23.4(0-72)	16.1(0-40)	24.0(0-78)
中国枪乌贼	22	24.2(0-68)	11.9(0-30)	25.0(0-76)	13.2(0-34)	25.7(0-84)
双喙耳乌贼	28	18.6(0-56)	19.1(0-42)	20.4(0-62)	20.3(0-48)	21.5(0-68)

续表							
物种	编号	各类食物碳源占比/%					
Species	Codes	POM	SOM	浮游植物	底栖微藻	大型海藻	
虾蟹类 Shrimp and crab							
伪装仿关公蟹	10	19.4(0-56)	18.1(0-42)	20.9(0-64)	19.5(0-46)	22.1(0-70)	
日本对虾	12	15.6(0-48)	23.3(0-50)	17.5(0-54)	24.9(0-56)	18.7(0-58)	
逍遥馒头蟹	14	14.8(0-46)	25.1(0-52)	16.4(0-52)	26.1(0-60)	17.7(0-56)	
红星梭子蟹	15	18.1(0-54)	19.8(0-44)	19.9(0-62)	21.2(0-50)	21.0(0-66)	
锯缘青蟹	19	18.3(0-54)	19.5(0-44)	20.0(0-62)	21.0(0-48)	21.2(0-66)	
须赤虾	20	17.1(0-50)	21.3(0-46)	18.9(0-58)	22.7(0-52)	20.0(0-64)	
直额蟳	21	19.7(0-56)	17.5(0-40)	21.3(0-64)	19.0(0-46)	22.5(0-70)	
口虾蛄	27	16.2(0-50)	22.8(0-50)	17.9(0-56)	24.0(0-54)	19.1(0-60)	
看守长眼蟹	29	21.1(0-62)	15.5(0-36)	22.6(0-70)	16.9(0-42)	23.9(0-74)	
锈斑蟳	34	16.8(0-50)	21.8(0-48)	18.5(0-58)	23.1(0-54)	19.8(0-62)	
鱼类 Fish							
斑臀斷	9	24.0(0-68)	12.2(0-32)	25.1(0-76)	13.3(0-34)	25.4(0-84)	
短鳄齿鱼	13	24.1(0-66)	11.8(0-30)	25.3(0-78)	13.0(0-34)	25.9(0-84)	
日本瞳鲬	16	21.9(0-62)	14.6(0-34)	23.6(0-72)	15.8(0-40)	24.1(0-78)	
大鳞斑额鲆	17	22.9(0-64)	13.2(0-32)	24.4(0-74)	14.6(0-36)	24.9(0-80)	
单斑天竺鲷	18	23.1(0-64)	13.0(0-32)	24.5(0-74)	14.3(0-36)	25.0(0-82)	
少鳞鰧	23	22.4(0-64)	13.9(0-34)	23.7(0-72)	15.3(0-38)	24.6(0-80)	
日本金线鱼	24	22.6(0-64)	13.5(0-34)	23.9(0-74)	14.8(0-38)	25.1(0-78)	
黑带光鳃雀鲷	25	26.1(0-72)	9.8(0-26)	26.6(0-82)	10.9(0-30)	26.5(0-88)	
细条天竺鲷	26	22.5(0-62)	13.7(0-34)	24.1(0-72)	15.0(0-38)	24.7(0-80)	
中华鰧	30	21.3(0-62)	15.3(0-36)	22.7(0-70)	16.7(0-40)	23.9(0-76)	
细纹鲾	31	22.5(0-64)	13.8(0-34)	23.9(0-72)	15.2(0-38)	24.6(0-80)	
白方头鱼	32	21.6(0-60)	14.9(0-36)	23.2(0-70)	16.3(0-40)	24.0(0-76)	
鳞眼鲽	33	21.6(0-62)	14.8(0-36)	23.3(0-70)	16.2(0-40)	24.1(0-76)	
大头狗母鱼	35	19.2(0-56)	18.4(0-42)	20.8(0-64)	19.6(0-46)	22.0(0-70)	
小海猪鱼	36	21.9(0-64)	14.5(0-36)	23.6(0-72)	15.8(0-38)	24.2(0-78)	
绿尾唇鱼	37	16.5(0-50)	22.1(0-48)	18.3(0-56)	23.5(0-54)	19.6(0-62)	
中线天竺鲷	38	19.8(0-58)	17.5(0-40)	21.5(0-66)	18.8(0-44)	22.4(0-72)	
蠕纹裸胸鳝	39	22.1(0-64)	14.2(0-34)	23.5(0-72)	15.6(0-38)	24.5(0-78)	
东方豹鲂鮄	40	18.9(0-56)	18.6(0-42)	20.8(0-64)	20.0(0-48)	21.7(0-68)	
须拟鲉	41	13.6(0-42)	27.1(0-56)	15.2(0-48)	27.6(0-62)	16.4(0-52)	
克里裸胸鳝	42	23.1(0-66)	13.1(0-32)	24.2(0-74)	14.5(0-36)	25.1(0-80)	
线纹叉鼻鲀	43	23.1(0-66)	13.0(0-32)	24.3(0-74)	14.5(0-36)	25.1(0-80)	
花斑蛇鲻	44	22.1(0-64)	14.2(0-34)	23.5(0-72)	15.6(0-38)	24.5(0-78)	
日本绯鲤	45	23.3(0-66)	12.6(0-32)	24.7(0-76)	13.9(0-36)	25.5(0-82)	
伯恩斯裸胸鯙	46	15.6(0-48)	23.3(0-50)	17.5(0-54)	24.9(0-56)	18.7(0-58)	
黄纹拟鲈	47	16.0(0-46)	23.2(0-50)	17.7(0-56)	24.3(0-56)	18.9(0-60)	
斑柄鹦天竺鲷	48	19.9(0-58)	17.3(0-40)	21.4(0-66)	18.8(0-44)	22.7(0-72)	
齿颌眶棘鲈	49	14.2(0-42)	25.8(0-54)	15.9(0-50)	26.9(0-60)	17.1(0-54)	
密花裸胸鯙	50	17.9(0-54)	20.3(0-44)	19.6(0-60)	21.4(0-50)	20.8(0-64)	
带纹躄鱼	51	19.1(0-56)	18.5(0-42)	21.0(0-64)	19.6(0-46)	21.8(0-68)	
横带九棘鲈	52	17.8(0-54)	20.2(0-44)	19.6(0-60)	21.6(0-50)	20.8(0-66)	

三亚蜈支洲岛牧场区域珊瑚礁生态系统的主要消费者可以分为4种营养类群:第一类主要以大型海藻、浮游植物、POM为主的混合有机碳源包括日本瞳鲬(Inegocia japonicus)、细纹鲾(Leiognathus berbis)、鳞眼鲽(Lepidoblepharon ophthalmolepis)等近海中下层、底栖性鱼类以及头足类构成,占采样总数的34.62%;第二类群食源以底栖微藻为主,SOM为辅,由红星梭子蟹(Portunus sanguinolentus)、日本对虾(Penaeus japonicus)等杂 食性的虾蟹类构成,占采样总数的21.15%;第三类群主要包括横带九棘鲈(Cephalopholis boenak)、黄纹拟鲈(Parapercis xanthozona)、花斑蛇鲻 (Saurida undosquamis)、密花裸胸鳝(Gymnothorax thyrsoideus)等肉食性鱼类,主要食源以大型海藻为主,底栖微藻为辅,占采样总数的30.77%;第 四类群由红腹海参(Holothuria edulis)、紫海胆(Anthocidaris crassispina)等营底栖生活的棘皮类和腹足类组成,主要食源为SOM和底栖微藻;占采

#### 3.2 牧场区域食物网主要消费者的营养级

三亚蜈支洲岛牧场区域食物网中主要消费者的营 养级范围为 1.53—3.76,总体上三亚蜈支洲岛鱼类的平 均营养级最高,其次为头足类和虾蟹类(平均营养级均 为2.81),腹足类平均营养级为2.41,棘皮类平均营养 级最低为1.99。根据国内学者营养层次的划分标准[37] 计算得出, 刺冠海胆 Diadema setosum、长棘海星 Acanthaster planci 等 4 种杂食性动物和横带九棘鲈 Cephalopholis boenak、花斑蛇鲻 Saurida undosquamis、齿 颌眶棘鲈 Scolopsis ciliatus、密花裸胸鳝 Gymnothorax thyrsoideus 等 10 种高级肉食性动物分别占总数的 7.69%、19.23%;由红星梭子蟹 Portunus sanguinolentus、 大鳞短额鲆 Engyprosopon grandisquama、弯斑鮹 Octopus dollgusi 以及日本瞳鲬 Inegocia japonicus、大头狗母鱼 Trachinocephalus myops、锈斑蟳 Charybdis feriatus 等为代 表的低级肉食性与中级肉食性动物分别占总数的 32.69%、40.38%。牧场区域食物网的主要消费者分布 在两端(杂食性动物与高级肉食性动物)的只占少数, 绝大多数居于中间的层次,为低级肉食性动物与中级肉 食性动物(表1),与大亚湾珊瑚礁生态系统营养层次分 布特征相似[12]。

本次调查采集 31 种鱼类以中小型为主,营养级范 围为 2.54—3.76,跨度 1.22。三亚蜈支洲岛鱼类营养级 主要集中于 2.92—3.40 之间,营养级别较高,约占鱼类 总数的 49.21%。基准生物和采样方式会对鱼类营养级 产生影响<sup>[38]</sup>,本研究中基准生物取浮游动物,其δ<sup>15</sup>N 值较低(8.04‰),采样方式可能是导致鱼类营养级较高 的原因。三亚蜈支洲岛珊瑚礁区域无法进行拖网采样, 本研究中鱼类主要使用动物饵料垂钓获得,具有一定的 选择偏向性,后续研究应考虑流刺网或地笼网等更全面 的采样方法。基于稳定同位素分析大部分鱼类的营养 级结果和 Fishbase 资料中数据相差不大,表明稳定同位 素技术是研究海洋生物营养级别、分析其营养层次的可 靠手段。但其中花斑蛇鲻 Saurida undosquamis 和大头 狗母鱼 Trachinocephalus myop 营养级偏低,花斑蛇鲻营 养级为 3.50,高于杨国欢<sup>[15]</sup>在徐闻珊瑚礁关于长蛇鲻

![](_page_9_Figure_5.jpeg)

![](_page_9_Figure_6.jpeg)

Fig. 4 Cluster analysis of stable carbon and nitrogen isotope ratios of major consumers in Wuzhizhou Island Ranch area, Sanya

的胃含物分析(3.20),花斑蛇鲻与长蛇鲻属于同科同属,且食性相似,应具有相近的营养级别<sup>[39]</sup>,而低于 Fishbase 资料中的4.50±0.4;而大头狗母鱼的营养级水平(3.08)也略低于杨国欢<sup>[15]</sup>的研究(3.20)和Fishbase 资料中的数据4.40±0.4。多项研究表明体长的差异会影响鱼类营养级<sup>[40-42]</sup>。Nakazawa<sup>[41]</sup>等研究发现掠食 性鱼类体长与δ<sup>15</sup>N值有呈现正相关的趋势,张波等<sup>[42]</sup>研究幼鱼阶段赤鼻棱鲦营养级随叉长增加而增加。本 研究中采样鱼类平均体长为(8.0±5.52) cm,体型较小,鱼类可能无法消耗高营养水平的较大猎物导致其食物 种类范围在低营养级群落中。而且本次调查采集的鱼类主要为中小型鱼类,一些鲨类、鳐类等大型肉食性鱼 类<sup>[11,27,29]</sup>可能未被采集到,这也可能是导致营养级偏低的原因。另外,本研究中基准生物选择为浮游动物, 运用整体的浮游动物的δ<sup>15</sup>N值为基准估算鱼类营养级是有局限性的,浮游动物不同大小、不同种类、营养物 质来源以及季节性变化等都会对营养级估算产生影响<sup>[38]</sup>。

本次采样调查中头足类的平均体长为(4.7±2.17) cm。头足类会摄食虾蟹类及鱼类,应位于营养层次较高的位置,但头足类胴长会显著影响其δ<sup>13</sup>C和δ<sup>15</sup>N值,在稚鱼阶段头足类常以端足类、糠虾等小型甲壳类为食<sup>[43-44]</sup>。聚类分析中,第二类群除虾蟹类外,双喙耳乌贼也被聚类,说明具有相似食性。此次采样双喙耳乌贼体长范围在 3.0—4.2 cm 之间,体重在 8.78—24.21 g之间,体型较小。在南海中西部研究中也发现,头足类平均营养级随着体长(胴长)增大其营养级有相应增大的趋势<sup>[27]</sup>,因此,两类平均营养级相同可能与采集样品中头足类的生长阶段及个体大小有关。另外,虾蟹类中锈斑蟳营养级最高,锈斑蟳食性比较复杂,会摄食甲壳类、藻类、鱼类等<sup>[45]</sup>,张文博<sup>[28]</sup>、高春霞<sup>[30]</sup>、莫宝霖<sup>[46]</sup>等人研究中锈斑蟳也具有较高的δ<sup>15</sup>N值或营养级。棘皮类中营养级最高的生物是红腹海参,与其他棘皮动物相比,红腹海参除摄食沉积物、浮游生物外,还会摄食海草、藻类等<sup>[47]</sup>。食性差异可能是导致锈斑蟳与红腹海参营养级相对较高的原因。

3.3 牧场区域珊瑚礁食物网主要消费者食源分析

浮游植物、底栖微藻、大型海藻在海洋牧场生态系统中是重要的潜在食源,对确定食物网中的主要碳源具 有重要意义[6,48-49]。稳定同位素分析在海洋牧场区域主要消费者食性来源方面的研究已有诸多报道。本研 究中,底栖微藻贡献率为20.59%,大型海藻占比20.91%。其中,底栖微藻在虾蟹类、腹足类和棘皮类为主的 第二、四类群生物中摄食最高,平均贡献率分别为 21.84%、32.05% 和 32.44%, Briand<sup>[7]</sup>等也发现基于底栖藻 类的底栖食物网为大多数中间消费者、杂食性鱼类提供了重要的食物来源。δ<sup>13</sup>C值富集程度可用于示踪及 分析生态系统食物链<sup>[50-51]</sup>,碳同位素高的生物基本与底栖食物网有关<sup>[30]</sup>。经过单因素方差分析,鱼类与虾 蟹类、腹足类、棘皮类的稳定碳同位素之间呈现极显著性差异(P < 0.01),鱼类与棘皮类差值最大(6.36%), δ<sup>13</sup>C 值富集程度较低,研究区域可能存在以底栖微藻为食源基础的底栖食物链。本研究中,第三类群鱼类的 主要食源是大型海藻,在海洋牧场生态系统中,大型海藻与珊瑚会有一定的竞争机制,但在营养物质的吸收与 释放、生物饵料、空间庇护等方面也有重要作用<sup>[52-53]</sup>。如大型海藻在黑带光鳃雀鲷与细条天竺鲷中的碳源占 26.5%、24.7%, 蒋日进等<sup>[54]</sup>发现在枸杞岛食物网中鱼类的主要碳源也是大型海藻, McMahon<sup>[6]</sup>等利用贝叶斯 模型研究表明大型海藻是红海珊瑚礁区域食物网的重要基础。SOM 也是该海域生物食源的组成部分,是重 要碳源。基于 IsoSource 模型分析,本研究中海参(黑海参、绿刺身、红腹海参)、海胆(刺冠海胆、紫海胆)等棘 皮类的 SOM 贡献率最高,平均贡献率分别占 43.83%、26.4%。 SOM 是棘皮类的基础食源,这与魏虎进<sup>[55]</sup>在象 山港海洋牧场区研究发现 SOM 是食物网的营养基础和莫宝霖<sup>[46]</sup>基于稳定同位素技术分析大亚湾紫海胆食 性的结果相似。

#### 4 结论

本研究构建了三亚蜈支洲岛海洋牧场生态系统食物网,分析牧场区域内主要消费者的营养级特征,应用 SIBER 模型对比牧场区域与邻近海域的营养结构差异,进一步利用聚类分析与 IsoSource 模型揭示主要消费 者的食源,为海洋牧场生态系统食物网的构建及实现基于生态系统的渔业管理提供科学的理论依据。在后续 研究中,应针对牧场内珊瑚礁生态系统的规模、稳定性和成熟度研究其内部的物质循环和能量流动,分析海洋 牧场关键捕食者或关键生境改造者在珊瑚礁区域的重要性。

#### 参考文献(References):

[2] West J B, Bowen G J, Cerling T E, Ehleringer J R. Stable isotopes as one of nature's ecological recorders. Trends in Ecology & Evolution, 2006,

<sup>[1]</sup> McKinney C R, McCrea J M, Epstein S, Allen H A, Urey H C. Improvements in mass spectrometers for the measurement of small differences in isotope abundance ratios. Review of Scientific Instruments, 1950, 21(8): 724-730.

21(7): 408-414.

- [3] Layman C A, Allgeier J E. Characterizing trophic ecology of generalist consumers: a case study of the invasive lionfish in the Bahamas. Marine Ecology Progress Series, 2012, 448: 131-141.
- [4] Layman C A, Araujo M S, Boucek R, Hammerschlag-Peyer C M, Harrison E, Jud Z R, Matich P, Rosenblatt A E, Vaudo J J, Yeager L A, Post D M, Bearhop S. Applying stable isotopes to examine food-web structure: an overview of analytical tools. Biological Reviews, 2012, 87(3): 545-562.
- [5] Herzka S Z, Holt G J. Changes in isotopic composition of red drum (*Sciaenops ocellatus*) larvae in response to dietary shifts: potential applications to settlement studies. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(1): 137-147.
- [6] McMahon K W, Thorrold S R, Houghton L A, Berumen M L. Tracing carbon flow through coral reef food webs using a compound-specific stable isotope approach. Oecologia, 2016, 180(3): 809-821.
- [7] Briand M J, Bonnet X, Guillou G, Letourneur Y. Complex food webs in highly diversified coral reefs: insights from  $\delta^{13}$ C and  $\delta^{15}$ N stable isotopes. Food Webs, 2016, 8: 12-22.
- [8] Carreón-Palau L, Parrish C C, Pérez-España H, Aguiñiga-Garcia S. Elemental ratios and lipid classes in a coral reef food web under river influence. Progress in Oceanography, 2018, 164: 1-11.
- [9] Graham N A J, McClanahan T R, MacNeil M A, Wilson S K, Cinner J E, Huchery C, Holmes T H. Human disruption of coral reef trophic structure. Current Biology, 2017, 27(2): 231-236.
- [10] 陈国华,黄良民,王汉奎,黄晖,谭烨辉,张偲,董俊德.珊瑚礁生态系统初级生产力研究进展.生态学报,2004,24(12):2863-2869.
- [11] 郭卫东,杨逸萍,吴林兴,王汉奎,胡明辉.南沙渚碧礁生态系营养关系的稳定碳同位素研究.台湾海峡,2002,21(1):94-101.
- [12] 朱文涛,秦传新,马鸿梅,席世改,左涛,潘莞倪,黎小国.大亚湾珊瑚礁生态系统简化食物网的稳定同位素.水产学报,2020,44(7): 1112-1123.
- [13] Bootsma H A, Hecky R E, Hesslein R H, Turner G F. Food partitioning among Lake Malawi nearshore fishes as revealed by stable isotope analyses. Ecology, 1996, 77(4): 1286-1290.
- [14] Dromard C R, Bouchon-Navaro Y, Harmelin-Vivien M, Bouchon C. Diversity of trophic niches among herbivorous fishes on a Caribbean reef (Guadeloupe, Lesser Antilles), evidenced by stable isotope and gut content analyses. Journal of Sea Research, 2015, 95: 124-131.
- [15] 杨国欢,孙省利,侯秀琼,陈春亮.基于稳定同位素方法的珊瑚礁鱼类营养层次研究.中国水产科学,2012,19(1):105-115.
- [16] 李秀保,李元超,许强.三亚蜈支洲岛珊瑚礁的现状、生态修复及保护对策.北京:科学出版社,2019:79-80.
- [17] 夏景全,任瑜潇,陈煜,吴钟启悦,李秀保,王爱民.珊瑚礁生态修复技术进展.海南热带海洋学院学报,2019,26(5):23-33.
- [18] 许惠丽, 冯博轩, 谢敏睿, 王宇彤, 黄建中, 肖海亮, 王爱民, 李秀保. 三亚蜈支洲岛两种造礁石珊瑚的生理特征. 应用海洋学学报, 2020, 39(2): 181-188.
- [19] Xu H L, Feng B X, Xie M R, Ren Y X, Xia J Q, Zhang Y, Wang A M, Li X B. Physiological characteristics and environment adaptability of reefbuilding corals at the Wuzhizhou Island of South China Sea. Frontiers in Physiology, 2020, 11: 390.
- [20] Huang J Z, Wang F X, Zhao H W, Xu H L, Liu S, Xu Q, Wang A M, Li X B. Reef benthic composition and coral communities at the Wuzhizhou Island in the south China sea: the impacts of anthropogenic disturbance. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 243: 106863.
- [21] 徐军,王玉玉,王康,曾庆飞,张敏,张欢.水域生态学中生物稳定同位素样品采集、处理与保存.水生生物学报,2020,44(5):989-997.
- [22] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [23] Zanden M J V, Rasmussen J B. Variation in  $\delta^{15}$  N and  $\delta^{13}$  C trophic fractionation: implications for aquatic food web studies. Limnology and Oceanography, 2001, 46(8): 2061-2066.
- [24] 曾艳艺,赖子尼,杨婉玲,李海燕,彭松耀,李捷,戴守辉.珠江河口渔业生物稳定同位素营养级分析.生态学杂志,2018,37(1): 194-202.
- [25] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [26] Layman C A, Arrington D A, Montaña C G, Post D M. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?. Ecology, 2007, 88(1): 42-48.
- [27] 黄佳兴,龚玉艳,徐姗楠,王欢欢,张魁,张俊,陈作志.南海中西部渔场主要渔业生物碳氮稳定同位素特征.热带海洋学报,2019,38 (1):76-84.
- [28] 张文博,黄洪辉,李纯厚,刘永,齐占会,徐姗楠,刘华雪.华南典型海湾主要渔业生物碳氮稳定同位素研究.南方水产科学,2019,15 (5):9-14.
- [29] 宁加佳, 杜飞雁, 王雪辉, 王亮根, 谷阳光, 李亚芳. 南沙群岛西南部陆架区底层鱼类营养结构研究. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 468-475.
- [30] 高春霞,戴小杰,田思泉,王家启,韩东燕,麻秋云,汤艾佳.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.中国水产科

学,2020,27(4):438-453.

- [31] 李秀保, 王爱民, 刘胜, 黄晖. 海南岛珊瑚礁的保护与修复//第三届现代海洋(淡水)牧场学术研讨会摘要集. 海口:中国水产学会海洋 牧场研究会, 2019: 15-16.
- [32] 麻秋云, 韩东燕, 刘贺, 薛莹, 纪毓鹏, 任一平. 应用稳定同位素技术构建胶州湾食物网的连续营养谱. 生态学报, 2015, 35(21): 7207-7218.
- [33] Grice A M, Loneragan N R, Dennison W C. Light intensity and the interactions between physiology, morphology and stable isotope ratios in five species of seagrass. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1996, 195(1): 91-110.
- [34] Durako M J, Hall M O. Effects of light on the stable carbon isotope composition of the seagrass *Thalassia testudinum*. Marine Ecology Progress Series, 1992, 86: 99-101.
- [35] Jackson A L, Inger R, Parnell A C, Bearhop S. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER stable isotope Bayesian ellipses in R. Journal of Animal Ecology, 2011, 80(3): 595-602.
- [36] 纪炜炜,李圣法,陈雪忠,阮雯,周进.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.海洋渔业,2015,37 (6):494-500.
- [37] 韦晟,姜卫民.黄海鱼类食物网的研究.海洋与湖沼,1992,23(2):182-192.
- [38] 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.湖泊科学,2010,22(1):8-20.
- [39] 张其永,杨甘霖.闽南-台湾浅滩渔场狗母鱼类食性的研究.水产学报,1986,10(2):213-222.
- [40] 廖建基,郑新庆,杜建国,陈彬.基于氮稳定同位素的九龙江口鱼类营养级研究.海洋学报,2015,37(2):93-103.
- [41] Nakazawa T, Sakai Y, Hsieh C H, Koitabashi T, Tayasu I, Yamamura N, Okuda N. Is the relationship between body size and trophic niche position time-invariant in a predatory fish? First stable isotope evidence. PLoS One, 2010, 5(2): e9120.
- [42] 张波, 袁伟, 戴芳群. 应用稳定同位素技术研究崂山湾夏季鱼类群落的摄食生态. 水产学报, 2016, 40(4): 585-594.
- [43] 黄佳兴, 龚玉艳, 徐姗楠, 陈作志, 张俊, 于文明. 南海中西部海域鸢乌贼中型群和微型群的营养生态位. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2822-2828.
- [44] 蔡研聪,孙铭帅,许友伟,李佳俊,黄梓荣,陈作志,杨长平,刘维达,张衡.南海北部近海头足类优势种及其生态位特征.应用生态学报,2020,31(8):2793-2803.
- [45] 黄美珍. 福建海区拥剑梭子蟹,红星梭子蟹和锈斑蟳的食性与营养级研究. 台湾海峡, 2004, 23(2): 159-166.
- [46] 莫宝霖,秦传新,陈丕茂,黎小国,冯雪,佟飞,袁华荣.基于碳、氮稳定同位素技术的大亚湾紫海胆食性分析.中国水产科学,2017,24 (3):566-575.
- [47] 黄端杰, 许强, 李秀保, 薛英楼, 吴沛霖, 高菲. 三亚蜈支洲岛珊瑚礁-沙质底复合区棘皮动物群落结构. 海洋与湖沼, 2020, 51(1): 103-113.
- [48] Hilting A K, Currin C A, Kosaki R K. Evidence for benthic primary production support of an apex predator dominated coral reef food web. Marine Biology, 2013, 160(7): 1681-1695.
- [49] Letourneur Y, De Loma T L, Richard P, Harmelin-Vivien M L, Cresson P, Banaru D, Fontaine M F, Gref T, Planes S. Identifying carbon sources and trophic position of coral reef fishes using diet and stable isotope (δ<sup>15</sup>N and δ<sup>13</sup>C) analyses in two contrasted bays in Moorea, French Polynesia. Coral Reefs, 2013, 32(4): 1091-1102.
- [50] 万祎,胡建英,安立会,安伟,杨敏,伊藤光明,服部达也,陶澍.利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物种的营养层次.科 学通报,2005,50(7);708-712.
- [51] 林光辉. 稳定同位素生态学. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [52] Hughes T P, Rodrigues M J, Bellwood D R, Ceccarelli D, Hoegh-Guldberg O, McCook L, Moltschaniwskyj N, Pratchett M S, Steneck R S, Willis B. Phase shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. Current Biology, 2007, 17(4): 360-365.
- [53] 章守宇,刘书荣,周曦杰,汪振华,王凯.大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨.水产学报,2019,43(9):2004-2014.
- [54] 蒋日进,章守宇,王凯,周曦杰,赵静. 枸杞岛近岸海域食物网的稳定同位素分析. 生态学杂志, 2014, 33(4): 930-938.
- [55] 魏虎进,朱小明,纪雅宁,姜亚洲,林楠,王云龙.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.应用海洋学学报,2013,32(2):250-257.