

中华鲎的食物组成及营养位置分析

郭清扬^{1,2}, 谷阳光², 鲍虞园², 李银康^{2,3}, 周传江¹, 颀晓勇²

(1. 河南师范大学水产学院, 河南 新乡 453000; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300; 3. 上海海洋大学/水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室/水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: 通过对北部湾海域采集的中华鲎 (*Tachypleus tridentatus*) 样品及其食物网链中具有食源可能性的种类 (虾类、蟹类、双壳类和鱼类) 进行碳、氮稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) 比值测定, 采用稳定同位素混合模型 (SIAR) 分析北部湾中华鲎食物组成及其营养位置。结果显示, 中华鲎 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $(-17.11\pm 0.03)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 $(12.14\pm 0.20)\text{‰}$ 。SIAR 模型显示双壳类为中华鲎的主要食物来源, 其平均贡献率为 31.27%; 其次为鱼类, 平均贡献率为 25.91%; 蟹类平均贡献率占比为 23.50%; 虾类平均贡献率占比最低 (19.32%)。营养位置分析显示中华鲎营养位置为 2.02 ± 0.06 。该研究涉及的中华鲎潜在食源样本中, 鱼类、虾类和蟹类的营养位置分别为 2.13 ± 0.51 、 2.36 ± 0.09 和 2.61 ± 0.21 。营养位置分析表明中华鲎在自然生态系统食物网中处于较为弱势的地位, 在已然濒危的情况下迫切需要科学的保护措施。

关键词: 中华鲎; 食物组成; 营养位置; 碳稳定同位素; 氮稳定同位素

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Dietary composition and trophic position of *Tachypleus tridentatus*

GUO Qingyang^{1,2}, GU Yangguang², BAO Yuyuan², LI Yinkang^{2,3}, ZHOU Chuanjiang¹, XIE Xiaoyong²

(1. College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang 453000, China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China; 3. Shanghai Ocean University/Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education/National Demonstration Center for Experimental Fisheries, Shanghai 201306, China)

Abstract: The stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of carbon and nitrogen of *Tachypleus tridentatus* collected from Beibu Gulf and its potential food source species (Shrimps, crabs, bivalves and fishes) in food web were determined. Besides, their food composition and nutritional position were analyzed by stable isotope mixture model (SIAR). The results show that the average $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of the *T. tridentatus* were $(-17.11\pm 0.03)\text{‰}$ and $(12.14\pm 0.20)\text{‰}$, respectively. Potential food sources of *T. tridentatus* were shrimps, crabs, bivalves and fishes. The SIAR model shows that bivalves were the main food source of *T. tridentatus* with average contribution rate of 31.27% (Fishes: 25.91%, crabs: 23.50%, shrimps: 19.32%). The trophic position of *T. tridentatus* was 2.02 ± 0.06 , while those of fishes, shrimps and crabs were 2.13 ± 0.51 , 2.36 ± 0.09 and 2.61 ± 0.21 , respectively. Trophic position analysis shows that

收稿日期: 2020-11-14; 修回日期: 2021-03-05

资助项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项 (2019YFD0901105); 南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州) 人才团队引进重大专项 (GML2019ZD0402); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2019TS21)

作者简介: 郭清扬 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为鲎生物学。E-mail: guoqingyang2018@163.com

通信作者: 颀晓勇 (1976—), 男, 博士, 副研究员, 从事水产养殖和种质资源保护研究。E-mail: xyxie@scsfri.ac.cn

T. tridentatus is in a relatively weak position in the natural ecosystem food web, and scientific protection measures are urgently needed as it is already endangered.

Key words: *Tachypleus tridentatus*; Dietary composition; Trophic position; Carbon stable isotope; Nitrogen stable isotope

鲎是一种浅海底栖节肢动物, 隶属于肢口纲、剑尾目^[1]。其外部形态在 4.75 亿年前的早古生代奥陶纪便有化石记录, 迄今为止外观未发生重大变化, 常被称为海洋“活化石”^[2]。现存鲎科动物包括美洲鲎 (*Limulus polyphemus*)、圆尾鲎 (*Carcinoscorpius rotundicauda*)、南方鲎 (*Tachypleus gigas*) 和中华鲎 (*T. tridentatus*)^[3]。自 20 世纪 80 年代以来, 因鲎试剂在医疗检测领域作为重要物质材料的基础来源, 以及人为活动对其生境的影响, 中国海域的中华鲎资源急剧下降^[4-6], 2019 年 3 月中华鲎在世界自然保护联盟濒危物种红色名录 (IUCN Red List of Threatened Species) 中被正式更新为濒危 (EN)^[3], 对鲎资源的保护刻不容缓。

目前已有诸多海内外学者对鲎开展研究, 如北部湾幼鲎栖息地调查^[3]、染色体水平测序组装^[7]、室内外养殖试验以及功能性饲料饲喂等^[8-9]。有观察显示中华鲎以底栖动物如软体动物、环节动物及海藻等为主要食物来源^[1], 但对该物种在食物链中的定位却缺少科学测定。由于食物在动物体内会进行同化作用, 动物体内稳定同位素成分与食源中的成分正相关^[10], 以此为基础对实验样本和潜在食源碳、氮稳定同位素值 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) 进行比较, 可分析该物种在食物网链中的营养位置, 并通过同位素混合模型计算各类潜在食源对实验样本的饵料贡

献率^[11]。

营养位置是生物量增减的表达形式^[10]。各营养群内物种可能具有不同生态功能及食物来源, 但该群体整体具备同一营养位置^[12]。本研究对北部湾海域中华鲎及其潜在食源营养位置进行研究, 首次采用碳、氮稳定同位素技术, 为进一步探索中华鲎营养需求、饵料开发及物种保护提供基础科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集和处理

2018 年 8 月下旬, 在北部湾海域开展浅海拖网和潮间带调查, 采样地点见表 1。所采样品包含软体动物、节肢动物、环节动物、脊索动物、刺胞动物、棘皮动物、多孔动物、纽形动物、星虫动物、扁形动物、蠕虫动物和腕足动物, 共 12 门 135 科 280 种。在样本中选 14 种生物按类别划分为鱼类、虾类、蟹类和双壳类, 依据同种生物个体规格大小相近选取 5~8 尾个体进行混样作为一个样品, 个体差异较大的则选 8~10 尾进行混样处理。按选取生物总量将同种生物的 2~3 个样品分为一组。样品处理方式为: 鱼类 [细鳞鱼 (*Brachymystax lenok*)、黄斑蓝子鱼 (*Siganus canaliculatus*)、银鲈 (*Bidyanus bidyanus*)、弹涂鱼 (*Periophthalmus*

表 1 调查区域取样断面信息
Table 1 Information of sampling section

断面 Section	高潮区 High tidal	中潮区 Mid tidal	低潮区 Low tidal
榕根山 RGS	109°68'81.80"E, 21°49'51.29"N	109°68'58.74"E, 21°49'02.05"N	109°68'72.23"E, 21°49'22.69"N
沙田 ST	109°39'25.06"E, 21°38'57.84"N	109°39'23.26"E, 21°30'50.46"N	109°39'19.21"E, 21°30'43.43"N
坡尾底 PWD	109°55'74.47"E, 21°51'50.08"N	109°55'56.29"E, 21°51'55.00"N	109°33'08.02"E, 21°31'03.72"N
西背岭 XBL	109°10'23.31"E, 21°24'49.89"N	109°10'52.16"E, 21°24'15.1"N	109°10'53.78"E, 21°23'58.8"N
下村 XC	109°11'36.2"E, 21°25'8.91"N	109°11'55.5"E, 21°24'40.29"N	109°11'46.55"E, 21°23'42.33"N
竹林盐场 ZLYC	109°17'19.49"E, 21°26'13.57"N	109°29'29.26"E, 21°42'65.97"N	109°29'61.36"E, 21°42'07.73"N
三娘湾 SNW	108°49'30.01"E, 21°37'32.07"N	108°49'24.94"E, 21°37'30.07"N	108°49'03.02"E, 21°36'47.14"N
草潭镇 CTZ	109°48'47.14"E, 21°21'6.25"N	109°48'52.29"E, 21°21'42.88"N	109°48'49.99"E, 21°22'5.19"N
渔洲坪 YZP	108°37'71.65"E, 21°64'41.51"N	108°38'27.04"E, 21°63'84.08"N	108°37'78.70"E, 21°63'33.43"N
怪石滩 GST	108°13'03.01"E, 21°29'58.81"N	108°13'03.55"E, 21°29'59.41"N	108°21'75.11"E, 21°49'98.68"N

cantonensis) 和短吻蝠 (*Leiognathus brevirostris*) 取背部肌肉; 虾类 [日本对虾 (*Penaeus japonicus*)、长毛对虾 (*P. penicillatus*) 和周氏新对虾 (*Metapenaeus joyneri*)] 取尾部肌肉; 蟹类 [(钝齿蜆 (*Charybdis hellerii*)、锈斑蜆 (*C. feriatas*) 和远海梭子蟹 (*Portunus pelagicus*)] 取第一螯足肌肉; 双壳类 [(文蛤 (*Meretrix meretrix*) 和毛蚶 (*Scapharca subcrenata*)] 取闭壳肌; 中华鲎取其腹甲收缩肌, 同时在生殖盖板、鳃书及尾部连接处、消化道与结缔组织相连部位取到少量肌肉。全部样品经 60 °C 烘干 48 h 后研磨成粉, 干燥保存^[12]。

样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 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。

1.2 数据处理和分析

碳、氮稳定同位素值计算公式:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ 或 } \delta^{15}\text{N} = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中 R_{sample} 代表样品重轻同位素比值 (如 $^{13}\text{C}_{\text{sample}}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}$); R_{standard} 为国际通用标准物质的重轻同位素比值 (如 $^{13}\text{C}_{\text{standard}}/^{12}\text{C}_{\text{standard}}$), 不同种类稳定同位素取 δ 值根据其国际通用标准物质而确定。碳、氮稳定同位素标准物分别为非洲拟箭石和大气氮。操作过程中为了实验数据的稳定, 每测试 12 个生物样品, 重新测试 1 个标样进行同位素值校正^[13-14]。

中华鲎及其不同食源的营养位置 (TP) 计算公式为:

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

式中各项参数在本研究中设定: $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为全部样本中除基线生物外的 $\delta^{15}\text{N}$, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为 $\delta^{15}\text{N}$ 在营养级传递过程中的富集值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为双壳类的 $\delta^{15}\text{N}$ (因受限于移动能力, 且稳定生境中寿命较长, 故选择双壳类作为基线生物来确定本研究中各样本的营养位置)^[12]。

在 R 软件中利用 SIAR 算法 (稳定同位素混合模型) 计算各种生物对中华鲎的食物贡献率^[13]。将所有样本数据输入稳定同位素混合模型, 经过营养富集因子校正^[15], 计算各个实验样本 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$, 表达不同食源对中华鲎的相对贡献。 $\delta^{15}\text{N}$ 能够表示营养层次和多样性水平^[16], $\delta^{13}\text{C}$ 则表达摄食来源多样性水平^[14]。其中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的营养富集因子分别是 (1.63±0.63)‰和 (3.54±0.74)‰。

2 结果

2.1 中华鲎及潜在食源同位素值

由于野外采集样本的多样性, 选择潜在食源进行送样检测, 初筛标准为是否具备适口性、节律性、分带性以及同种生物采集量能否满足后续实验要求。潜在食源生物测定中, 将 14 种生物共分为 4 类分析, 分别为鱼类、虾类、蟹类和双壳类。稳定同位素结果显示, 北部湾东部海域中华鲎 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 (-17.11±0.03)‰, $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 (12.14±0.20)‰。在中华鲎 4 类食物来源中, 蟹类 $\delta^{15}\text{N}$ 均值最高 [(14.22±0.75)‰]; 双壳类 $\delta^{15}\text{N}$ 均值最低 [(12.07±0.35)‰]; 鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 (12.53±1.80)‰; 虾类 $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 (13.36±0.33)‰。 $\delta^{13}\text{C}$ 计算结果显示, 双壳类 $\delta^{13}\text{C}$ 均值最低 [(-17.55±0.57)‰]; 其次是蟹类和鱼类, 均值分别为 (-15.55±0.53)‰和 (-15.37±2.16)‰; 虾类的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值最高 [(-11.75±2.11)‰] (图 1)。

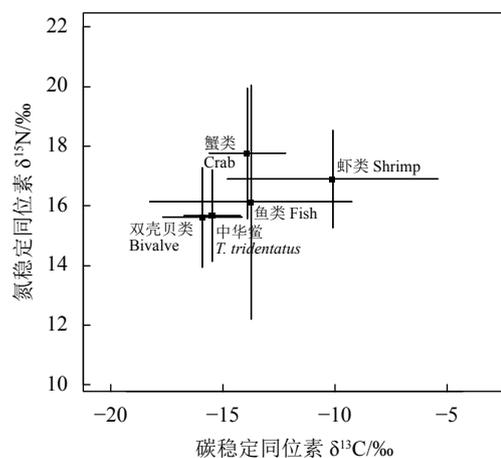


图1 潜在食源的氮稳定同位素和碳稳定同位素 (均值±标准差)
Figure 1 $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of potential food ($\bar{x} \pm \text{SD}$)

2.2 中华鲎的食物组成

采用同位素混合模型计算可知, 在 95% 置信区间, 中华鲎主要以双壳类为食, 平均贡献率为 31.27%; 其次为鱼类, 平均贡献率为 25.91%; 蟹类平均贡献率占比为 23.50%; 虾类平均贡献率占比最低 (19.32%)。

2.3 中华鲎及其潜在食源的营养位置

北部湾中华鲎的营养位置为 2.02±0.06。在本研究涉及的 4 类潜在食源样本中, 鱼类位置最低 (2.13±0.51), 虾类和蟹类营养位置分别为 2.36±0.09 和 2.61±0.21 (表 2)。

细化分类单元后以毛蚶 (2.0) 为基线生物计算

表2 中华鲎及潜在食源的氮、碳稳定同位素及营养位置

Table 2 $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ values and trophic position of *T. tridentatus* and their potential food $\bar{X}\pm\text{SD}$

名称 Sample	氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	营养位置 Trophic position
中华鲎 <i>T. tridentatus</i>	12.14±0.20	-17.11±0.03	2.02±0.06
鱼类 Fish	12.53±1.80	-15.37±2.16	2.13±0.51
虾类 Shrimp	13.36±0.33	-11.75±2.11	2.36±0.09
蟹类 Crab	14.22±0.75	-15.55±0.53	2.61±0.21
双壳类 Bivalve	12.07±0.35	-17.55±0.57	2.0

各物种营养位置, 中华鲎营养位置为 $1.933\ 2\pm 0.057\ 8$ 。鱼类中细鳞鱼、黄斑蓝子鱼、银鲈、弹涂鱼和短吻蝠分别为 $2.488\ 7\pm 0.055\ 3$ 、 $1.982\ 6\pm 0.096\ 6$ 、 $2.331\ 6\pm 0.003\ 3$ 、 $2.054\ 8\pm 0.077\ 1$ 和 $2.460\ 7\pm 0.042\ 6$ 。虾类中日本对虾为 $2.304\ 5\pm 0.060\ 5$, 长毛对虾为 $2.382\ 6\pm 0.140\ 8$, 周氏新对虾为 $2.259\ 8\pm 0.075\ 6$ 。蟹类中钝齿蜆为 $2.637\ 3\pm 0.170\ 9$ 、锈斑蜆为 $2.238\ 6\pm 0.031\ 5$ 、远海梭子蟹为 $2.624\ 1\pm 0.037\ 8$ 。双壳类中文蛤为 $1.828\ 4\pm 0.062\ 9$ 。

3 讨论

3.1 中华鲎食物组成分析

过度开发会对生物及其所处的生态环境造成难以修复的破坏, 包括中华鲎^[17]、底栖软体生物和鱼类^[18]。测定食物中成分对于管理物种种群、完善生态完整性及研究食用某种食源对捕食者的风险至关重要^[19]。利用食物网链开展食源分析, 可同时考量生物种间依存关系, 有利于对多种生境及栖息地生物进行针对性保护。采用胃部内容物分析和摄食试验法, 可分析实验前期样本摄入的食源种类^[11], 却无法对食物在生物体内转化做出确切判断, 更无法表示食源贡献率^[20]。而稳定同位素分析法能够记录水域食物网中能量流动路径, 研究消费者之间的营养级关系^[11], 使该方法具有独特优势。其结果对于人工繁育后养殖、放流目的地生态环境选择、以国家公园为主体的鲎保护区建设和管理等具有参考意义。

通过分析 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$, 发现中华鲎对各实验样本的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 均存在重叠范围, 表明其食物来源较为多样。中华鲎与双壳类的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 较为接近, 表明二者营养层级接近, 具有较多相似的食物来源。双壳类平均贡献率为 31.27%, 说明中

华鲎在对各类生物都有所摄食的前提下, 较偏爱于活动能力不强、体软的食源。有报道显示, 人工饲养试验中华鲎对乌贼摄食量最大, 生长效果最好^[21]。因中华鲎在野生状态下很难捕食到乌贼, 能够捕食到的生物种类或其死亡个体都可成为中华鲎潜在食源。生物个体对食源的选择性与其行为方式有关, 中华鲎使用螯肢捕获猎物, 并通过步足配合磨碎食物送入口中, 其进食方式并非迅猛的快速捕食^[21], 故行为较为缓慢、体软易于磨碎且遍布范围最为广泛的双壳类成为其首选食物^[22]。自然状态下中华鲎还有可能以多毛类生物、小型甲壳动物、底栖无脊椎动物及腐烂有机物等为食。人工繁育过程中, 通常对中华鲎选取多种饵料进行投喂, 如幼鲎饲喂过程中以丰年虫为饵料^[23], 也有选择沙蚕、菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*) 肉、中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 肉等作为饵料^[24], 与本研究中中华鲎潜在食源分析结果相符合。沙蚕、海葵、海参等底栖生物以及大型海藻也相对易于被鲎捕食, 尤其是海参和沙蚕可能经加工后用于中华鲎饲喂, 下一步将开展相关研究。

本研究结果表明, 中华鲎食物组成中鱼类平均贡献率为 25.91%, 蟹类为 23.50%, 虾类为 19.32%, 证明其食物来源广泛。中华鲎对生存环境适应性较高, 与其基因进化及表达相关^[25]。中华鲎的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值均分别与鱼类、虾类及蟹类有重叠部分, 推测野外自然状态下中华鲎食性有可塑性, 随生境范围缩小或食物来源减少, 其食物选择倾向于食性分化以降低种内竞争, 作为广食性物种适应低密度食源生境。

3.2 中华鲎营养位置分析

采用碳、氮稳定同位素技术分析生物营养级时需要选择某种生物作为基准。由于双壳类生物主要食源为藻类和颗粒有机质^[26], 且双壳类能有效表达稳定同位素值受外界环境差异的影响^[18], 本研究选取双壳类为基线生物, 其营养位置确定为 2.0^[27-28]。

鱼、虾、蟹、贝类 4 种食源的研究结果显示, 中华鲎营养位置为 2.02 ± 0.06 , 鱼类为 2.13 ± 0.51 , 虾类和蟹类分别为 2.36 ± 0.09 和 2.61 ± 0.21 。全部实验样本均处于初级消费者和次级消费者之间, 即全部样本食源均包含植物和初级消费者。本研究表明中华鲎营养位置最低, 即其食物组成中初级生产者的比例高于虾类、蟹类和鱼类。环节动物、腔肠动

物也有可能作为中华鲎潜在食源,但在其整个生命周期内易受水质变化影响将污染物沿食物网链向上传递^[29],故本研究中未送样检测。鱼类的食物组成相较于中华鲎更为多样,多数鱼类在其食性研究中被定义为广食性物种,如银鲈可摄食海藻、虾类、昆虫等^[30]。由于蟹类位于全部实验样本中的最高营养位置,推测中华鲎食源范围小于蟹类,蟹类除了具有和中华鲎相同的食源外,还会摄食位于二者之间层级的生物。自然生境中蟹类在底栖生物群落中常作为优势种出现,其食源范围广泛,如远海梭子蟹可摄食藻类和小型动物等^[12]。食物竞争中中华鲎相对蟹类处于弱势地位。位于愈高营养级的生物类型呈现出偏动物性饵料倾向,其食物组成中初级生产者的比例大幅降低^[27]。本研究显示鱼类、虾类和蟹类营养位置均高于中华鲎,推测其会摄食中华鲎幼体。自然海域的鲎卵及幼鲎是多种鸟类的食物来源^[1]。中华鲎在浅海区域成长至成年后会游向更深处,冬季时会选择在较深的海域生活,次年水温升高时重返浅水域觅食^[21]。胶状浮游生物虽然能量密度低,但由于快速消化、低捕获成本,所以成为海洋捕食者的易选食源^[31]。浮游生物如水母等因移动速度慢、生长速度较快,推测其可能会成为中华鲎的潜在食源。由于海洋动物的脂肪酸组成多依赖于食物^[32],下一步将采用胃部内容物分析法和脂肪酸组成分析,以期完善中华鲎在自然海域中的营养层级结构,深入理解物质与能量在其食物链中的传输途径。本研究可为中华鲎人工养殖饲料开发及建立中华鲎生态系统动力学模型奠定基础,通过扩大范围考量生物种类间物质能量流动以及摄食随生长、季节、昼夜、栖息水域水温等因素变化情况,在表达营养位置时形成更为紧密的营养位置阶梯结构^[33]。本研究表明中华鲎在自然生态系统食物网中处于较弱势地位,在已然濒危的情况下更迫切需要科学的保护措施。

4 结论

本文通过碳、氮稳定同位素技术,针对性地分析了北部湾海域中华鲎的食物组成及营养位置。研究结果表明,中华鲎食物来源多样,对双壳类、鱼类、虾类、蟹类均有摄食。其贡献率依次为双壳类(31.27%)>鱼类(25.91%)>蟹类(23.50%)>虾类(19.32%)。此外,中华鲎的营养位置为 2.02 ± 0.06 ,位于初级消费者和次级消费者之间。

参考文献:

- [1] 翁朝红, 谢仰杰, 肖志群, 等. 福建及中国其他沿岸海域中国鲎资源分布现状调查 [J]. 动物学杂志, 2012, 47(3): 40-48.
- [2] 谢蕙莲, 范航清, 廖永岩, 等. 鲎保育的三赢策略 [J]. 广西科学, 2017, 5: 87-93.
- [3] XIE X Y, WU Z, WANG C C, et al. Nursery habitat for Asian horseshoe crabs along the northern Beibu Gulf, China: implications for conservation management under baseline gaps[J]. Aquat Conserv: Mar Freshw Ecosyst, 2020, 30: 260-272.
- [4] MALONEY T, PHELAN R, SIMMONS N. Saving the horseshoe crab: a synthetic alternative to horseshoe crab blood for endotoxin detection[J]. PLoS Biol, 2018, 16(10): 1-15.
- [5] JAWAHIR A R N, SAMSUR M, SHABDIN M L, et al. Distribution of two species of Asian horseshoe crabs at west coast of Sarawak's Waters, East Malaysia[J]. Egypt J Aquat Res, 2017, 43(2): 135-140.
- [6] LIAO Y Y, HSIEH H L, XU S, et al. Wisdom of crowds reveals decline of Asian horseshoe crabs in Beibu Gulf, China[J]. Oryx, 2019, 53(2): 222-229.
- [7] SHINGATE P, RAVI V, PRASAD A, et al. Chromosome-level assembly of the horseshoe crab genome provides insights into its genome evolution[J]. Nat Commun, 2020, 11: 2322.
- [8] TINKER-KULBERG R, DELLINGER A L, GENTIT L C, et al. Evaluation of indoor and outdoor aquaculture systems as alternatives to harvesting hemolymph from random wild capture of horseshoe crabs[J]. Front Mar Sci, 2020, 10(7): 568628.
- [9] TINKER-KULBERG R, DELLINGER A, BRADY T E. Effects of diet on the biochemical properties of limulus amebocyte lysate from horseshoe crabs in an aquaculture setting[J]. Front Mar Sci, 2020, 10(7): 541604.
- [10] JENNINGS S, MOLEN J V D. Trophic levels of marine consumers from nitrogen stable isotope analysis: estimation and uncertainty[J]. ICES J Mar Sci, 2015, 72(8): 2289-2300.
- [11] 李由明, 黄翔鸽, 刘楚吾. 碳氮稳定同位素技术在动物食性分析中的应用 [J]. 广东海洋大学学报, 2017, 27(4): 99-103.
- [12] 宁加佳, 杜飞雁, 李亚芳, 等. 红海湾远海梭子蟹 *Portunus pelagicus* 的食物组成及营养位置分析 [J]. 海洋学报, 2016, 38(10): 62-69.
- [13] RAW J L, PERISSINOTTO R, MIRANDA N A F, et al. Diet of *Melanoides tuberculata* (Müller, 1774) from subtropical coastal lakes: evidence from stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) analyses[J]. Limnologica, 2016, 59: 116-123.
- [14] 张文博, 黄洪辉, 李纯厚, 等. 华南典型海湾主要渔业生物碳氮稳定同位素研究 [J]. 南方水产科学, 2019, 15(5): 9-14.
- [15] PHILLIPS D L, INGER R, BEARHOP S, et al. Best practices for use of stable isotope mixing models in food-web studies[J]. Can J Zool, 2014, 92(10): 823-835.
- [16] 孙明, 王彬, 李玉龙, 等. 基于碳氮稳定同位素技术研究辽东湾海蜆的食性和营养级 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1103-1108.
- [17] NELSON B R, SATYANARAYANA B, ZHONG J M H, et al. Episodic human activities and seasonal impacts on the *Ta-*

- chrypleus gigas* (Müller, 1785) population at Tanjung Selangor in Peninsular Malaysia[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2015, 164: 313-323.
- [18] LANI M N, RIVAN N F M, ISMAIL A, et al. Comparative study of physico-chemical analyses of different water resources in Setiu Wetland, Terengganu[M]//ABDULLAH M T, MOHAMMAD A, ZALIPAH M N, et al. Greater Kenyir Landscapes. Cham: Springer, 2019: 25-37.
- [19] BURGER J, TSIPOURA N, NILES L, et al. Heavy metals in biota in Delaware Bay, NJ: developing a food web approach to contaminants[J]. Toxics, 2019, 7(2): 1-16.
- [20] WEST J B, BOWEN G J, CERLING T E, et al. Stable isotopes as one of nature's ecological recorders[J]. Trend Ecol Evol, 2006, 21(7): 408-414.
- [21] 洪水根. 中国鲎生物学研究 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011: 77-81.
- [22] 沙金庚. 中国双壳类古生物学的百年发展 [J]. 生物进化, 2019, 52(4): 24-38.
- [23] 鲍虞园, 叶国玲, 颀晓勇. 中国鲎人工繁育及 1 龄稚鲎形态性状对体质量的影响 [J]. 渔业科学进展, 2020, 41(4): 77-84.
- [24] 邹丽珍. 中国鲎幼鲎人工养殖饵料初步研究 [J]. 福建农业科技, 2016(9): 32-35.
- [25] ZHOU Y, LIANG Y, YAN Q, et al. The draft genome of horseshoe crab *Tachypleus tridentatus* reveals its evolutionary scenario and well-developed innate immunity[J]. BMC Genomics, 2020, 21(1): 1-38.
- [26] 蔡德陵, 张淑芳, 张经. 稳定碳、氮同位素在生态系统研究中的应用 [J]. 青岛海洋大学学报 (自然科学版), 2002, 32(2): 287-295.
- [27] 陈展彦, 武海涛, 王云彪, 等. 基于稳定同位素的湿地食物源判定和食物网构建研究进展 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2389-2398.
- [28] POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [29] 全秋梅, 肖雅元, 徐姗楠, 等. 胶州湾大型底栖动物群落结构季节变化及其与环境因子的关系 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4110-4120.
- [30] DUFFY R E, GODWIN I, PURVIS I, et al. The contribution of naturally occurring food items to the diet of *Bidyanus bidyanus* when fed differing formulated diets[J]. J Appl Aquacult, 2013, 25(3): 206-218.
- [31] HAYS G C, DOYLE T K, HOUGHTON J D R. A paradigm shift in the trophic importance of jellyfish[J]. Trend Ecol Evol, 2018, 33, 11: 874-884.
- [32] DALSGAARD J, ST. JOHN M, KATTNER G, et al. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment[J]. Adv Mar Biol, 2003, 46: 225-340.
- [33] CAMIN F, BONTEMPO L, PERINI M, et al. Stable isotope ratio analysis for assessing the authenticity of food of animal origin[J]. Comp Rev Food Sci Food Saf, 2016, 15(5): 868-877.