烟台养马岛潮间带大型底栖动物 食物网结构特征^{*}

刘春云^{1,2} 姜少玉^{2,3} 宋 博² 闫 朗^{1,2} 张建设¹ 李宝泉^{2,4} 陈琳琳^{2,4}

(1. 浙江海洋大学 国家海洋设施养殖工程技术研究中心 舟山 316000; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所 海岸带生物学与生物资源保护实验室 烟台 264003; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071)

摘要 为探明烟台潮间带主要底栖生物类群间的营养关系和食物网结构特征及其季节性变化,于 2019 年春季(3月)和夏季(7月)在山东烟台养马岛潮间带采集大型底栖动物、沉积颗粒(SOM)、悬浮 有机质(POM)、浮游植物和浮游动物样品。利用稳定同位素技术,对养马岛海滩潮间带底栖生物的 碳、氮稳定同位素进行测定和分析。结果表明:大型底栖动物在春季和夏季 δ¹³C 和 δ¹⁵N 值分别为 -20.23‰—-12.99‰, 5.32‰—10.45‰和-21.91‰—-9.88‰, 7.01‰—14.17‰。夏季的碳、氮稳定同 位素数值范围相较于春季均有所增加,相同大型底栖动物物种的碳、氮稳定同位素值会随季节变化 而发生变化。春季该潮间带主要大型底栖动物的营养级范围为 1.98—3.49,夏季为 1.89—4.00。相同 大型底栖动物营养级在季节之间无显著变化(*P*>0.05)。营养传递顺序可表达为:滤食性软体动物→多 毛类→甲壳动物、与能量流动方向一致。

关键词 潮间带;大型底栖动物;稳定同位素;营养级 中图分类号 Q958.8 doi: 10.11693/hyhz20191100217

潮间带是重要的海洋湿地生态系统之一,物种 多样性丰富,生产力较高。由于地处海陆交界处,受 周期性的潮汐运动影响,该区域光照、温度、盐度、 营养、气体等环境因子变化剧烈(王智,2015)。此外, 海岸带区域人类涉海活动加剧,如海水养殖、工厂污 染排放、围填海等,对潮间带区域产生了剧烈影响。 养马岛海域沿海岸线有几条小型季节性河流,能够 为养马岛潮间带区域带来丰富的陆源有机质,并且 养马岛海域是我国北方重要的海水养殖区之一,海 水养殖过程中投喂的饵料中含有大量的营养物质(氮 和磷等)(陈一波等,2016),其中只有少部分被养殖生 物所摄食,剩余大部分则被释放到养殖水域中,造成 养殖水域及其附近水体富营养化(Naylor *et al*,2000; Tovar et al, 2000; Cabello, 2006).

大型底栖动物(Macrofauna)是指不能通过 500µm 孔径网筛的动物,是海洋环境中的一个重要类群,它 在海洋系统的能流和物流中起着十分重要的作用(马 骏等,2010;李新正,2011)。由于大型底栖动物活动范 围有限,甚至部分大型底栖动物营固着生活,因此, 大型底栖动物对逆境的逃避相对迟缓,受环境影响 更为深刻,能够客观地反映海洋环境的特点和环境 质量状况。所以长期以来大型底栖动物一直被当作监 测生态系统变化的主要研究对象,是生态系统健康 的重要指示生物(蔡德陵等,2001;李新正,2011;张 莹等,2012)。

食物网中的营养关系、物质循环和能量流动途径

通信作者: 陈琳琳, 副研究员, E-mail: llchen@yic.ac.cn 收稿日期: 2019-11-19, 收修改稿日期: 2020-01-15

^{*} 美丽中国生态文明建设科技工程专项, XDA23050304 号, XDA23050202 号; 中国科学院前沿科学重点研究项目, QYZDB-SSW-DQC041 号; 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室开放研究基金, LMEB201716 号。刘春云, 硕士研究生, E-mail: 17694803698@163.com

是海洋生态系统动力学研究中的重要问题(王田田等、 2013)。因此、探究潮间带海域大型底栖动物的食物网 关系和营养级特征、可以更好地了解该区域物质循 环和能量流动的变化。在特定的生态系统中、各生物 种群的摄食关系、营养物质和能量的流动途径是生态 学研究的一个难题(蔡德陵等,1999)。 食物网研究中传 统的胃内含物法、只能反映生物短时间内的食性 (Hyslop, 1980), 且因胃含物中常含有难以消化的物 质、导致食物网鉴定结果产生偏差(Gee、1989;余婕 等,2008)。稳定同位素技术应用于食物网研究是从20 世纪 90 年代以后发展的分析方法, 其主要原理是基 于生物新陈代谢引起同位素分馏、会优先选择排出 较轻的同位素、不同程度地保留较重的同位素 (DeNiro et al, 1978; 郭承秧等, 2018), 其优点是能够 反映生物近几个月间的食性(Preciado et al, 2017)。通 常消费者的碳元素通过呼吸作用发生分馏、且消费 者获取的碳稳定同位素与食源基本相同、用于确定 食物来源与组成(Fanelli et al, 2011); 而氮元素通过 排泄作用发生分馏、消费者的氮稳定同位素比率 $(\delta^{15}N)$ 较被捕食者增加 3‰—5‰、用于确定消费者所 处的食物网中的营养级(Hobson et al, 1992)。稳定同 位素技术的发展为食物网以及营养级的精确分析奠 定了基础。通过测定生物碳、氮稳定同位素数值来确 定主要大型底栖动物类群在潮间带区域的营养级. 能够直观地表现营养级的能流途径(卢伙胜等, 2009), 并借此了解潮间带不同生物的种间关系。

本研究是基于养马岛潮间带底栖生物的稳定同 位素测定结果,分析养马岛潮间带底栖生物群落的 食物网关系,明确该区域大型底栖动物营养级特征, 为潮间带生态环境改善和修复,以及进一步合理利 用潮间带生物资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

分别于 2019 年春季(3 月)和夏季(7 月)在养马岛潮 间带(37°26′16″—37°26′41″E, 121°36′34″—121°36′49″N) 采集大型底栖动物样品。同时夏季还采集了底栖动物 的潜在食源样品,包括沉积颗粒(SOM)、悬浮有机质 (POM)、浮游生物以及大型海藻。

潮间带大型底栖动物定性采集调查,在采样点 附近收集尽可能多的个体;浮游动物采用 25 号浮游 生物网采集,浮游植物采用 13 号浮游植物网采集; 用一次性医用注射器改装后的柱状采样器采集沉积 物样品以收集 SOM 样品(取上层 5cm); 用 1L 塑料瓶 采集表层海水以收集 POM 样品。

在实验室内, 浮游植物用 100μm 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 样品抽滤至预先经 450°C 灼烧 5h 的 What-man GF/F 滤膜上。采集的表层海水样品经 150μm 筛绢过滤后 抽滤到预先经 450°C 预灼烧 5h 的 What-man GF/F 滤 膜上收集 POM 样品。沉积物样品经过酸化处理后, 过 63μm 筛绢分筛, 所获得颗粒物即为 SOM 样品。 浮游动物和大型底栖动物经冷冻后进行取样, 每个 待测样品由同一物种的 1—8 个个体的组织混合而成 (表 1, 2)。

1.2 有机碳、氮稳定同位素的测定

样品碳(C)、氮(N)稳定同位素的测定采用 Mat253 同位素质谱仪(Thermo Fisher 美国)。同位素含量计算 公式(Sabo *et al*, 2010),即

 δ^{13} C 或 δ^{15} N = [($R_{\#}/R_{\#}$)-1]×1000‰ (1) 式中, $R_{\#}$ 为样品的同位素比值, $R_{\#}$ 为标准同位素比值。 对于碳同位素 $R=^{13}$ C/¹²C, 以国际标准物质 PDB (Peedee Belemnite carbonate)为标准物;对于氮同位 素, $R=^{15}$ N/¹⁴N,以空气中的 N₂为标准物。

1.3 食源贡献率计算

潜在食源对大型底栖动物生长的贡献率通过 Iso Source 软件(Phillips *et al*, 2003)进行分析计算,该软 件根据质量守恒原理计算各食物源对生物消费者的 贡献率(Schwarcz, 1991),计算公式如下:

$$\delta M = f_A J_A + f_B J_B + \dots + f_N J_N \tag{2}$$

$$f_A + f_B + \dots + f_N = 1 \tag{3}$$

其中 δM 代表待测大型底栖动物即消费者的同位素数 值; J_A、J_B…J_N代表潜在食源稳定同位素值; f_A、f_B…f_N 代表各潜在食源的相对贡献率。对于采集到的潜在食 源基于碳稳定同位素来确定不同食物对消费者的贡 献率。

1.4 营养级测定

氮稳定同位素比值的高低可以表征生物体在食物网中的营养层次,其具体的计算公式如下(Vander Zanden *et al*, 2007):

TL = λ +(δ^{15} N _{滿機者}- δ^{15} N _{基准消费者})/ δ^{15} N _{平均} (4) 式中, TL 为营养级, λ 为基准消费者营养级, 一般根据 所研究的生物群体取值 1, 2, 3; δ^{15} N _{滿機者}、 δ^{15} N _{基准消费者} 和 δ^{15} N _{平均}分别是所测消费者、基准消费者和平均每一营 养级富集的 δ^{15} N 值。本文选取在养马岛潮间带海域 分布较为广泛且在春季和夏季均有出现的菲律宾蛤 仔(*Ruditapes philippinarum*)作为基准生物, λ 值确定

469

为 2。参照文献(Post, 2002; Enge *et al*, 2018) δ^{15} N ^{平均} 值定为 3.4‰。

1.5 统计分析

根据采集生物样本的碳、氮稳定同位素值,采用 SPSS 24.0 统计软件和 Excel 进行平均值和方差计算; 应用 Primer 6.0 软件,对 δ^{13} C和 δ^{15} N双因子比值数据 进行平方根转化后再进行 Bray-Curtis 相似性处理后 对所获得的生物食性进行聚类分析。应用 Origin9.1 软件,进行作图。

2 结果与分析

2.1 样品的物种组成

本研究共采集大型底栖动物 28 种, 隶属于 7 纲 18 目 26 科 26 属。其中春季采集到的大型底栖动物 共计 9 种, 多毛纲 4 种, 腹足纲 3 种, 双壳纲 2 种(表 1)。夏季采集到的大型底栖动物共计 22 种, 涡虫纲 1 种, 多毛纲 2 种, 软甲纲 5 种, 甲壳纲 2 种, 腹足纲 6 种, 双壳纲 5 种, 辐鳍鱼纲 1 种(表 2)。春季和夏季共 同采集到的物种为双壳类的菲律宾蛤仔(Ruditapes philippinarum)、异白樱蛤(Macoma incongrua)和腹足 类的古氏滩栖螺(Batillaria cumingi)。

养马岛潮间带区域大型底栖动物的潜在食源主 要采集到浮游动物、POM、SOM 和大型海藻等,其 中大型海藻共采集到4种(表 3)。

2.2 碳、氮稳定同位素比值

2.2.1 消费者的 δ^{13} C 和 δ^{15} N 值 养马岛潮间带生 态系统中、大型底栖动物不同季节的 δ^{13} C 和 δ^{15} N 值 结果如表 1 和表 2 所示。春季大型底栖动物 δ^{13} C 值 的范围为-20.23‰(菲律宾蛤仔)— -12.99‰(皮氏蛾 螺)、 δ^{15} N 值的范围为 5.32‰(异白樱蛤)—10.45‰(长 吻沙蚕)(表 1, 图 1)。夏季大型底栖动物 δ^{13} C 值的范 围为-21.91‰(灰黄镰玉螺)— -10.75‰(嫁蛾), δ^{15} N 值 的范围为 7.01‰(红明樱蛤)—14.17‰(鲜明鼓虾)(表1, 图 2)。其中菲律宾蛤仔的 δ^{13} C 值在夏季有所下降, $\delta^{15}N$ 值上升。而异白樱蛤和古氏滩栖螺的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 值在夏季均有明显的上升。进一步分析发现菲律宾蛤 仔的 δ^{13} C 值(F=5.601, P=0.000, T 检验)和 δ^{15} N 值 (F=3.831, P=0.000, T 检验)均存在显著季节性差异 (P < 0.01)。古氏滩栖螺只有 δ^{15} N 值(P=0.013)存在显 著季节性差异(P < 0.05)。异白樱蛤的 δ^{13} C 值和 δ^{15} N 值季节性差异均不显著(P > 0.05)。

2.2.2 消费者潜在食源的 δ^{13} C 和 δ^{15} N 值 稳定同 位素分析结果表明, 潜在食源的 δ^{13} C 平均值为 -16.24‰; 其 中 最 低 值 为 紫 菜 (*Porphyra* sp.), -21.17‰; 最高为浒苔(*Enteromorpha* sp.), -9.88‰; 差值为 11.29‰。 δ^{15} N 平均值为 6.81‰, 最低值为浮 游动物, 2.30‰; 最高值为浒苔, 11.60‰; 差值为 9.3‰(表 3, 图 2)。

表 1 养马岛潮间带春季底栖生物的 δ^{13} C 和 δ^{15} N 稳定同位素比值

Tab.1 Stable isotopic ratios of δ^{13} C and δ^{15} N of obtained benthos in the intertidal zone of Yangma island in Spring					
物种	取样组织	δ^{13} C(‰)均值 \pm SD	δ^{15} N(‰)均值 \pm SD		
软体动物					
双壳类	闭壳肌				
菲律宾蛤仔 Ruditapes philippinarum		-20.23±0.13	5.38±0.15		
异白樱蛤 Macoma incongrua		-14.42 ± 0.15	5.32±0.02		
腹足类	足部肌肉				
古氏滩栖螺 Batillaria cumingi		$-13.44{\pm}0.00$	$8.07 {\pm} 0.00$		
宽带薄梯螺 Papyriscala latifasciata		-13.91 ± 0.13	8.12±0.16		
皮氏蛾螺 Volutharpa perryi		-12.99 ± 0.00	8.30±0.00		
环节动物					
多毛类	体壁				
日本刺沙蚕 Hediste japonica		-14.69 ± 0.13	10.12 ± 0.69		
红色叶蜇虫 Amphitrite rubra		-13.93 ± 0.00	8.81±0.00		
圆头索沙蚕 Lumbrineris inflata		-15.03 ± 0.14	9.60±0.08		
长吻沙蚕 Glycera chirori		$-15.98{\pm}0.00$	$10.45 {\pm} 0.00$		

2.2.3 潜在食源对大型底栖动物食物组成的贡献率

基于 Iso Source 模型的计算结果, 大型藻类作为

初级生产者,是研究区域大部分底栖动物的主要碳 源,但是其对不同物种的贡献率不同(表 2)。大型藻 类是滤食性贝类和杂食性螺类等软体动物的主要碳 源,其中紫菜(Porphyra sp.)对于菲律宾蛤仔的碳源 贡献率平均可高达 93.9%,但灰黄镰玉螺(Lunatia gilva)因δ¹³C值低,其碳源并不在所分析的碳源内(表 2)。浮游动物对多毛类生物那不勒斯膜帽虫(Lagis neapolitana)的贡献率最高,为 30.8%(表 2)。而大型藻 类对网纹平涡虫(Planocera reticulata)、短叶索沙蚕 (Lumbrineris latreilli)的贡献率最高,分别为 69.5%和 65.7%。POM 对甲壳生物大蝼蛄虾(Upogebia major) 的贡献率最高,为 59.5%,其余甲壳生物主要碳源均 为大型藻类(表 2)。

2.3 消费者的营养级

春季大型底栖动物营养级范围为 1.98(异白樱 蛤)—3.49(长吻沙蚕)。其中,多毛类生物营养级范 围为 3.01(红色叶蜇虫)—3.49(长吻沙蚕);软体动 物营养级范围为 1.98(异白樱蛤)—2.86(皮氏蛾螺) (图 3)。





Fig.1 The δ^{13} C- δ^{15} N plots of macrobenthos species in the intertidal zone of Yangma island in Spring

注: 序号代表生物: 1. 菲律宾蛤仔; 2. 异白樱蛤; 3. 古氏滩栖螺; 4. 宽带薄梯螺; 5. 日本刺沙蚕; 6. 圆头索沙蚕; 7. 红色叶蜇虫; 8. 皮 氏蛾螺; 9. 长吻沙蚕; δ¹³C、δ¹⁵N 值为平均值±标准偏差(Mean±SD)

表 2 养马岛潮间带夏季获得生物的 δ^{13} C 和 δ^{15} N 稳定同位素比值与潜在食源平均贡献率

Tab.2 Stable isotopic ratios of δ^{13} C & δ^{15} N of obtained and contribution rate of potential food source to consumers in the intertidal zone of Yangma island inSummer

		$\delta^{13}C(\%) = \delta^{15}N(\%)$		潜在食源平均贡献率(%)			
物种	取種部位	均值±SD	均值±SD	大型藻类	POM	SOM	浮游动物
环节动物							
多毛类	体壁						
那不勒斯膜帽虫 Lagis neapolitana		-17.08 ± 0.00	10.85 ± 0.00	15.8±4.9	23.6±17.4	29.8±21.8	30.8±22.5
短叶索沙蚕 Lumbrineris latreilli		-14.25 ± 0.50	10.14 ± 0.80	65.7±11.5	9.8±8.8	10.7±9.6	10.8±9.8
软体动物							
腹足类	足部肌肉						
灰黄镰玉螺 Lunatia gilva		-21.91 ± 0.00	10.29 ± 0.00	/	/	/	/
经氏壳蛞蝓 Philine kinglipini		-19.38±0.66	12.54±0.12	72.8±4.2	9.8±9.1	7.6±7.2	7.4±7.0
秀丽织纹螺 Nassarius festivus		-14.56 ± 1.02	10.00 ± 1.89	63.1±11.2	10.6±9.5	11.5±10.4	11.7±10.5
古氏滩栖螺 Batillaria cumingi		$-13.40{\pm}0.38$	10.10 ± 1.02	72.6±12.1	7.6±6.9	8.4±7.6	8.5±7.7
朝鲜花冠小月螺 Lunella coronata correensis		-11.28±1.18	9.84±0.41	89.7±12.7	2.7±2.6	3.0±2.8	3.0±2.9
嫁蝛Cellana toreuma		-10.75 ± 1.48	11.70 ± 0.08	94.5±12.0	1.6±2.1	1.9±2.3	1.9±2.3
双壳类	闭壳肌						
菲律宾蛤仔 Ruditapes philippinarun	1	-20.95 ± 0.00	7.39 ± 0.00	94.7±0.8	1.3±1.6	1.1±1.4	0.9±1.2
长巨牡蛎 Crassostrea gigas		-20.67 ± 0.00	8.79 ± 0.00	90.4±1.4	2.2±2.8	2.2±2.3	2.9±2.3
薄壳绿螂 Glauconome primeana		-20.66±0.11	7.48 ± 0.00	90.3±1.2	2.9±2.8	2.3±2.3	2.2±2.3
异白樱蛤 Macoma incongrua		-13.87±0.12	7.42±0.17	68.7±11.7	8.8±7.9	9.7±8.7	9.8±8.9
红明樱蛤 Moerella rutila		-13.42 ± 0.00	7.01 ± 0.00	72.3±12	7.7±6.9	8.4±7.7	8.5±7.8
扁形动物	整体						
网纹平涡虫 Planocera reticulata		-15.37 ± 0.20	$8.60 {\pm} 0.08$	69.5±2.1	7.8±6.1	10.1±7.9	11.1±8.2
节肢动物	肌肉组织						
大蝼蛄虾 Upogebia major		-17.73 ± 0.00	11.78 ± 0.00	3.3±2.6	59.5±10.6	19.1±14.4	17.1±12.6

							-7.10
物油	取样部位	δ ¹³ C(‰) 均值±SD	δ ¹⁵ N(‰) 均值±SD	潜在食源平均贡献率(%)			
12/ የተ				大型藻类	POM	SOM	浮游动物
鲜明鼓虾 Alpheus distinguendus		-17.36 ± 0.00	14.17 ± 0.00	45,4±8.6	18.9±16.2	16.6±15.0	16.2±14.7
豆形拳蟹 Philyra pisum		-16.31 ± 1.34	11.55±0.11	49.3±9.9	15.5±13.5	16.0±14.2	16.1±14.3
肉球近方蟹 Hemigrapsus sanguineus		-17.36±1.03	12.66±0.06	45.4±8.6	18.9±16.2	16.6±15	16.2±14.7
日本寄居蟹 Pagurus japonicus		$-15.10{\pm}0.82$	10.98 ± 0.11	58.7±10.9	12.0±10.7	13.0±11.6	13.1±11.7
日本大眼蟹 Macrophthalmus japonicus		-13.45±0.45	8.91±1.90	74.5±12.2	7.0±6.3	7.7±7.0	7.8±7.1
绒毛近方蟹 Hemigrapsus penicillatus		-15.78±1.15	10.84±0.52	53.4±10.3	13.9±12.2	14.7±13.1	14.8±13.2
脊索动物	肌肉组织						
黄鳍刺虾虎鱼 Acanthogobius flavimanus		-15.31±0.88	11.33±1.40	57.0±10.7	12.6±11.2	13.5±12.1	13.7±12.2

注: POM: 悬浮有机物; SOM: 沉积颗粒

表 3 养马岛潮间带大型底栖动物潜在食源的 δ^{13} C 和 δ^{15} N 稳定同位素比值

Tab.3 δ^{13} C and δ^{15} N stable isotope ratios of potential food sources of macrobenthos in the intertidal zone of Yangma Island

	ibiuiiu			
生物种类	δ ¹³ C(‰) 均值±SD	δ^{15} N(‰) 均值±SD		
红藻门				
紫菜 Porphyra sp.	-21.17 ± 0.80	10.82±0.20		
绿藻门				
浒苔 Enteromorpha sp.	-9.88 ± 0.64	11.60±0.03		
石莼 Ulva lactuca	-10.56 ± 0.36	8.32±1.42		
褐藻门				
网管藻 Dictyosiphon foeniculaceus	-16.20±1.11	7.20±3.48		
РОМ	-18.15 ± 1.51	3.24±0.50		
SOM	$-17.40{\pm}1.36$	2.32±0.05		
浮游动物	-17.30 ± 0.00	2.30 ± 0.00		

夏季大型底栖动物营养级范围为 1.89(红明樱 蛤)—4.00(鲜明鼓虾)。其中,多毛类生物营养级范围 为 2.36(网纹平涡虫)—3.02(那不勒斯膜帽虫);软体 动物营养级范围为 1.89(红明樱蛤)—3.52(经氏壳蛞 蝓); 甲壳动物营养级范围为 2.45(日本大眼 蟹)—4.00(鲜明鼓虾); 黄鳍刺虾虎鱼营养级为 3.16(图 4)。

此次调查中,春季和夏季共同采集到的大型底 栖动物的营养级季节间无显著变化(*P*>0.05),菲律宾 蛤仔为基准生物,春季和夏季营养级均为 2,异白樱 蛤营养级在夏季仅比春季高 0.02,古氏滩栖螺营养级 无变化,均为 2.79。



图 2 养马岛潮间带夏季大型底栖动物及潜在食源的 $\delta^{13}C-\delta^{15}N$ 分布图

Fig.2 The δ^{13} C- δ^{15} N plots of macrobenthos and potential food source species in the intertidal zone of Yangma island in Summer 注: 序号代表物质:1. SOM; 2. POM; 3. 浮游动物; 4. 石莼; 5. 浒 苔; 6. 紫菜; 7. 网管藻; 8. 薄壳绿螂; 9. 朝鲜花冠小月螺; 10. 大 蝼蛄虾; 11. 豆形拳蟹; 12. 短叶索沙蚕; 13. 菲律宾蛤仔; 14. 古 氏滩栖螺; 15. 红明樱蛤; 16. 黄鳍刺虾虎鱼; 17. 灰黄镰玉螺; 18. 嫁蝛; 19. 经氏壳蛞蝓; 20. 那不勒斯膜帽虫; 21. 日本大眼蟹; 22. 日本寄居蟹; 23. 绒毛近方蟹; 24. 肉球近方蟹; 25. 网纹平涡虫; 26. 鲜明鼓虾; 27. 秀丽织纹螺; 28. 异白樱蛤; 29. 长巨牡蛎

2.4 消费者的食性相似性分析

对养马岛潮间带底栖生物食物网组成成分进行 聚类分析(图 5),按照 90%的相似性水平,可将春季 消费者分为两大类群,第1组又以 99%的相似性分为 1a、1b 和 1c 三组,其中 1a 组为小型螺类,包括古氏 滩栖螺和宽带薄梯螺,其主要食源为藻类,1b 组为杂 食性的日本刺沙蚕,其主要食物为藻类、小型动物、 腐屑及动植物碎片,1c 组则主要为肉食性多毛类和软 体类,包括长吻沙蚕、红色叶蜇虫、圆头索沙蚕及皮

(歩主





Yangma island in Spring





夏季大型底栖动物食性按照 97%的相似性水平, 大体可分为六个营养类群(图 6)。第 1 组为滤食性, 滤 食水体中微小的浮游生物; 第 2 组网纹平涡虫是以蠕 虫、甲壳类和昆虫为食, 与滤食性异白樱蛤和红明樱 蛤食性不同。第 3 组是杂食偏肉食性; 第 4 组嫁蝛单 独成一组以大型藻类为食; 在第 5 组中, 又以 98%的 相似性将其划分为 5a 和 5b 组, 在 5a 组中古氏滩栖螺 为植食性其余为肉食性, 5b 组中日本大眼蟹为植食性 其余为肉食性。第 6 组为肉食性, 主要摄食多毛类和

甲壳类。









图 6 养马岛潮间带夏季大型底栖动物不同物种 δ^{13} C 和 δ^{15} N 值的聚类分析



3 讨论

3.1 基准生物的选取

基准生物通常是食物网中低营养级生物或其有 机物,其选择标准通常会影响对整个食物网结构和 功能的判别(Vander Zanden *et al*, 2007; 徐军等,

473

2010)。因此,根据自己所研究的区域和生物种群来选 择合适的基准生物,对于准确地判断该区域的食物 网结构和能量流动非常重要。在对大型底栖动物或潮 间带区域食物网的研究中,基准生物 λ 值多为2(余婕 等,2008;张雷燕等,2017)。同时,需要根据生物个体 的活动范围小、生命周期相对长、易采集、分布广泛、 营养级位置低等条件进行综合考量(徐军等,2010)。 参考已有的研究资料和选取标准并结合当地的物种 组成,本文选取菲律宾蛤仔作为养马岛潮间带区域 大型底栖动物营养级研究的基准生物,取 λ 值为2。

3.2 大型底栖动物稳定同位素数值分析

养马岛潮间带区域大型底栖生物的碳、氮稳定同 位素数值季节差异明显, 这与大型底栖动物碳、氮稳 定同位素数值会随季节变化而变化的结论一致(刘保 占, 2013)。具体表现为春季 δ^{13} C 和 δ^{15} N 值的范围明 显小于夏季、且 δ^{15} N值明显偏低。有研究表明、除物 种类别外、温度和饵料也是影响稳定同位素富集过 程的重要因素(田甲申等, 2019),因此推测养马岛潮 间带海域碳、氮稳定同位素季节性差异也与水温升高 及饵料结构随季节变化有关。由于温度升高、生物呼 吸作用(Deniro et al, 1978; 蔡德陵等, 1999)和代谢作 用(Preciado et al, 2017)增强, 导致生物的 δ^{13} C 值和 δ^{15} N 值普遍增高。根据 δ^{13} C 值可以用来反映食物来 源, δ^{15} N 值可以反映生物的营养级特征(Madurell *et al*, 2008)、我们推断夏季大型底栖动物的食物来源相较 于春季要更加广泛、虽然 $\delta^{15}N$ 值夏季相对于春季整 体提高、但季节之间共同采集到的生物营养级并没 有明显变化(P>0.05)。

本研究中养马岛潮间带区域夏季大型底栖动物 的碳、氮稳定同位素值与烟台西海岸海草床区域(宋 博等,2019)、大连近岸海域(王荦等,2017)以及北黄 海、渤海辽东湾海域(刘保占,2013)相比,其整体范围 均比上述海域差值范围大。推测造成上述差异的原因 主要为:(1)研究区域生境的差异,潮间带区域因处 于陆海交界处,环境条件变化剧烈(王金宝等,2018), 而潮下带海草床区域和近岸海域相对于潮间带环境 变化较小。(2)大型底栖动物群落组成不同。由于大 型底栖动物受不同环境条件的影响,其群落特征变 化也较大(王金宝等,2018)。该结论与大型底栖动物 可通过自身代谢作用,富集较重的同位素(DeNiro *et al*,1981; Minagawa *et al*,1984),该富集作用在不同的 水生生物之间存在差异,也造成不同物种之间稳定 同位素数值的差异(郭梁等,2016)。(3)大型底栖动物 的碳、氮稳定同位素来源不同,与潮下带近岸海域相比,潮间带区域碳、氮稳定同位素不仅来源于水生有机质,还有陆源有机质输入(Finlay *et al*, 2010)。稳定同位素来源丰富,造成潮间带区域稳定同位素值范围较宽。

3.3 养马岛潮间带食物网结构和营养级

养马岛潮间带海域只有多毛类营养级随季节变 化而变化、鱼类营养级主要受个体大小的影响、季节 变化不明确: 软体动物营养级随季节变化不明显。本 次调查获取的大型底栖动物按照功能群主要分为滤 食性、植食性、杂食性和肉食性(蔡文倩等, 2016)。 软体动物主要为滤食性和植食性、春季和夏季营养 级平均值分别为 2.49 和 2.47、无明显变化、为次级消 费者。多毛类多为杂食性、春季和夏季营养级平均值 分别为 3.28 和 2.73、营养级位置发生较大改变。多毛 类产生季节性差异的原因分析存在以及可能: 一是 种间竞争,夏季甲壳类快速生长,需要大量摄食,而 我们捕捉到的甲壳类大部分为肉食性与多毛类存在 食源竞争,由于多毛类行动缓慢,竞争能力弱于甲壳 类,造成多毛类因摄食来源不同导致整体营养级下 降; 二是食源的物种组成发生变化, 春季多毛类摄食 的物种多为早期发育阶段的小型生物个体,活动能 力不强、随着这些物种的生长发育、夏季活动能力加 强、不易被多毛类捕食;三是多毛类群中、部分物种、 如沙蚕、成体在夏季进入繁殖期、有海面群游婚舞的 习性(于超勇等, 2016), 这可能对潮间带底栖生境多 毛类营养级高低产生影响。此外、黄鳍刺虾虎鱼的营 养级为 3.16, 而辽东湾海域获得的矛尾刺虾虎鱼营养 级接近 5.00(孙明等, 2013), 这两个物种同属于刺虾 虎鱼属、食性相近、但营养级差别明显。有研究显示 即使相同季节捕获的不同体长/体重的同种鱼、其碳 氮同位素值也有明显的变化(蔡德陵等, 2005), 我们 推断在潮滩上捕捉到的幼体黄鳍刺虾虎鱼、其营养 级会相对成鱼偏低。

3.4 潜在食源 δ^{13} C 和 δ^{15} N 值的变化

烟台养马岛潮间带区域采集到的潜在食源的 δ^{13} C和 δ^{15} N值的范围间距较大,为11.29‰和9.3‰。 本研究区域的 POM 和 SOM 的碳稳定同位素数值均 比北黄海、渤海辽东湾(刘保占,2013)、青岛崂山湾(蔡 德陵等,2001)、天津海域(张博伦等,2019)以及浙江枸 杞岛海域(蒋日进等,2014)的 POM 和 SOM 数值偏高。 与之相反,该海域 POM 和 SOM 的 δ^{15} N值与北黄海、 渤海辽东湾(刘保占,2013),天津海域(张博伦等, 2019)和海州湾区域(谢斌等, 2017)相比则偏低。POM 和 SOM 的来源比较复杂, POM 主要由浮游生物本 身、海洋生物代谢过程产生的碎屑组成(赵明辉等, 2014), 而 SOM 主要由悬浮颗粒在水体中的自然沉 降、海洋生物死亡后形成的碎屑沉积等形成(谢斌等, 2017)。而对于近岸水域, POM 和 SOM 会有部分来自 陆源和人为输入(赵明辉等, 2014)。因研究区域处于 海洋养殖区以及河流排污口周围, 其 POM 和 SOM 数 值与上述其他海域产生差异的原因应主要来自外源 输入。

本研究在养马岛采集到的大型藻类包括褐藻门 (网管藻)、绿藻门(浒苔、石莼)和红藻门(紫菜)、其 δ^{13} C值与北黄海、渤海辽东湾(刘保占, 2013)相比, 绿 藻门和褐藻门的 δ^{13} C值偏高,红藻门偏低;而氮稳定 同位素值则普遍高于上述海域。本研究氮稳定同位素 数据与王玉珏等(2016)在养马岛区域分析的大型海藻 氮稳定同位素值基本一致。潮间带大型藻类的碳源主 要是通过光合作用吸收的海水中的游离 CO₂ 和大量 存在的 HCO₃ (夏建荣等, 2010), 因此大型藻类碳稳 定同位素值在不同海域的空间差异性不大。 而大型藻 类的氮稳定同位素值则需要依据不同来源氮的营养 盐 δ^{15} N 值进行判断(王玉珏等, 2016), 由于不同区域 受人类活动影响和水体富营养化程度不同、其氮营 养盐的 δ^{15} N 值也有明显的差异。如生活污水和生物 排泄物的 δ^{15} N 值较高, 范围约 7‰—51‰(王玉珏等, 2016)。而养马岛处于河流排污口以及海水养殖区域、 其氮营养盐来源广泛, 在该区域采集到的大型藻类 氮稳定同位素值均处于上述 $\delta^{15}N$ 值范围内, 这也说 明了排污和养殖自身污染已严重影响到大型藻类的 生长代谢。并且已有研究表明, 浒苔属的 δ^{15} N 值较高 是因其在高浓度营养盐环境中基本不存在分馏的结 果(王玉珏等, 2016)、本研究中发现浒苔 δ^{15} N 值偏高 与上述结论一致。同时我们也发现紫菜的 δ^{15} N 数值 也偏高, 除氮营养盐外源输入的影响, 紫菜自身代谢 可能存在差异、但具体机制目前还不清楚,需要进一 步研究。

4 结论

碳、氮稳定同位素数值会随季节变化而变化,但 是营养级并不会随季节变化而发生改变。烟台养马岛 潮间带区域食物网能量流动中的碳流可能主要通过 三条途径: (1) POM 和浮游动物被滤食性软体动物菲 律宾蛤仔、异白樱蛤等捕获,小型软体动物被肉食性 多毛类长吻沙蚕、圆头索沙蚕等和甲壳类生物大蝼蛄 虾、绒毛近方蟹等所摄食。(2)大型海藻被植食性以及 只摄食大型海藻的嫁蝛所摄食,最终被肉食性甲壳 类日本寄居蟹、绒毛近方蟹、鲜明鼓虾等摄食。(3) 杂食性底栖生物长巨牡蛎等对藻类和其他小型动物 —如浮游动物均有摄食。营养级分布基本符合滤食性 软体动物→多毛类→甲壳动物,与能量流动方向一 致。对该区域影响较大的人类活动,如污染物排放和 海水养殖,明显影响了该海域的初级生产力,进而对 该区域的食物网结构造成不成程度的扰动。

参考文献

- 于超勇,刘 名,刘 莹等,2016. 沙蚕类性信息素研究进展. 广西科学院学报,32(2): 129—135
- 马 骏, 付荣恕, 2010. 大型底栖动物生态学研究进展. 山东 农业科学, (2): 78—81
- 王 荦, 杜双成, 杨婷越等, 2017. 应用稳定同位素技术评价 大连近岸海域食物网营养结构. 生态学杂志, 36(5): 1452—1457
- 王 智, 2015. 青岛湾潮间带大型底栖动物生态学和形态学研究. 山东: 中国海洋大学硕士学位论文, 1—2
- 王玉珏, 邸宝平, 李 欣等, 2016. 潮间带大型海藻氮稳定同 位素的环境指示作用. 海洋环境科学, 35(2): 174—179
- 王田田, 吕振波, 李 凡等, 2013. 基于稳定碳氮同位素的莱
 州湾 4 种鳀鲱科鱼类营养级研究. 中国水产科学, 20(5):
 1076—1085
- 王金宝, 李新正, 王洪法等, 2018. 山东长岛潮间带大型底栖 动物生态特征研究. 海洋科学, 42(10): 41—52
- 卢伙胜, 欧 帆, 颜云榕等, 2009.应用氮稳定同位素技术对雷 州湾海域主要鱼类营养级的研究. 海洋学报, 31(3): 167—174
- 田甲申,王 震,李多慧等,2019. 温度、饵料和物种对滤食性 贝类碳氮稳定同位素分馏的影响.大连海洋大学学报, 34(1):80—86
- 刘保占,2013. 基于稳定同位素组成分析的中国北方海域食物网结构研究. 辽宁:大连海事大学博士学位论文, 63—71
- 孙 明,刘修泽,李轶平等,2013.应用氮稳定同位素技术研 究辽东湾海域主要渔业生物的营养级.中国水产科学, 20(1):190—198
- 李新正, 2011. 我国海洋大型底栖生物多样性研究及展望:以 黄海为例. 生物多样性, 19(6): 676—684
- 余 婕, 刘 敏, 侯立军等, 2008. 崇明东滩大型底栖动物食 源的稳定同位素示踪. 自然资源 学报, 23(2): 319—326
- 陈一波, 宋国宝, 赵文星等, 2016. 中国海水养殖污染负荷估 算. 海洋环境科学, 35(1): 1---6,12
- 宋 博,陈琳琳,闫 朗等,2019. 山东东营和烟台潮间带海
 草床食物网结构特征. 生物多样性,27(9):984—992
- 张 莹, 吕振波, 徐宗法等, 2012. 环境污染对小清河口大型 底栖动物多样性的影响.生态学杂志, 31(2): 381—387
- 张博伦, 郭 彪, 于 莹等, 2019. 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, 40(06): 25—35

- 张雷燕,安浩,关保华等,2017. 贡湖湾大型底栖动物碳、氮 稳定同位素的空间分布特征.环境科学与技术,40(7): 67—71
- 赵明辉,李绪录,2014.2000~2011 年深圳湾及邻近水域颗粒有 机物的来源和时空分布.中国环境科学,34(11): 2905—2911
- 郭梁,孙翠萍,任伟征等,2016.水生动物碳氮稳定同位素 富集系数的整合分析.应用生态学报,27(2):601—610
- 夏建荣,田其然,高坤山,2010. 经济海藻红毛菜原位光合作 用日变化. 生态学报,30(6):1524—1531
- 徐 军,张 敏,谢 平,2010. 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,22(1): 8—20
- 郭承秧,杨 志,陈建芳等,2018.基于碳、氮稳定同位素的雅 浦海沟底栖生物食物来源和营养级初探.海洋学报, 40(10):51—60
- 蒋日进,章守宇,王 凯等,2014. 枸杞岛近岸海域食物网的 稳定同位素分析. 生态学杂志,33(4):930—938
- 谢 斌,李云凯,张 虎等,2017.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,28(7):2292—2298
- 蔡文倩,刘 静,周 娟等,2016.基于生物量的大型底栖动 物功能摄食群结构及生态质量评价.生物多样性,24(9): 1045—1055
- 蔡德陵, 毛兴华, 韩贻兵, 1999.¹³C/¹²C 比值在海洋生态系统 营养关系研究中的应用——海洋植物的同位素组成及其 影响因素的初步探讨.海洋与湖沼, 30(3): 306—314
- 蔡德陵,洪旭光,毛兴华等,2001. 崂山湾潮间带食物网结构 的碳稳定同位素初步研究. 海洋学报,23(4):41—47
- 蔡德陵, 李红燕, 唐启生等, 2005. 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, 35(2): 123—130
- Cabello F C, 2006. Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment. Environmental Microbiology, 8(7): 1137—1144
- Deniro M J, Epstein S, 1978. Influence of on the distribution of carbon isotopes in animals. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42(5): 495—506
- DeNiro M J, Epstein S, 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. Geochimica et Cosmochimica Acta, 45(3): 341-351
- Enge A J, Wanek W, Heinz P, 2018. Preservation effects on isotopic signatures in benthic foraminiferal biomass. Marine Micropaleontology, 144: 50—59
- 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

- Finlay J C, Doucett R R, Mcneely C, 2010. Tracing energy flow in stream food webs using stable isotopes of hydrogen. Freshwater Biology, 55(5): 941—951
- Gee J M, 1989. An ecological and economic review of meiofauna as food for fish. Zoo logical Journal of the Linnean Society, 96(3): 243-261
- Hobson K A, Welch H E, 1992. Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using δ^{13} C and δ^{15} N analysis. Marine Ecology Progress Series, 84: 9–18
- Hyslop E J, 1980. Stomach contents analysis a review of methods and their application. Journal of Fish Biology, 17(4), 411-429
- Madurell T, Fanelli E, Cartes J E, 2008. Isotopic composition of carbon and nitrogen of suprabenthic fauna in the NW Balearic Islands(western Mediterranean). Journal of Marine Systems, 71(3-4): 336—345
- Minagawa M, Wada E, 1984. Stepwise enrichment of ¹⁵N along food-chains: Further evidence and the relation between δ^{15} N and animal age. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(5): 1135—1140
- Naylor R L, Goldburg R J, Primavera J H et al, 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. Nature, 405(6790): 1017—1024
- Phillips D L, Gregg J W, 2003. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. Oecologia, 136(2):261-269
- Post D M, 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. Ecology, 83(3): 703-718
- Preciado I, Cartes J E, Punzón A et al, 2017. Food web functioning of the benthopelagic community in a deep-sea seamount based on diet and stable isotope analyses. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 137: 56-68
- Sabo J L, Finlay J C, Kennedy T *et al*, 2010. The Role of Discharge Variation in Scaling of Drainage Area and Food Chain Length in Rivers. Science, 330(6006): 965–967
- Schwarcz H P, 1991. Some theoretical aspects of isotope paleo diet studies. Journal of Archaeological Science, 18(3): 261-275
- Tovar A, Moreno C, Mánuel-Vez M P *et al*, 2000. Environmental implications of intensive marine aquaculture in earthen ponds. Marine Pollution Bulletin, 40(11): 981–988
- Vander Zanden M J, Fetzer W W, 2007. Global patterns of aquatic food chain length. *Oikos*, 116(8): 1378—1388

FOOD WEB STRUCTURE OF MACROBENTHOS IN THE INTERTIDAL ZONE OF YANGMA ISLAND, YANTAI, CHINA

LIU Chun-Yun^{1, 2}, JIANG Shao-Yu^{2, 3}, SONG Bo², YAN Lang^{1, 2}, ZHANG Jian-She¹, LI Bao-Quan^{2, 4}, CHEN Lin-Lin^{2, 4}

(1. Zhejiang Ocean University, National Engineering Research Center For Marine Aquaculture, Zhoushan 316000, China; 2. Key Laboratory of Coastal Biology and Bioresource Utilization, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract To understand the nutrient relationship, food web structure, and their seasonal changes in major benthic communities in Yangma Island, Yantai, Shandong, samples of macrobenthos, sediment particles (SOM), suspended organic matter (POM), phytoplankton, and zooplankton were collected in the intertidal zone of the island in spring (March) and summer (July) 2019. Stable isotopes of carbon and nitrogen in the macrobenthos were measured and analyzed. Results show that the δ^{13} C and δ^{15} N values of macrobenthos were -20.23%—-12.99%, 5.32%—10.45% in spring and -21.91%—-9.88%, 7.01%—14.17% in summer, respectively. The stable isotopes values were greater in summer than those in spring, and the values of the same macrobenthos species changed seasonally. The trophic level of major macrobenthos in two seasons showed no significant change (P>0.05). The nutrition delivery sequence from low to high was filter feeding mollusk \rightarrow polychaete \rightarrow crustacean, which was consistent with the direction of energy flow. **Key words** intertidal zone; macrobenthos; stable isotopes; trophic level