

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180912001

http://www.yykxjz.cn/

张博伦, 郭彪, 于莹, 徐晓甫, 王硕. 基于稳定同位素技术的天津大神堂海域人工鱼礁区食物网结构研究. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 25-35

Zhang BL, Guo B, Yu Y, Xu XF, Wang S. Study of the food-web structure in the Dashentang artificial reef area in Tianjin Using a stable isotope technique. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(6): 25-35

基于稳定同位素技术的天津大神堂海域人工鱼礁区食物网结构研究*

张博伦^{1,2} 郭彪^{1,2①} 于莹^{1,2} 徐晓甫^{1,2} 王硕^{1,2}

(1. 天津渤海水产研究所渔业资源与生态环境室 天津 300457;

2. 天津市海洋牧场技术工程中心 天津 300457)

摘要 本研究对2016年6月在天津大神堂3个礁区(2010年建成的鱼礁区; 2012年建成的鱼礁区; 2014年建成的鱼礁区)和对照区域采集的生物消费者及其食物源样品的碳、氮稳定同位素组成进行了分析, 通过IsoSource模型计算不同区域生物的食物网基础, 并利用氮稳定同位素数据计算消费者的营养级。结果显示, 根据 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以将其食物源分为浮游植物、悬浮颗粒有机物(POM)和沉积相颗粒有机物(SOM)三类; 浮游植物对消费者的碳源贡献率(67.2%~81.5%)最大, 是大神堂海域的生物食物网的基础。不同区域同一食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值没有显著性差异; 礁区内滤食性贝类毛蚶(*Arca subcrenata*)、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)和长牡蛎(*Crassostrea gigas*)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于对照区, 作为潜在碳源的浮游植物对其的贡献率显著增加。消费者的 $\delta^{15}\text{N}$ 值则介于7.70‰~14.34‰之间, 消费者的营养级介于2.0~3.95级之间。游泳生物食性生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 和营养级在礁区内有所提高, 礁区建成的年份越长, 其营养级与对照区域的差别越显著。稳定同位素研究表明, 人工鱼礁建设可能导致鱼礁区内滤食性生物的食物来源组成改变, 并提高游泳生物食性生物的营养级。

关键词 稳定同位素; 人工渔礁区; 食物网基础; 营养级

中图分类号 S931 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)06-0025-11

稳定同位素技术是揭示食物网中物质的循环路径和探究消费者、生产者间营养关系的一种重要方法(Tomasz *et al*, 2015; Serguei *et al*, 2014; Vinagre *et al*, 2012), 已经被广泛应用于水域生态系统食物网结构、营养关系及其动态变化的研究中(李忠义等,

2010; 魏虎进等, 2013; 麻秋云等, 2015; Serguei *et al*, 2014; Catarina *et al*, 2015)。与传统的胃含物分析法相比, 稳定同位素反映了生物体对食物的吸收并且是生物体长时期代谢的结果, 其不仅能表达生物体摄取的食物种类信息, 也表达了一段时间内生物体对食物

* 天津市水产局青年科技创新项目(J2016-10青)、天津市农业科技成果转化与推广项目(201304150)和天津市渔业发展服务中心青年科技创新项目(J2018-14青)共同资助[The work was supported by Projects of Youth Science and Technology Innovation of Tianjin Aquatic Products Bureau (J2016-10Qing), Tianjin Agricultural Science and Technology Achievement Transformation and Promotion Project(201304150), Projects of Youth Science and Technology Innovation of Tianjin Fishery Development Service Center (J2018-14Qing)]. 张博伦, E-mail: hello5521@163.com

① 通讯作者: 郭彪, 高级工程师, E-mail: oucguobiao@163.com

收稿日期: 2018-09-12, 收修改稿日期: 2018-10-19

的吸收信息(Kidd *et al.*, 1995); 因而突破了胃含物分析法研究生物摄食信息受时间和空间的限制(Kidd *et al.*, 1995; 万祎等, 2005)。氮稳定同位素沿食物链基本上是逐级递增(李忠义等, 2010; 谭鲁玉等, 2018), 所以氮稳定同位素用于计算生物的营养级, 其正确性也得到了广泛验证(李忠义等, 2010; 魏虎进等, 2013; 麻秋云等, 2015)。由于碳稳定同位素随营养层次的富集不明显, 其主要用于确定生物种的食物组成以及追踪生态系统中碳的来源(Fry, 1981; 李忠义等, 2005; 谢斌等, 2017)。

随着环渤海经济的快速发展、天津海岸带大规模的围填海工程建设、海洋捕捞业和矿产开采程度的增强, 天津市第一个国家级海洋特别保护区——天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区海洋生态系统受到的压力也逐年增加。为保护牡蛎礁区的生物资源和生态环境, 天津市在大神堂海域开展了一系列海洋生态修复措施, 人工鱼礁建设是其中重要的一项。在进行人工鱼礁建设过程中, 了解食物网的营养基础和结构非常重要。目前关于天津市大神堂海域人工鱼礁区的报道主要集中在生物群落结构和重金属分布方面

(郭彪等, 2015; 贾婷婷等, 2015; 戴媛媛等, 2016), 未见食物网方面的报道。

因此, 本研究利用稳定同位素技术对天津市大神堂海域人工鱼礁区食物网进行研究, 探讨主要生物种类的碳氮稳定同位素特征, 进而分析不同碳源对食物网的贡献和营养结构特征, 旨在为深入研究天津大神堂海域生物群落的营养结构以及食物网的物质循环和能量流动提供基础资料, 为从营养结构角度定量评价人工鱼礁的生态效果提供参考数据, 为开展海洋生态修复与保护研究提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 站位设置

2016年6月分别在2010年、2012年和2014年建成的人工鱼礁区各设置3个采样占位, 另外礁区外围设置3个采样占位作为对照(图1)。在上述12个点位进行浮游动植物、悬浮颗粒有机物(POM)、沉积相颗粒有机物(SOM)、底栖生物和游泳动物样品采集。

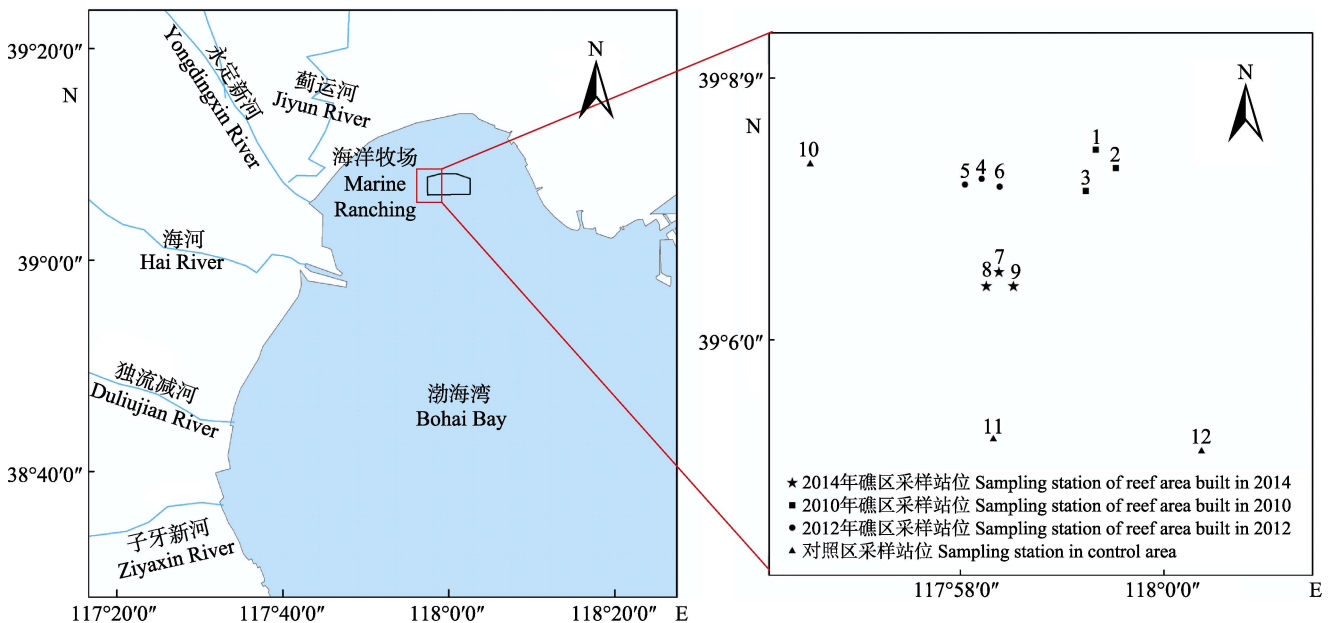


图1 采样占位设置

Fig.1 Location of sampling stations

1.2 样品采集与处理

浮游植物使用浅水Ⅲ型浮游生物网进行从水底至水表垂直拖网采样; 浮游动物采用浅水Ⅰ型浮游生物网, 从水底至水表垂直拖网采样; 使用箱式采泥器采集 SOM 样品; 利用箱式采泥器收集底栖大型无脊椎动物; 游泳生物样品利用底拖网和地笼进行采集。

在实验室内, 浮游植物样品用 $160\ \mu\text{m}$ 的筛绢进行过滤, 除去浮游动物和碎屑等, 经筛绢过滤后的浮游植物样品过滤到预先经马弗炉 $500\ ^\circ\text{C}$ 灼烧 $5\ \text{h}$ 的 Whatman GF/F 膜上。底栖大型无脊椎生物和浮游动物置于预先经 $0.22\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤的海水中暂养 $2\sim 4\ \text{h}$, 等排空胃含物后取样。采集表层水 $2\ \text{dm}^3$, 过 $170\ \mu\text{m}$

的筛绢后过滤到预先经马弗炉 500℃灼烧 5 h 的 GF/F 膜上收集 POM 样品。沉积物样品经过 63 μm 的筛绢分筛, 所获得的颗粒物即为 SOM 样品。鱼类取适量背部白肌, 虾取腹部肌肉, 贝类取闭壳肌, 蟹取其螯肢肌肉用于稳定同位素分析, 所有样品使用冷冻干燥机于-50℃冻干; 然后置于洁净的干燥器中用 12 mol/dm³ 的盐酸(HCl)熏 48 h, 经石英研钵充分研磨后使用稳定同位素比值分析仪进行同位素分析。

1.3 稳定性同位素分析

实验样品的稳定同位素分析在天津国际医药联合研究院进行, 运用英国 GV 公司的 IsoPrime 稳定同位素质谱仪测定样品的碳、氮稳定同位素比值。

碳、氮稳定同位素比值用国际通用的 δ 值表示, 分别以 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) 国际标准和大气氮作为参考标准。δ¹³C、δ¹⁵N 分别按以下公式算出:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left(\frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{sample}}}{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{VPDB}}} - 1 \right) \times 1000$$

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \left(\frac{{}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{sample}}}{{}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{air}}} - 1 \right) \times 1000$$

式中, ¹³C/¹²C_{VPDB} 为国际标准物 VPDB 的碳同位素比值, ¹⁵N/¹⁴N_{air} 为标准大气氮同位素比值。为保持实验结果的准确性和仪器的稳定性, 每测 5 个样品后加测 1 个标准样, 个别样品则进行 2~3 次复测。

1.4 数据处理

利用 IsoSource 模型来计算各个食源对消费者的贡献率(Schwarcz, 1991), 其原理是根据质量守恒原理: 1 种同位素及 2 种食物来源的能量守恒方程为:

$$\delta J_M = f_A \delta J_A + f_B \delta J_B$$

$$1 = f_A + f_B$$

式中, J_M 为消费者 M 的 1 种同位素 J 的比值; A、B 为食物源; f 为食物对消费者的贡献率。

利用 2 种稳定同位素可对 3 种及 3 种以上食物的贡献比例进行计算:

$$\delta J_M = f_A \delta J_A + f_B \delta J_B + f_C \delta J_C$$

$$\delta K_M = f_A \delta K_A + f_B \delta K_B + f_C \delta K_C$$

$$1 = f_A + f_B + f_C$$

式中, J_M 、 K_M 为消费者 M 的 2 种同位素 J 、 K 的比值; A、B、C 为食物源; f 为食物对消费者的贡献率。本研究利用 Phillips 等(2003)利用质量守恒原理反复叠加编写的 IsoSource 模型来计算各食源对消费者的贡献率。

通过氮稳定同位素比值测定, 分析天津海域非鱼礁区海洋生物营养级。其计算公式如下:

$$\text{TL} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{SC}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{blv}} + \lambda}{\text{TEF}}$$

式中, λ 为基准生物的营养级; TEF 为 1 个营养级的氮富集度; $\delta^{15}\text{N}_{\text{blv}}$ 为基准生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 比值, 本研究计划选用浮游动物整体的氮稳定同位素平均值作为基准值(Baseline value); $\lambda=2$ (魏虎进等, 2013); TEF 为 1 个营养级的氮富集度, 平均值为 3.4‰ (Minagawa *et al.*, 1984); $\delta^{15}\text{N}_{\text{SC}}$ 为所测海洋生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 比值。

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析, 采用单因素(One-way ANOVA)进行方差分析或 T 检验, 利用 Excel 2010 和 Grapher 5.0 软件作图。图表中数据为平均值±标准差(Mean±SD)。

2 结果与分析

2.1 不同海域消费者潜在食源的 δ¹³C、δ¹⁵N 值

天津市大神堂海洋牧场不同年份礁区及对照区域潜在食源碳、氮同位素比值如表 1 和表 2 所示。经单因素方差检验, 同一食源的 δ¹³C、δ¹⁵N 值在不同区域之间没有显著性差异, 不同食源之间的碳、氮稳定同位素比值存在显著差异($P<0.05$)。

表 1 消费者潜在碳源的 δ¹³C 值(‰)
Tab.1 Values of δ¹³C for the potential carbon sources (‰)

| 种类 Category | 沉积质 SOM | 悬浮颗粒有机物 POM | 浮游植物 Phytoplankton |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2010 年礁区 The reef area built in 2010 | -22.74±0.36 ^a | -23.47±0.40 ^b | -18.04±0.32 ^c |
| 2012 年礁区 The reef area built in 2012 | -22.48±0.53 ^a | -23.48±0.48 ^b | -18.05±0.11 ^c |
| 2014 年礁区 The reef area built in 2014 | -22.35±0.35 ^a | -23.61±0.54 ^b | -18.08±0.16 ^c |
| 对照区 The control area | -22.59±0.35 ^a | -23.39±0.37 ^b | -18.03±0.34 ^c |
| 均值 The average value | -22.54±0.37 ^a | -23.49±0.39 ^b | -18.05±0.22 ^c |

注: 同行不同字母表示 3 种潜在碳源之间的 δ¹³C 值差异显著($P<0.05$), 下同

Note: Different letters in each row meant significant difference among the δ¹³C values of three potential carbon sources at 0.05 level. The same as below

表2 消费者潜在氮源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(‰)

Tab.2 Values of $\delta^{15}\text{N}$ for the potential nitrogen sources (‰)

| 种类 Category | 沉积质 SOM | 悬浮颗粒有机物 POM | 浮游植物 Phytoplankton |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 2010年礁区 The reef area built in 2010 | 6.48±0.20 ^a | 3.46±0.50 ^b | 5.59±0.16 ^c |
| 2012年礁区 The reef area built in 2012 | 6.49±0.36 ^a | 3.63±0.25 ^b | 5.52±0.17 ^c |
| 2014年礁区 The reef area built in 2014 | 6.55±0.06 ^a | 3.65±0.12 ^b | 5.59±0.11 ^c |
| 对照区 The control area | 6.35±0.27 ^a | 3.61±0.22 ^b | 5.58±0.23 ^c |
| 均值 The average value | 6.47±0.23 ^a | 3.59±0.17 ^b | 5.57±0.15 ^c |

2.2 不同海域消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值

天津市大神堂海洋牧场不同年份鱼礁区及对照区域消费者碳、氮同位素比值如图2所示。对照区域

消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布从菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)的-18.53‰到中国花鲈(*Lateolabrax maculatus*)的-17.27‰; $\delta^{15}\text{N}$ 值分布从浮游动物的 7.73‰

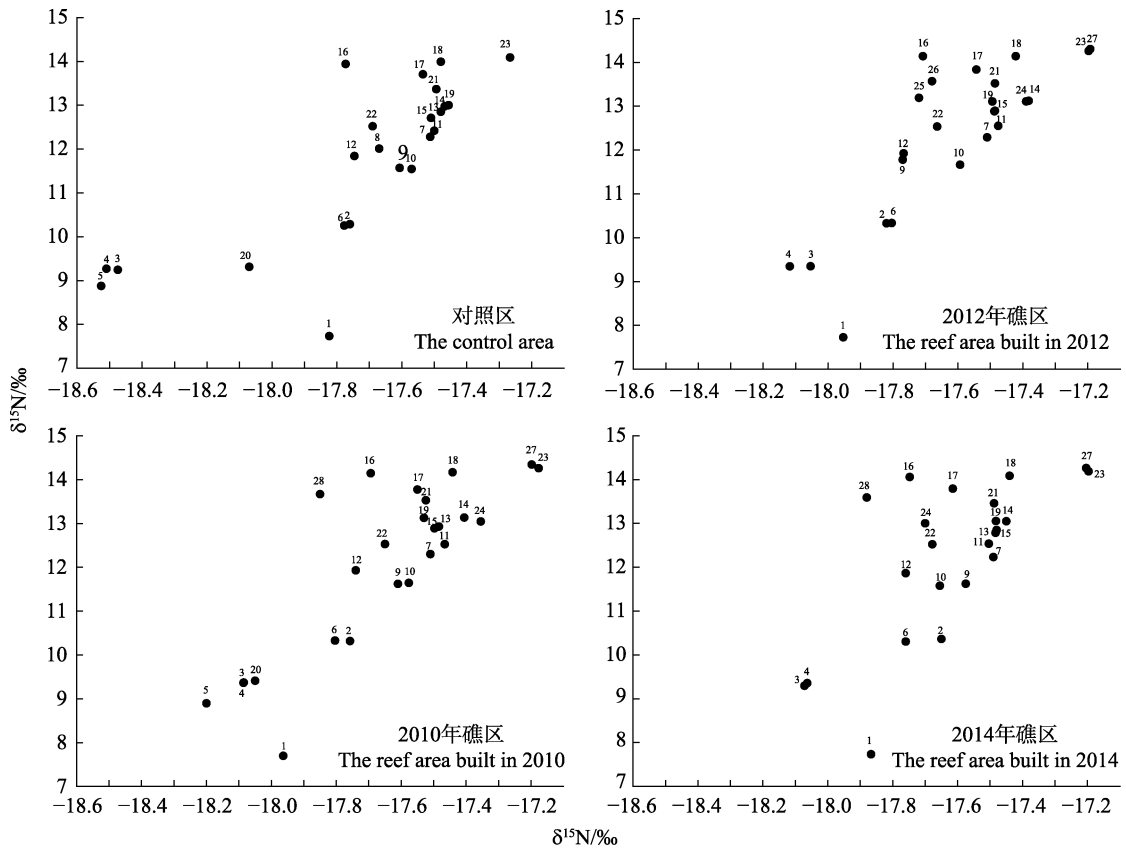


图2 不同海域消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值
Fig.2 Values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of different species from different areas

- 1: 浮游动物; 2: 扁玉螺; 3: 毛蚶; 4: 菲律宾蛤仔; 5: 长牡蛎; 6: 脉红螺; 7: 葛氏长臂虾; 8: 海蜚虾; 9: 日本鼓虾; 10: 鲜明鼓虾; 11: 口虾蛄; 12: 中国明对虾; 13: 火枪乌贼; 14: 隆线强蟹; 15: 日本关公蟹; 16: 日本蛄; 17: 三疣梭子蟹; 18: 斑尾刺鰕虎鱼; 19: 六丝钝尾鰕虎鱼; 20: 鲛; 21: 短吻红舌鰕; 22: 斑鲆; 23: 中国花鲈; 24: 长蛸; 25: 拉氏狼牙鰕虎鱼; 26: 尖嘴扁颌针鱼; 27: 许氏平鲉; 28: 钟馗鰕虎鱼
- 1: Phytoplankton; 2: *Glossaulax didyma*; 3: *A. subcrenata*; 4: *R. philippinarum*; 5: *C. gigas*; 6: *Rapana venosa*; 7: *Palaemon gravieri*; 8: *Latreutes anoplonyx*; 9: *Alpheus japonicus*; 10: *Alpheus distinguendus*; 11: *Squilla orarotia*; 12: *Fenneropenaeus chinensis*; 13: *Loligo beka*; 14: *Eucrater crenata*; 15: *Dorippe japonica*; 16: *Charybdis japonica*; 17: *Portunus trituberculatus*; 18: *Synechogobius ommaturus*; 19: *Amblychaeturichthys hexanema*; 20: *Liza haematocheila*; 21: *Cynoglossus joyneri*; 22: *Konosirus punctatus*; 23: *L. maculatus*; 24: *Octopus variabilis*; 25: *Odontamblyopus lacepedii*; 26: *Ablennes anastomella*; 27: *S. schlegeli*; 28: *T. barbatus*

到中国花鲈的 14.12‰。2010 年礁区海域消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布从长牡蛎(*Crassostrea gigas*)的-18.20‰到中国花鲈的-17.18‰; $\delta^{15}\text{N}$ 值分布从浮游动物的 7.70‰到许氏平鲈(*Sebastes fuscescens*)的 14.34‰。2012 年礁区海域消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布从菲律宾蛤仔的-18.12‰到许氏平鲈的-17.19‰; $\delta^{15}\text{N}$ 值分布从浮游动物的 7.73‰到许氏平鲈的 14.30‰。2014 年礁区海域消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布从毛蚶(*Arca subcrenata*)的-18.07‰到中国花鲈的-17.20‰; $\delta^{15}\text{N}$ 值分布从浮游动物的 7.73‰到许氏平鲈的 14.26‰。

除海蜆虾 (*Latreutes anoplonyx*)、鮫 (*Liza haematocheila*)、拉氏狼牙鰕虎鱼 (*Odontamblyopus lacepedii*)、钟馗鰕虎鱼 (*Tridentiger barbatus*)和尖嘴扁

颌针鱼(*Ablennes anastomella*)因样本量较少无法进行统计分析外,对不同海域同一消费者的碳、氮同位素比值分别进行单因素方差分析或 *T* 检验。对照区域毛蚶和菲律宾蛤仔的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于礁区海域($P<0.05$);长牡蛎在 2012 年和 2014 年礁区未捕获,经 *T* 检验,对照区域长牡蛎的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于 2010 年礁区海域;其他渔获种类经统计分析, $\delta^{13}\text{C}$ 值未发现显著性差异(表 3)。大部分渔获种类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值未发现统计学差异,但对照海域口虾蛄(*Squilla orarotia*)、隆线强蟹(*Eucrate crenata*)、日本关公蟹(*D. japonica*)、日本蛄(*C. japonica*)、斑尾刺鰕虎鱼(*Synechogobius ommaturus*)、短吻红舌鰕(*Cynoglossus joyneri*)和中国花鲈的 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著低于部分年份礁区或全部年份礁区($P<0.05$) (表 4)。

表 3 不同海域统计学 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在差异的物种(‰)¹
Tab.3 Species with different values of $\delta^{13}\text{C}$ from different areas (‰)¹

| 物种 Species | 对照区 The control area | 2010 年礁区 The reef area built in 2010 | 2012 年礁区 The reef area built in 2012 | 2014 年礁区 The reef area built in 2014 | 单因素方差 分析结果 ANOVA result |
|-------------------------------------|--------------------------|---|---|---|------------------------------------|
| 毛蚶 <i>A. subcrenata</i> | -18.48±0.09 ^a | -18.09±0.10 ^b | -18.06±0.13 ^b | -18.07±0.18 ^b | $F_{3,15} = 9.551$ $P = 0.001$ |
| 菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i> | -18.51±0.09 ^a | -18.09±0.11 ^b | -18.12±0.11 ^b | -18.06±0.10 ^b | $F_{3,12} = 16.432$ $P = 0.000$ |
| 长牡蛎 ² <i>C. gigas</i> | -18.53±0.10 ^a | -18.20±0.01 ^b | | | $F = 2.131$ $P = 0.007$ |

注: 1: 同行不同字母表示该物种在不同海域的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在差异显著($P<0.05$); 2: 长牡蛎的数据不满足单因素方差分析条件, 故进行 *T* 检验

Note: 1: Different letters in each row meant significant difference among the $\delta^{13}\text{C}$ values of the same species from different areas at 0.05 level; 2: Due to the values of *C. gigas* does not meet the condition of ANOVA analyze, *T*-test was performed

表 4 不同海域统计学 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在差异的物种(‰)
Tab.4 Species with different in values of $\delta^{15}\text{N}$ from different areas (‰)

| 物种 Species | 对照区 The control area | 2010 年礁区 The reef area built in 2010 | 2012 年礁区 The reef area built in 2012 | 2014 年礁区 The reef area built in 2014 | 单因素方差 分析结果 ANOVA result |
|-------------------------------|-------------------------|---|---|---|-----------------------------------|
| 口虾蛄 <i>S. orarotia</i> | 12.42±0.09 ^a | 12.53±0.08 ^b | 12.55±0.07 ^b | 12.54±0.05 ^b | $F_{3,16} = 3.529$ $P = 0.039$ |
| 隆线强蟹 <i>E. crenata</i> | 12.97±0.06 ^a | 13.13±0.13 ^b | 13.12±0.10 ^b | 13.05±0.05 ^{ab} | $F_{3,16} = 2.914$ $P = 0.066$ |
| 日本关公蟹 <i>D. japonica</i> | 12.71±0.08 ^a | 12.89±0.10 ^b | 12.89±0.04 ^b | 12.78±0.06 ^{ab} | $F_{3,10} = 2.564$ $P = 0.113$ |
| 日本蛄 <i>C. japonica</i> | 13.94±0.06 ^a | 14.15±0.05 ^b | 14.14±0.08 ^b | 14.06±0.10 ^{ab} | $F_{3,13} = 6.004$ $P = 0.009$ |
| 斑尾刺鰕虎鱼 <i>S. ommaturus</i> | 13.99±0.13 ^a | 14.17±0.09 ^b | 14.14±0.11 ^{ab} | 14.10±0.12 ^{ab} | $F_{3,16} = 2.344$ $P = 0.112$ |
| 短吻红舌鰕 <i>C. joyneri</i> | 13.37±0.07 ^a | 13.53±0.06 ^b | 13.52±0.04 ^b | 13.46±0.06 ^b | $F_{3,16} = 8.007$ $P = 0.002$ |
| 中国花鲈 <i>L. maculatus</i> | 14.09±0.04 ^a | 14.26±0.06 ^b | 14.26±0.12 ^b | 14.19±0.05 ^{ab} | $F_{3,16} = 3.406$ $P = 0.067$ |

2.3 潜在碳源对不同海域消费者的贡献率

近岸水域生态系统结构中消费者的碳源主要来源于浮游植物、底栖微藻、沉积相有机物、悬浮颗粒有机物、大型海藻、海草等。考虑到天津大神堂海域大型海藻和海草缺失,本研究在计算潜在碳源对消费者的贡献率时,只考虑浮游植物、SOM 和 POM。如表 5 所示,无论是在对照海域还是不同年份人工鱼礁区域,浮游植物占海区消费者的碳源比例最大,其数值范围为 67.2%(对照区的菲律宾蛤仔)~81.5%[(2014 年礁区的扁玉螺(*Gossaulax. didyma*)] ; SOM 和 POM 占

海区消费者碳源的比例相近。

潜在碳源对不同海域大多数消费者的贡献率基本相似,但一些滤食性贝类(毛蚶、菲律宾蛤仔和长牡蛎)在不同海域有所差别。在对照区,浮游植物、SOM 和 POM 对菲律宾蛤仔的碳源贡献率分别是 67.2%、17.7%和 15.1%;在不同年份的礁区,浮游植物、SOM 和 POM 对菲律宾蛤仔的碳源贡献率相似,2010 年礁区分别为 75.2%、14.8%和 10.0%,2012 年礁区分别为 75.0%、13.3%和 11.7%,2014 年礁区分别为 75.9%、13.7%和 10.4%。浮游植物对礁区内菲

表 5 基于 IsoSource 混合模型计算出的潜在碳源对消费者的贡献率(%)

Tab.5 Results of the IsoSource model for consumers mean contributions of primary producers to consumer nutrition (%)

| 物种 Species | 对照区 The control area | | | 2010 年礁区 The reef area built in 2010 | | | 2012 年礁区 The reef area built in 2012 | | | 2014 年礁区 The reef area built in 2014 | | |
|---------------------------------|-------------------------|------|------|---|------|------|---|------|------|---|------|------|
| | Phyto-plankton | SOM | POM | Phyto-plankton | SOM | POM | Phyto-plankton | SOM | POM | Phyto-plankton | SOM | POM |
| 扁玉螺 <i>G. didyma</i> | 79.7 | 10.7 | 9.7 | 79.5 | 11.0 | 9.5 | 78.1 | 12.6 | 9.3 | 81.5 | 10.8 | 7.8 |
| 毛蚶 <i>A. subcrenata</i> | 68.1 | 16.7 | 15.2 | 75.2 | 14.8 | 10.0 | 76.0 | 14.3 | 9.7 | 75.9 | 13.7 | 10.4 |
| 菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i> | 67.2 | 17.7 | 15.1 | 75.2 | 14.8 | 10.0 | 75.0 | 13.3 | 11.7 | 75.9 | 13.7 | 10.4 |
| 长牡蛎 <i>C. gigas</i> | 68.1 | 16.7 | 15.2 | 74.3 | 15.0 | 10.7 | / | / | / | / | / | / |
| 脉红螺 <i>R. venosa</i> | 79.5 | 10.3 | 10.2 | 78.5 | 11.8 | 9.7 | 78.5 | 12.0 | 9.5 | 79.5 | 11.3 | 9.2 |
| 葛氏长臂虾 <i>P. gravieri</i> | 79.0 | 11.5 | 9.5 | 78.8 | 12.2 | 9.0 | 79.2 | 10.3 | 10.4 | 79.5 | 11.8 | 8.7 |
| 海蜇虾 <i>L. anoplonyx</i> | 76.4 | 13.4 | 10.1 | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| 日本鼓虾 <i>A. japonicus</i> | 79.2 | 10.6 | 10.2 | 78.8 | 11.8 | 9.4 | 74.8 | 15.6 | 9.5 | 79.5 | 11.8 | 8.7 |
| 鲜明鼓虾 <i>A. distinguendus</i> | 79.8 | 11.8 | 8.4 | 79.5 | 10.8 | 9.7 | 79.2 | 10.8 | 10.0 | 78.2 | 11.4 | 10.5 |
| 口虾蛄 <i>S. orarotia</i> | 78.8 | 12.2 | 9.0 | 79.2 | 11.0 | 9.8 | 78.8 | 12.7 | 8.6 | 78.5 | 11.5 | 10.0 |
| 中国明对虾 <i>F. chinensis</i> | 75.4 | 14.2 | 10.5 | 75.0 | 15.1 | 9.9 | 75.1 | 12.3 | 12.6 | 75.2 | 13.4 | 11.5 |
| 长蛸 <i>O. variabilis</i> | / | / | / | 80.0 | 10.9 | 9.1 | 79.1 | 11.6 | 9.3 | 73.0 | 15.7 | 11.3 |
| 火枪乌贼 <i>L. beka</i> | 78.0 | 12.3 | 9.7 | 77.5 | 13.3 | 9.2 | 77.8 | 12.2 | 10.0 | 78.0 | 12.3 | 9.7 |
| 隆线强蟹 <i>E. crenata</i> | 78.0 | 11.9 | 10.1 | 78.5 | 12.8 | 8.7 | 79.4 | 10.4 | 10.1 | 78.2 | 11.3 | 10.4 |
| 日本关公蟹 <i>D. japonica</i> | 77.7 | 13.0 | 9.3 | 77.3 | 13.3 | 9.3 | 77.8 | 12.4 | 9.8 | 78.2 | 11.8 | 10.0 |
| 日本蟳 <i>C. japonica</i> | 69.2 | 15.8 | 14.9 | 70.0 | 16.3 | 13.7 | 69.7 | 17.2 | 13.2 | 69.7 | 14.2 | 16.2 |
| 三疣梭子蟹 <i>P. trituberculatus</i> | 74.5 | 14.4 | 11.2 | 74.0 | 14.0 | 12.0 | 73.9 | 14.7 | 11.4 | 72.7 | 14.6 | 12.6 |
| 拉氏狼牙虾虎鱼 <i>O. lacepedii</i> | / | / | / | / | / | / | 76.1 | 16.2 | 11.7 | / | / | / |
| 钟馗鰕虎鱼 <i>T. barbatus</i> | / | / | / | 68.1 | 17.4 | 14.4 | / | / | / | 67.9 | 17.6 | 14.6 |
| 斑尾刺鰕虎鱼 <i>S. ommaturus</i> | 75.0 | 12.9 | 12.1 | 75.0 | 13.9 | 11.1 | 75.8 | 12.4 | 11.8 | 75.2 | 14.6 | 10.2 |
| 六丝钝尾鰕虎鱼 <i>A. hexanema</i> | 78.3 | 11.0 | 10.7 | 76.0 | 14.1 | 9.9 | 77.0 | 12.9 | 10.1 | 77.5 | 12.0 | 10.5 |
| 鲛 <i>L. haematocheila</i> | 76.0 | 13.1 | 10.9 | 76.2 | 12.4 | 11.5 | / | / | / | / | / | / |
| 短吻红舌鰕 <i>C. joyneri</i> | 76.2 | 13.6 | 10.2 | 74.8 | 15.6 | 9.5 | 76.2 | 12.4 | 11.5 | 76.0 | 14.1 | 9.9 |
| 斑鱗 <i>K. punctatus</i> | 74.9 | 12.7 | 12.4 | 75.2 | 14.6 | 10.2 | 75.1 | 14.3 | 10.6 | 75.2 | 12.4 | 12.5 |
| 尖嘴扁颌针鱼 <i>A. anastomella</i> | / | / | / | / | / | / | 72.0 | 15.1 | 12.9 | / | / | / |
| 中国花鲈 <i>L. maculatus</i> | 78.6 | 12.9 | 8.5 | 80.5 | 9.0 | 10.5 | 79.5 | 13.0 | 7.5 | 79.9 | 11.9 | 8.2 |
| 许氏平鲈 <i>S. schlegeli</i> | / | / | / | 79.5 | 11.3 | 9.2 | 79.6 | 12.6 | 7.9 | 79.5 | 12.3 | 8.3 |

律宾蛤仔的碳源贡献率约是其在对照区的 1.12 倍, 而 SOM 和 POM 的贡献率相应下降。毛蚶和长牡蛎在不同海域具有相似性规律。

2.4 消费者的营养级

经计算, 天津大神堂海域对照区、2010 年礁区、2012 年礁区和 2014 年礁区主要消费者生物种类的营养级范围分别在 2.00~3.87、2.00~3.95、2.00~3.93 和 2.00~3.92; 4 个不同区域的营养层次均为三级(图 3)。

不同区域主要消费者生物种类的营养层次相对位置类似, 除头足类外, 其他软体动物的营养级均低于 3。鱼类中, 除鲮的营养级低于 3 外, 其他鱼类的营

养级在 3.41~3.95 之间, 营养级最高的为许氏平鲈。头足类和虾蟹类均属于第 III 营养层次(3-4), 头足类、虾类和蟹类营养级最高分别为长蛸、口虾姑和日本蟳(图 3)。

除海蜇虾、鲮、拉氏狼牙鰕虎鱼、钟馗鰕虎鱼和尖嘴扁颌针鱼因样本量较少无法进行统计分析外, 对不同海域同一消费者的营养级分别进行单因素方差分析或 *T* 检验。对照区域口虾姑、隆线强蟹、日本关公蟹、日本蟳、斑尾刺鰕虎鱼、六丝钝尾鰕虎鱼、短吻红舌鲷和中国花鲈的营养级显著低于部分年份礁区或全部年份礁区($P < 0.05$)。仅短吻红舌鲷和许氏平鲈的营养级在不同年份礁区出现了差异, 2010 年礁区显著高于 2014 礁区($P < 0.05$) (表 6)。

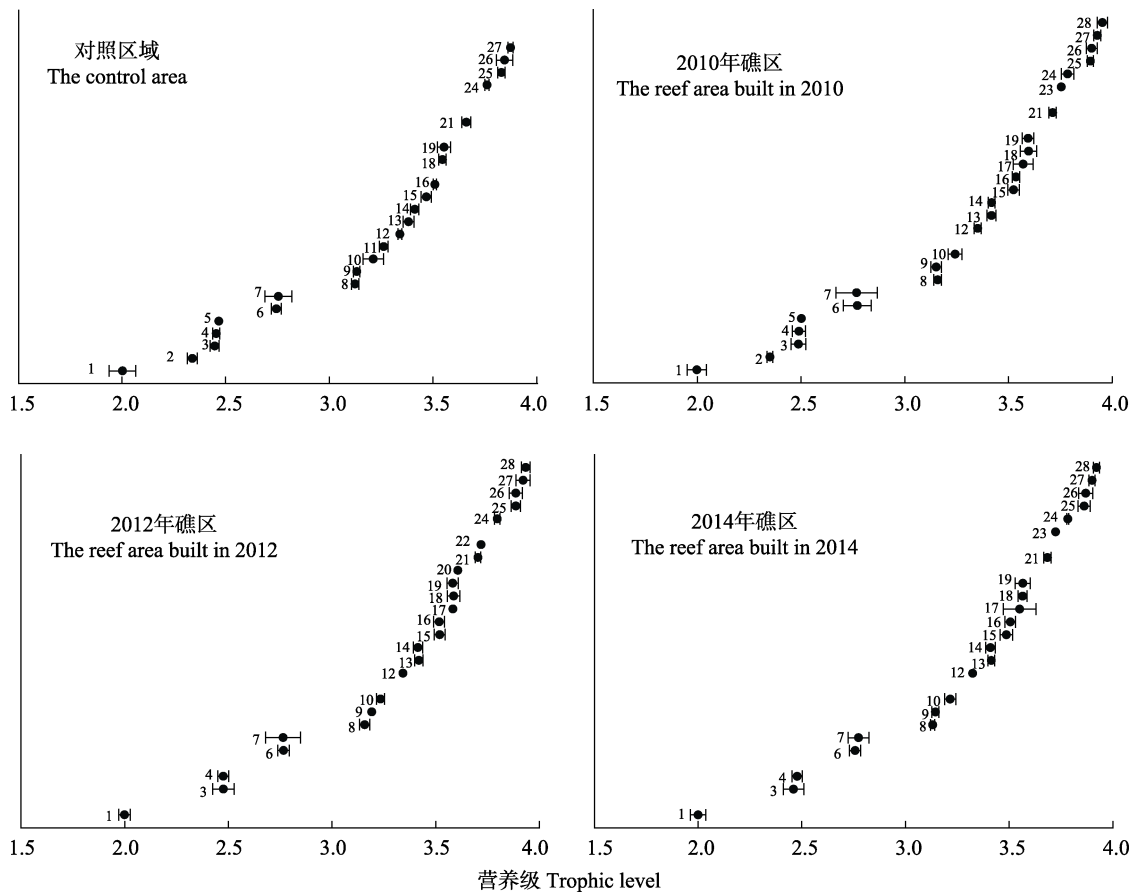


图 3 不同海域消费者营养级的分布
Fig.3 Trophic level of all consumers form different areas

- 1: 浮游动物; 2: 长牡蛎; 3: 毛蚶; 4: 菲律宾蛤仔; 5: 鲮; 6: 脉红螺; 7: 扁玉螺; 8: 鲜明鼓虾; 9: 日本鼓虾;
10: 中国明对虾; 11: 海蜇虾; 12: 葛氏长臂虾; 13: 口虾姑; 14: 斑螯; 15: 日本关公蟹; 16: 火枪乌贼; 17: 长蛸;
18: 隆线强蟹; 19: 六丝钝尾鰕虎鱼; 20: 拉氏狼牙鰕虎鱼; 21: 短吻红舌鲷; 22: 尖嘴扁颌针鱼; 23: 钟馗鰕虎鱼;
24: 三疣梭子蟹; 25: 日本蟳; 26: 斑尾刺鰕虎鱼; 27: 中国花鲈; 28: 许氏平鲈
- 1: Phytoplankton; 2: *C. gigas*; 3: *A. subcrenata*; 4: *R. philippinarum*; 5: *L. haematocheila*; 6: *R. venosa*; 7: *G. didyma*;
8: *A. distinguendus*; 9: *A. japonicus*; 10: *F. chinensis*; 11: *L. anoplonyx*; 12: *P. gravieri*; 13: *S. orarotia*; 14: *K. punctatus*;
15: *D. japonica*; 16: *L. beka*; 17: *O. variabilis*; 18: *E. crenata*; 19: *A. hexanema*; 20: *O. lacepedii*; 21: *C. joyneri*; 22: *A. anastomella*;
23: *Tridentiger barbatus*; 24: *P. trituberculatus*; 25: *C. japonica*; 26: *S. ommaturus*; 27: *L. mac ulates*; 28: *S. schlegeli*

表6 不同海域统计学营养级存在差异的物种(%)
Tab.6 Species with differences in trophic level from different area (%)

| 物种 Species | 对照区 The control area | 2010年礁区 The reef area built in 2010 | 2012年礁区 The reef area built in 2012 | 2014年礁区 The reef area built in 2014 | 单因素方差 分析结果 ANOVA result |
|-------------------------------|-------------------------|--|--|--|--------------------------------|
| 口虾蛄 <i>S. orarotia</i> | 3.38±0.03 ^a | 3.42±0.02 ^b | 3.42±0.02 ^b | 3.41±0.02 ^b | $F_{3,16}=4.034$ $P=0.026$ |
| 隆线强蟹 <i>E. crenata</i> | 3.54±0.02 ^a | 3.60±0.04 ^b | 3.59±0.03 ^b | 3.56±0.02 ^{ab} | $F_{3,16}=3.540$ $P=0.039$ |
| 日本关公蟹 <i>D. japonica</i> | 3.47±0.02 ^a | 3.53±0.03 ^b | 3.52±0.03 ^b | 3.49±0.03 ^{ab} | $F_{3,10}=3.130$ $P=0.074$ |
| 日本蟳 <i>C. japonica</i> | 3.83±0.02 ^a | 3.90±0.02 ^b | 3.89±0.02 ^b | 3.86±0.03 ^b | $F_{3,13}=7.006$ $P=0.005$ |
| 斑尾刺鰓虎鱼 <i>S. ommaturus</i> | 3.84±0.04 ^a | 3.90±0.03 ^b | 3.89±0.03 ^{ab} | 3.87±0.03 ^{ab} | $F_{3,16}=3.007$ $P=0.061$ |
| 六丝钝尾鰓虎鱼 <i>A. hexanema</i> | 3.55±0.03 ^a | 3.60±0.03 ^b | 3.58±0.03 ^{ab} | 3.57±0.04 ^{ab} | $F_{3,16}=2.270$ $P=0.120$ |
| 短吻红舌蟳 <i>C. joyneri</i> | 3.66±0.02 ^a | 3.71±0.02 ^b | 3.70±0.01 ^{bc} | 3.68±0.02 ^c | $F_{3,16}=10.766$ $P=0.000$ |
| 中国花鲈 <i>L. maculatus</i> | 3.87±0.01 ^a | 3.93±0.02 ^b | 3.92±0.02 ^b | 3.90±0.01 ^b | $F_{3,9}=4.227$ $P=0.040$ |
| 许氏平鲉 <i>S. schlegeli</i> | / | 3.95±0.03 ^a | 3.93±0.02 ^{ab} | 3.92±0.01 ^b | $F_{2,11}=3.396$ $P=0.071$ |

注：同行不同字母表示该物种在不同海域的营养级存在差异显著($P<0.05$)

Note: Different letters in each row meant significant difference among the trophic levels of the same species from different areas at 0.05 level

3 讨论

驱动整个近岸水域生态系统运转的能量主要来源于初级生产者所提供的碳源, 主要由 POM、SOM、浮游植物和大型海藻组成(魏虎进等, 2013; 蔡德陵等, 2005)。天津海域大型海藻缺失, 因此其碳源主要为 POM、SOM 和浮游植物。由于不同海区中 POM 和 SOM 的潜在源不同, 其稳定同位素值可能有所差异。浮游植物的碳稳定同位素组成主要来自海洋水体中的溶解无机碳(DIC), $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -22‰ ~ -18‰ , 并且存在着与温度和纬度的差异(吴莹等, 2002; 郭卫东等, 2001); 典型的海源有机质(主要指浮游植物)的 $\delta^{15}\text{N}$ 值介于 3‰ ~ 12‰ 之间(Maksymowska *et al*, 2002)。本研究中 POM、SOM 和浮游植物碳、氮稳定同位素值均符合上述研究中的数值范围, 但与万祎等(2005)研究结果相比, 数值偏高, 这可能与采样时间不同有关(谢斌等, 2017; 吴莹等, 2002)。本研究中, POM、SOM 和浮游植物碳、氮稳定同位素值在 4 个不同海域没有显著性差异。大神堂海域人工鱼礁区与对照区相比, 浮游植物丰度明显增加, 但种类组成变化不大(戴媛媛等, 2018); 这佐证本研究中食物源的碳、氮稳

定同位素值在礁区和非礁区没有显著性差异的结论。

毛蚶、菲律宾蛤仔和长牡蛎 3 种滤食性贝类, 其主要食物为有机碎屑和浮游植物, 虽然大神堂海域人工鱼礁区与对照区相比, 浮游植物的种类组成变化不大, 但浮游植物的丰度增加(戴媛媛等, 2018)。因此, 礁区中这 3 种滤食性贝类其摄食的食物组成中, 浮游植物量可能会相应增加。基于 IsoSource 模型计算的潜在碳源对消费者贡献率结果显示, 浮游植物对礁区中毛蚶、菲律宾蛤仔和长牡蛎的贡献率显著高于对照区域。3 种潜在碳源中, 浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 因而本研究中礁区内的毛蚶、菲律宾蛤仔和长牡蛎的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于对照区域。这说明人工鱼礁的投放会导致滤食性贝类的食物组成发生变化, 进而提高浮游植物对其的贡献率。

本研究中所有海域, 消费者 $\delta^{15}\text{N}$ 值则介于 7.70‰ ~ 14.34‰ 之间, 消费者的营养级介于 2.0~3.95 级之间。与大多数学者研究的结果相似(李忠义等, 2010; 魏虎进等, 2013; 麻秋云等, 2015; 万祎等, 2005; 谢斌等, 2017), 不同食性的消费者处于食物网中不同的地位, 浮游生物食性的消费者(如毛蚶、菲律宾蛤仔、长牡蛎和鲰)位于食物网的底端, 游泳生物食性的消

费者(如日本蟳、斑尾刺鰕虎鱼、中国花鲈和许氏平鲉)处于食物链的上层。

许多研究表明, 投放人工鱼礁可使大量生物聚集在鱼礁区, 起到聚集、养护和增殖渔业资源的效果, 增加了礁区生物的丰度(Fabi *et al.*, 2002; 汪振华等, 2010)。这就增加了游泳生物食性、性情凶猛鱼类或甲壳类, 特别是中国花鲈、斑尾刺鰕虎鱼、日本蟳等生物在人工鱼礁区捕食营养级相对较高的被捕食者的机率; 而在非人工鱼礁区, 该机率则相对较低。由于氮稳定同位素沿食物链基本上是逐级递增(李忠义等, 2010), 故本研究中对照区口虾蛄、隆线强蟹、日本关公蟹、日本蟳、斑尾刺鰕虎鱼、短吻红舌鲷和中国花鲈的 $\delta^{15}\text{N}$ 值和营养级显著低于其在部分年份礁区或全部年份礁区的数值。

人工鱼礁的生态效益是在建成后逐步显现的(郭彪等, 2015; 吴忠鑫等, 2012), 礁区生物营养级显著高于对照区域的生物种类数量, 2014 年礁区仅有 3 种, 而较早投礁的 2010 年礁区则高达 7 种。在所有调查渔获的生物中, 仅有短吻红舌鲷和许氏平鲉的营养级在不同年份礁区出现了差异, 2010 年礁区显著高于 2014 年礁区。一般情况下, 鱼礁投放后鱼礁区鱼类和大型无脊椎动物群落结构会在 1~5 年内达到一个新的平衡(Bohnsack *et al.*, 1985)。本研究中, 同一种生物的营养级在不同礁区的差别, 说明 2012 年和 2014 年礁区的生物群落结构尚未完全形成新的平衡, 礁区的生态效应正在逐步显现。

总之, 由于人工鱼礁区生物丰度增加, 滤食性贝类的食物组成中, 浮游植物的贡献率增加; 肉食性、凶猛的生物捕获高营养级被捕食者的机率可能增加, 从而导致其营养级有所提高。随着礁区建成年份的增加, 礁区的生态效应逐步显现, 礁区食物网中营养级相对较高的生物对这种改变响应较为明显。

参 考 文 献

- Bohnsack JA, Sutherland DL. Artificial reef research: A review with recommendations for future priorities. *Bulletin of Marine Science*, 1985, 37(1): 11–39
- Cai DL, Li HY, Tang QS, *et al.* The establishment of continuous nutrition spectra in the food web of the Yellow Sea and the East China Sea ecosystem: The results from stable isotope techniques. *Science in China(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. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2005, 35(2): 123–130]
- Catarina, Vanessa M, Luís N, *et al.* Food web of the intertidal rocky shore of the west Portuguese coast—determined by stable isotope analysis. *Marine Environmental Research*, 2015(110): 53–60
- Dai YY, Wang H, Zhang BL, *et al.* Distribution of lead in multi-phase mediums of artificial reefs and potential ecological risk in summer. *Journal Environment and Health*, 2016, 33(4): 345–349 [戴媛媛, 王宏, 张博伦, 等. 夏季渤海湾人工鱼礁区多相介质铅的分布特征及其潜在生态风险. *环境与健康杂志*, 2016, 33(4): 345–349]
- Dai YY, Yang S, Hou CQ, *et al.* Relationships between the structure of phytoplankton community and environmental factor in artificial reefs of Tianjin coast. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(2): 60–66 [戴媛媛, 杨森, 侯纯强, 等. 礁区浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系. *海洋湖沼通报*, 2018(2): 60–66]
- Fabi G, Sala A. An assessment of biomass and diel activity of fish at an artificial reef (Adriatic Sea) using a stationary hydroacoustic technique. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(2): 411–420
- Fry B. Natural stable carbon isotope tag traces Texas shrimp migrations. *Fishery Bulletin United States*, 1981, 79(2): 337–345
- Guo B, Yu Y, Zhang BL, *et al.* Changes of nekton community characteristics in artificial reef area, Dashentang, Tianjin. *Marine Fisheries*, 2015, 37(5): 409–418 [郭彪, 于莹, 张博伦, 等. 天津大神堂海域人工鱼礁区游泳动物群落特征变化. *海洋渔业*, 2015, 37(5): 409–418]
- Guo WD, Yang YP, Wu LX, *et al.* Stable carbon isotope study on trophic relationships of Zhubi reef ecosystem in Nansha Islands. *Journal of Oceanography in Taiwan strait*, 2001, 21(1): 94–101 [郭卫东, 杨逸萍, 吴林兴, 等. 南沙诸碧礁生态系营养关系的稳定碳同位素研究. *应用海洋学学报*, 2002, 21(1): 94–101]
- Jia TT, Gao Y, Hou CQ, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments around artificial reefs in offshore area of Bohai Bay. *Journal Environment and Health*, 2015, 32(12): 1092–1096 [贾婷婷, 高燕, 侯纯强, 等. 渤海湾近岸人工鱼礁区表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价. *环境与健康杂志*, 2015, 32(12): 1092–1096]
- Kidd KA, Schindler DW, Hesslein RH, *et al.* Correlation between stable nitrogen isotope ratios and concentrations of organochlorines in biota from a freshwater food web. *The Science of the Total Environment*, 1995(160–161): 381–390
- Li ZY, Jin XS, Zhuang ZM, *et al.* Applications of stable isotope techniques in aquatic ecological studies. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3052–3060 [李忠义, 金显仕, 庄志猛, 等. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用. *生态学报*, 2005, 25(11): 3052–3060]
- Li ZY, Zuo T, Dai FQ, *et al.* Trophic level analysis of organisms from Changjiang estuary and adjacent waters of southern Yellow Sea in spring with stable isotope technology. *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. 中国水产科学, 2010, 17(1): 103–109]
- Maksymowska D, Richard P, Piekarek-Jankowska H, *et al.* Chemical and isotopic composition of the organic matter sources in the Gulf of Gdansk (Southern Baltic Sea). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, 51(5): 585–598
- Ma QY, Han DY, Liu H, *et al.* Construction of a continuous trophic spectrum for the food web in jiaozhou bay using stable isotope analyses. *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. 生态学报, 2015, 35(21): 7207–7218]
- Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(5): 1135–1140
- Phillip DL, Gregg JW. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources. *Oecologia (Berlin)*, 2003, 136(2): 261–269
- Schwarcz HP. Some theoretical aspects of isotope paleodiet studies. *Journal of Archaeological Science*, 1991(18): 261–275
- Serguei IK, Vladimir IK, Karen S, *et al.* Trophic structure of the abyssal benthic community in the Sea of Japan inferred from stable isotope and fatty acid analyses. *Marine Ecology Progress Series*, 2014(500): 121–137
- Tan LY, Wang YK, Tang XX, *et al.* Distribution characteristics of the stable nitrogen isotope in different tissues of small yellow croaker and the ecological significance in the Yellow Sea. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(3): 30–35 [谭鲁玉, 王玉堃, 唐学玺, 等. 黄海小黄鱼不同组织中 $\delta^{15}\text{N}$ 的分布特征及其生态学意义. 渔业科学进展, 2018, 39(3): 30–35]
- Tomasz M, Niedźwiecki M, Małgorzata A, *et al.* Stable isotope analyses revealed high seasonal dynamics in the food web structure of a peatbog. *International Review of Hydrobiology*, 2015, 100(5-6): 141–150
- Vinagre C, Máguas C, Cabral HN, *et al.* Food web structure of the coastal area adjacent to the Tagus estuary revealed by stable isotope analysis. *Journal of Sea Research*, 2012, 67(1): 21–26
- Wan W, Hu JY, An LH, *et al.* Study on the trophic levels of the main species in Bohai bay food network by using stable nitrogen and carbon isotope. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 708–712 [万祎, 胡建英, 安立会, 等. 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]
- Wang ZH, Zhang SY, Wang K. Fish and macroinvertebrates community structure in artificial habitat around Sanheng Isle, Shengsi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(8): 2026–2035 [汪振华, 章守宇, 王凯. 三横山鱼礁生境鱼类和大型无脊椎动物群落特征. 生态学报, 2010, 30(8): 2026–2035]
- Wei HJ, Zhu XM, Ji YN, *et al.* Study on the food web structure and their trophic levels of marine ranching area in Xiangshan Harbor. *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. 应用海洋学学报, 2013, 32(2): 250–257]
- Wu Y, Zhang J, Zhang ZF, *et al.* Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate matter in the Changjiang river. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 546–552 [吴莹, 张经, 张再峰, 等. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 546–552]
- Wu ZX, Zhang L, Zhang XM, *et al.* Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6737–6746 [吴忠鑫, 张磊, 张秀梅, 等. 荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系. 生态学报, 2012, 32(21): 6737–6746]
- Xie B, Li YK, Zhang H, *et al.* Food web foundation and seasonal variation of trophic structure based on the stable isotopic technique in the marine ranching of Haizhou Bay, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2292–2298 [谢斌, 李云凯, 张虎, 等. 基于稳定同位素技术的海州湾海洋牧场食物网基础及营养结构的季节性变化. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2292–2298]

(编辑 江润林)

Study of the Food-Web Structure in the Dashentang Artificial Reef Area in Tianjin Using a Stable Isotope Technique

ZHANG Bolun^{1,2}, GUO Biao^{1,2}①, YU Ying^{1,2}, XU Xiaofu^{1,2}, WANG Shuo^{1,2}

(1. Department of Fisheries Resources and Ecologic Environment, Tianjin Bohai Sea Fisheries Research Institute, Tianjin 300457; 2. Center for Marine Ranching Engineering Science Research of Tianjin, Tianjin 300457)

Abstract The present study aimed to quantitatively evaluate the ecological effects of artificial reefs from the perspective of the food-web structure and provide reference material for marine ecological restoration and conservation research. A stable isotope technique was applied to analyze consumers and their potential carbon sources. Samples were collected from the reef areas built in 2010, 2012, and 2014 and the control area in Dashentang during June 2016. An IsoSource model was used to construct the food web. Stable isotopes were used to calculate the trophic levels of the consumers. The results showed that food sources can be categorized into three categories based on the $\delta^{13}\text{C}$ values of phytoplankton, particulate organic matter, and soil organic matter. Phytoplankton represented the largest source of carbon for consumers (67.2%~81.5%). The findings from the IsoSource mix model revealed that phytoplankton were the main contributors to the food web in the studied areas. There were no significant differences in the $\delta^{13}\text{C}$ or $\delta^{15}\text{N}$ values of the same food sources from different areas. The $\delta^{13}\text{C}$ values of suspension-feeding bivalves, including *Arca subcrenata*, *Ruditapes philippinarum*, and *Crassostrea gigas*, were significantly higher in the reef areas than in the control area. The proportion of phytoplankton in the carbon sources for suspension-feeding bivalves was significantly higher in the reef areas than in the control area. The $\delta^{15}\text{N}$ values of consumer species ranged from 7.70‰ to 14.34‰, and the trophic levels ranged from 2.0 to 3.95. The $\delta^{15}\text{N}$ values or trophic levels of piscivorous consumers were higher in the reef areas than in the control area, and the level of significance increased with the duration of the reefs. The findings indicate that artificial reefs might induce an abundance of organisms in reef areas, leading to changes in the composition of the food sources of suspension-feeding bivalves and an increase in the trophic levels of piscivorous consumers.

Key words Stable isotope; Artificial reef area; Food web; Trophic level

① Corresponding author: GUO Biao, E-mail: oucguobiao@163.com