

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.16025

筏式和底播增养殖模式下魁蚶食物来源的比较研究

蔡星媛¹, 张秀梅^{1,2}, 刘旭绪¹, 尤凯¹, 张沛东¹

1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266072

摘要: 2014 年 5 月和 9 月, 运用稳定同位素技术和胃含物分析法, 比较研究了不同增养殖模式下魁蚶(*Anadara broughtonii*)的饵料特征差异, 以期探讨增养殖魁蚶可能的食物来源。结果显示, 魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在明显的季节差异, 在 5 月, 筏养区魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于 9 月, 底播区则表现出相反趋势。5 月, 两种增养殖模式下魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均无明显差异; 9 月, 筏养区魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值均显著高于底播区。以浮游植物为主的颗粒有机物是筏养区魁蚶的主要食物来源, 其贡献率可达 61.0%~62.9%, 附着微藻是其重要的食物补充(37.2%~39.0%); 而底栖微藻则是底播区魁蚶最主要的食物来源, 其贡献率达到 51.7%(5 月)和 72.5%(9 月)。胃含物分析结果显示, 魁蚶主要滤食圆筛藻属(*Coscinodiscus*)、曲舟藻属(*Pleurosigma*)、菱形藻属(*Nitzschia*)和舟形藻属(*Navicula*)种类。底播模式下魁蚶胃含物组成与底栖微藻群落的相似性系数可达 85.30%(5 月)和 77.20%(9 月), 表明魁蚶对水体中的微藻具有一定的选择性, 以浮游性较弱、且易于下沉的硅藻或底栖硅藻类为主。研究结果可为魁蚶筏式养殖和底播增殖的科学管理提供参考。

关键词: 魁蚶; 食物来源; 筏式养殖区; 底播增殖区; 稳定同位素分析; 胃含物分析

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)06-1368-12

贝类的增养殖方式主要包括筏式养殖和底播增殖^[1-2]。筏式养殖, 是将贝类分层放置于网笼中, 后悬挂在预先布置于海区的绠绳上进行养殖; 底播增殖, 则是指将稚贝放流到适合生存的海床上, 待达到一定规格后进行捕捞收获。由于增养殖方式不同, 贝类可利用的潜在食物来源存在较大差异^[3-5], 进而显著影响增养殖贝类的存活和生长。已有研究表明, 在不同增养殖模式下(筏式和底播), 虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)可能的食物来源存在差异^[5]。对筏式养殖的栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)^[6]和珍珠牡蛎(*Pinctada fucata martensii*)^[7]而言, 海区中的颗粒有机物是养殖贝类的主要食物来源, 附着生物、细菌等也是重要的食物补充。而潮间带生长的菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)^[8]等贝类主要滤食颗粒有机物和底

栖微藻。因此, 开展不同增养殖模式下贝类食物来源的研究, 对评估海区增养殖容量和科学管理增养殖生产具有重要意义。

传统的食性分析方法, 如胃含物分析法, 可以简单、直观地反映消费者在短期内的摄食情况^[9-11], 但所需样本量大, 具有一定的局限性。而通过测定消费者及其潜在食物源的稳定同位素组成, 可以有效反映生物体较长一段时间内吸收同化的食物来源信息^[12-13], 并进一步得到各种食物源对消费者的贡献率, 确定其营养级, 因此, 稳定同位素技术被广泛应用于消费者食性关系的研究中^[7, 13-16]。许多学者基于上述两种方法对牡蛎、扇贝和蛤仔等贝类的饵料组成进行了分析^[5, 7-8, 14, 17], 结果均表明, 这些贝类的食物组成受栖息环境与季节变化影响, 主要摄食硅藻类, 还兼食小型原生动物

收稿日期: 2016-01-21; 修订日期: 2016-04-25.

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201405010; 201305043)资助.

作者简介: 蔡星媛(1989-), 女, 硕士研究生, 从事资源增殖生态学研究. E-mail: caixingyuan111@126.com

通信作者: 张秀梅, 教授. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn

及有机碎屑等。

魁蚶(*Anadara broughtonii*)是中国重要的增养殖贝类, 筏式养殖是主要的生产模式^[18], 近年来, 底播增殖也不断得到推广与应用^[19]。目前国内外学者针对常见养殖贝类的饵料来源开展了相关研究, 但关于魁蚶及其潜在食物源营养关系的研究尚未见报道。因此, 本研究对青岛胶南灵山湾贝类增养殖区内魁蚶的稳定同位素特征进行探讨, 分析了筏养和底播两种增养殖模式下魁蚶的可能食物来源差异, 并结合胃含物分析, 比较了魁蚶胃含物组成与环境中浮游植物群落结构的相似性, 以期进一步丰富魁蚶等滤食性贝类的滤食生理生态学基础知识, 为贝类筏式养殖和底播增殖的科学管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

2014年5月(春末)和9月(秋初)在山东省青岛市灵山湾贝类增养殖海域的筏式养殖区(raft mariculture area, RMA。简称: 筏养区。范围 $35^{\circ}54.590'N$, $120^{\circ}07.630'E$ 附近水域; 水深 $4.8\sim6.7\text{ m}$)和底播增殖区(bottom sowing proliferation area: BSPA, 简称: 底播区。范围 $35^{\circ}52.677'N$, $120^{\circ}07.376'E$ 附近

水域; 水深 $11.8\sim13.1\text{ m}$)分别采集样品, 采样站位如图1所示。

依据《海洋调查规范》(GB 12763—2007)^[20]分别采集筏养区和底播区的海水样品, Lugol's 试剂固定后进行浮游植物的分类鉴定和定量计数。同时采集魁蚶及潜在食物源样品, 主要包括魁蚶(*A. broughtonii*)、表层颗粒有机物(surface particular organic matter, SPOM)、底层颗粒有机物(bottom particular organic matter, BPOM)、附着微藻(attached microalgae, AM)和底栖微藻(benthic microalgae, BM)。

魁蚶取样 分别从筏养区和底播区采集2013年同一批次增殖的魁蚶样品15~20只, 其中底播区由潜水员随机捕捉。完成生物学测定后(筏养魁蚶壳长: 5月 $4.51\text{ cm}\pm0.08\text{ cm}$, 9月 $4.58\text{ cm}\pm0.04\text{ cm}$; 底播魁蚶壳长: 5月 $4.31\text{ cm}\pm0.07\text{ cm}$, 9月 $4.54\text{ cm}\pm0.04\text{ cm}$), 剖取魁蚶闭壳肌, 超纯水冲洗除盐, 烘干待测。5~6只魁蚶的闭壳肌混为一个样品, 共3个平行样。

颗粒有机物(POM)取样 分别取筏养区、底播区表层(距水面 0.5 m 处)和底层(距沉积物 0.5 m 处)海水, 经 $200\text{ }\mu\text{m}$ 筛绢过滤后, Whatman GF/F玻璃纤维滤膜(450°C 预先灼烧 5 h)抽滤, 所得膜

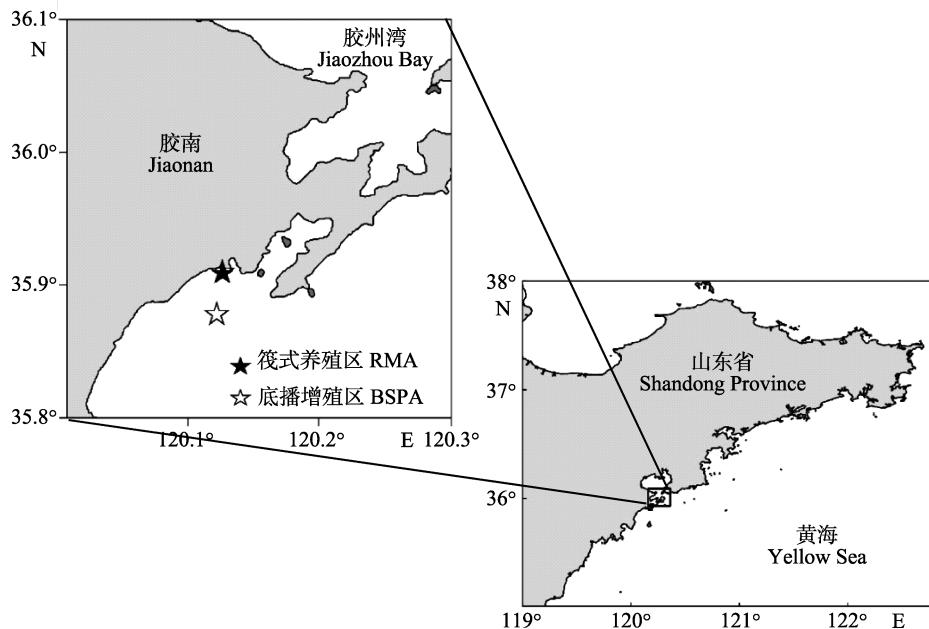


图1 实验研究海区及采样站位
Fig. 1 Location of sampling station in Lingshan Bay, Shandong Province

样品即是 SPOM 和 BPOM, 各设 3 个平行样。

附着微藻(AM)取样 在筏养区内收集的大型藻类、养殖网笼网衣及锚绳经清水泡洗后, 用刀片轻轻刮取其上的附着微藻。将采集到的溶液用 200 μm 筛绢过滤后, 抽滤至玻璃纤维滤膜(GF/F, 预灼烧)上, 所得膜样品即为 AM, 设 3 个平行样。

底栖微藻(BM)取样 潜水员采集底播区表层 0~1 cm 的沉积物, 装入袋中带回。室内采用“沙埋法”^[21]收集 BM, 经 GF/F 滤膜抽滤后所得膜上样品即为 BM, 共 3 个平行样。同时, 分别对 5 月和 9 月的底栖微藻进行镜检, 计数。

1.2 稳定同位素分析

所有样品置于烘箱 60℃ 烘干至恒重。魁蚶样品研磨后除脂, 并将所有样品(包括魁蚶样品和食物源样品)经 1 mol/L 盐酸酸化后超纯水水洗^[22~23], 再次烘干, 研磨, 存放于玻璃瓶中, 干燥保存, 待测。

样品的稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)由 MAT 253 型稳定同位素质谱仪(美国 Thermo Finnigan 公司)测得。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 表示样品与标准物质间的差异千分比, 即:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ 或 } \delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 10^3$$

式中, R_{sample} 表示样品实际测得的同位素比值($R = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), R_{standard} 表示国际通用标准物(V-PDB 标准物或标准大气氮气)的重轻同位素丰度之比。为保证仪器稳定性及实验结果的准确性, 每测试 5 个样品后, 插入 1 个标准样品测定, 且个别样品进行复测。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的测试精度分别小于 0.1‰ 和 0.2‰。

1.3 胃含物分析

每次取样时, 两站位点分别取 9 只规格相近的魁蚶, 轻轻刮取胃内含物, 并用洗瓶反复冲洗, 直至胃内流出清澈液体。将冲洗所得的液体用 5% 的甲醛溶液固定后进行物种鉴定和计数, 浮游植物鉴定到属。

1.4 数据分析与处理

采用 IsoSource 线性混合模型^[24]分析两种增养殖模式下不同食物源对魁蚶的饵料贡献率, 其中魁蚶对饵料的碳同位素分馏度按 0.8‰计算^[7]。

采用比例相似性系数 PS (proportional similarity)^[25]分析魁蚶胃含物与两站位浮游植物群落及底播区底栖微藻群落结构的相似性, 即用各种属在群落中的相对丰度比例来表征每个种属在不同群落结构中的丰度比例差异。PS 取值两个群落中各种属分别所占比例的最小值之和。PS 值越大, 群落相似性越高, 反之则相似性越小。

采用 SPSS 20.0 分析所得的实验数据。使用单因素方差分析和 Duncan 多重比较检验不同食物源的碳氮同位素比值差异; 使用成组数据 *t* 检验比较不同季节和增养殖模式下魁蚶及其潜在食物源碳氮同位素比值的差异。所有数据以平均值±标准误差($\bar{x} \pm \text{SE}$)表示, 显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 两种增养殖模式下魁蚶及其不同食物源的稳定同位素特征

筏养区和底播区魁蚶及其潜在食物源碳、氮同位素值($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值)的测定结果如表 1 所示。经 *t* 检验, 两种增养殖模式下魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值季节变化明显(筏养区 $P=0.014$; 底播区 $P=0.013$), 但 $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著差异(筏养区 $P=0.202$; 底播区 $P=0.138$) (表 2)。筏养魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均表现为 5 月低于 9 月, 但底播魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值则是 5 月大于 9 月。5 月, 两种增养殖模式下魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均无明显差异($\delta^{13}\text{C}$: $P=0.258$; $\delta^{15}\text{N}$: $P=0.168$); 9 月, 筏养区魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值(-18.77‰, 9.07‰)均显著高于底播区(-19.46‰, 8.40‰) (表 3, 图 2)。

筏养魁蚶的潜在食源主要包括 SPOM、BPOM 和 AM; 底播区魁蚶的食物组成则包括 SPOM、BPOM 和 BM。由表 1 可知, 筏养区和底播区食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 -22.40‰~ -16.40‰ 和 -23.26‰~ -18.72‰, $\delta^{15}\text{N}$ 值分布区间则为 6.16‰~ 7.96‰ 和 6.07‰~ 7.20‰, 以底播区食源的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变幅更窄。单因素方差分析显示, 不同季节两种增养殖模式下, 食物源间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均存在显著差异($P < 0.05$), 因此可利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行食物源的区分。

各食物源的稳定同位素组成存在季节性变化

表1 两种增养殖模式下魁蚶和食物源的稳定碳、氮同位素值

Tab. 1 Carbon and nitrogen stable isotope values of *A. broughtonii* and food sources under the two culture models $n=3; \bar{x} \pm SE$

样品 sample	$\delta^{13}\text{C}(\text{\textperthousand})$		$\delta^{15}\text{N}(\text{\textperthousand})$	
	筏养区 RMA	底播区 BSPA	筏养区 RMA	底播区 BSPA
消费者 consumer				
魁蚶(5月) <i>A. broughtonii</i> (May)	-19.12±0.08	-18.99±0.06	8.90±0.11	8.63±0.11
魁蚶(9月) <i>A. broughtonii</i> (Sep.)	-18.77±0.03	-19.46±0.09	9.07±0.03	8.40±0.06
潜在食物来源 food source				
5月 May 表层颗粒有机物 SPOM	-22.40±0.08 ^a	-23.26±0.10 ^a	7.06±0.11 ^a	7.12±0.12 ^a
底层颗粒有机物 BPOM	-21.55±0.22 ^b	-21.37±0.16 ^b	7.28±0.12 ^a	6.60±0.23 ^{ab}
附着微藻 AM	-16.81±0.08 ^c	-	6.16±0.07 ^b	-
底栖微藻 BM	-	-18.99±0.11 ^c	-	6.07±0.20 ^b
9月 Sep. 表层颗粒有机物 SPOM	-21.77±0.07 ^a	-22.10±0.13 ^a	6.77±0.15 ^a	6.26±0.18 ^{ab}
底层颗粒有机物 BPOM	-21.22±0.02 ^b	-21.62±0.07 ^b	7.96±0.12 ^b	7.20±0.03 ^a
附着微藻 AM	-16.40±0.02 ^c	-	7.40±0.07 ^c	-
底栖微藻 BM	-	-18.72±0.04 ^c	-	6.40±0.02 ^b

注: AM 代表附着微藻, BM 代表底栖微藻, BPOM 代表底层颗粒有机物, BSPA 代表底播增殖区, RMA 代表筏式养殖区, SPOM 代表表层颗粒有机物。同一列中的小写字母表示不同食物源间的差异($P<0.05$)。

Note: AM stands for attached microalgae; BM stands for benthic microalgae; BPOM stands for bottom particular organic matter; BSPA stands for bottom sowing proliferation area; RMA stands for raft mariculture area; SPOM stands for surface particular organic matter. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences for food sources ($P<0.05$).

表2 两种增养殖模式下魁蚶及其食物源稳定同位素比值的季节变化

Tab. 2 Seasonal shifts in carbon and nitrogen stable isotope values of *A. broughtonii* and food sources under the two culture models

样品 sample	筏养区 RMA				底播区 BSPA			
	$\delta^{13}\text{C}(\text{\textperthousand})$		$\delta^{15}\text{N}(\text{\textperthousand})$		$\delta^{13}\text{C}(\text{\textperthousand})$		$\delta^{15}\text{N}(\text{\textperthousand})$	
	t	P	t	P	t	P	t	P
消费者 consumer								
魁蚶 <i>A. broughtonii</i>	-4.207	0.014	-1.525	0.202	4.300	0.013	1.848	0.138
潜在食物源 food sources								
SPOM	-6.081	0.004	1.556	0.195	-6.976	0.002	3.924	0.017
BPOM	-1.514	0.266	-3.964	0.017	1.415	0.230	-2.580	0.118
AM	-4.713	0.009	-12.076	<0.001	-	-	-	-
BM	-	-	-	-	-2.418	0.073	-1.625	0.179

注: AM 代表附着微藻, BM 代表底栖微藻, BPOM 代表底层颗粒有机物, BSPA 代表底播增殖区, RMA 代表筏式养殖区, SPOM 代表表层颗粒有机物。使用成组数据 t 检验。

Note: AM stands for attached microalgae; BM stands for benthic microalgae; BPOM stands for bottom particular organic matter; BSPA stands for bottom sowing proliferation area; RMA stands for raft mariculture area; SPOM stands for surface particular organic matter. Using two-group t -test.

(表2, 图2)。在筏养区, 9月采集的SPOM和AM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显比5月富集($P<0.05$), BPOM和AM的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也高于5月。在底播区, SPOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值具有明显的季节变化($P=0.002$; $P=0.017$), 但BPOM和BM均无显著差异。此外, 不同增养殖模式下各食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值也存在一定差异(表3, 图2), 筏养区AM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于底播区BM($P<0.001$)。5月, 筏养区SPOM的

$\delta^{13}\text{C}$ 值明显大于底播区($P=0.002$); 9月, 筏养区BPOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值相比底播区更富集($P<0.05$)。

2.2 两种增养殖模式下不同食物源对魁蚶的营养贡献

筏养区和底播区各食物源对魁蚶的饵料贡献率及其季节变化如图3所示。筏养区SPOM、BPOM和AM的饵料贡献率在5月分别为25.7%、37.2%和37.1%, 9月, AM的饵料贡献率增长了

表 3 两种增养殖模式下魁蚶及其食物源稳定同位素比值的比较

Tab. 3 Comparison of carbon and nitrogen stable isotope values of *A. broughtonii* and food sources under the two culture model

样品 sample 筏养区 vs. 底播区 RMA vs. BSPA	5月 May				9月 Sep.			
	$\delta^{13}\text{C}(\text{\textperthousand})$		$\delta^{15}\text{N}(\text{\textperthousand})$		$\delta^{13}\text{C}(\text{\textperthousand})$		$\delta^{15}\text{N}(\text{\textperthousand})$	
	t	P	t	P	t	P	t	P
消费者 consumer								
魁蚶 <i>A. broughtonii</i>	-1.317	0.258	1.683	0.168	7.096	0.002	10.075	0.001
潜在食物源 food source								
SPOM	6.835	0.002	-0.324	0.762	2.168	0.096	2.177	0.095
BPOM	-0.658	0.546	2.615	0.059	5.212	0.006	6.219	0.003
AM vs BM	16.164	<0.001	0.402	0.709	47.180	<0.001	13.640	<0.001

注: AM 代表附着微藻, BM 代表底栖微藻, BPOM 代表底层颗粒有机物, BSPA 代表底播增殖区, RMA 代表筏式养殖区, SPOM 代表表层颗粒有机物。使用成组数据 t 检验。

Note: AM stands for attached microalgae; BM stands for benthic microalgae; BPOM stands for bottom particular organic matter; BSPA stands for bottom sowing proliferation area; RMA stands for raft mariculture area; SPOM stands for surface particular organic matter. Using two-group t-test.

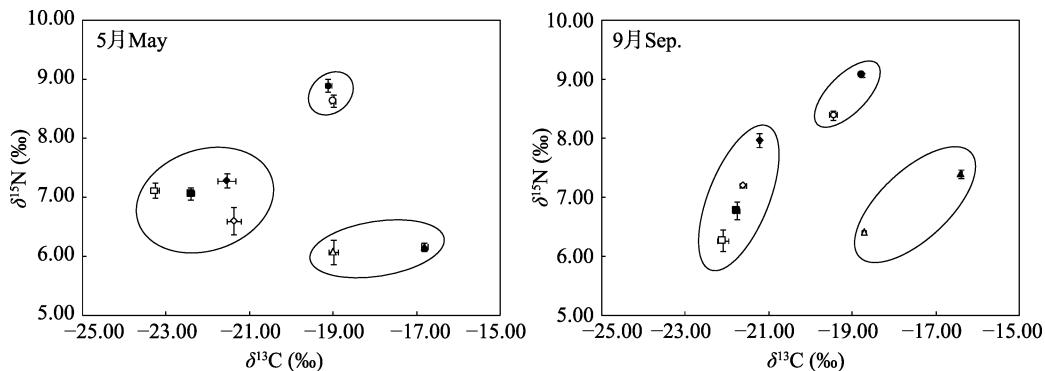


图 2 两种增养殖模式下魁蚶及其食物源的稳定同位素特征值的季节变化

- 表示筏养魁蚶; ○ 表示底播魁蚶; ■ 表示筏养区表层颗粒有机物(SPOM); □ 表示底播区表层颗粒有机物(SPOM);
- ◆ 表示筏养区底层颗粒有机物(BPOM); ◇ 表示底播区底层颗粒有机物(BPOM); ▲ 表示附着微藻(AM);
- △ 表示底栖微藻(BM)。误差线表示 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的标准误差。

Fig. 2 Seasonal changes in carbon and nitrogen stable isotope values of *A. broughtonii* and food sources under the two culture models

- : *A. broughtonii* in RMA; ○: *A. broughtonii* in BSPA; ■: SPOM in RMA; □: SPOM in BSPA; ◆: BPOM in RMA;
- ◇: BPOM in BSPA; ▲: AM; △: BM. Error bars indicate standard deviations.

1.05 倍, 达到 39.0%, SPOM 和 BPOM 的贡献率则分别下降了 0.7% 和 1.2%。底播区 BM 的贡献率从 51.7% (5 月) 明显增大至 72.5% (9 月), 是底播魁蚶的重要食物来源。5 月, 筏养区和底播区 SPOM 的饵料贡献率近似, 底播区 BPOM 的贡献率较筏养区减少 14.7%; 9 月, 底播区 POMs 的饵料贡献率仅为 27.5%, 显著小于筏养区的 61%, 说明底播魁蚶倾向于直接滤食沉积物上的底栖微藻。

2.3 魁蚶胃含物与环境中浮游植物群落的相似性比较

两站位点内采集的水样共鉴定出浮游植物 4 门 33 属 51 种(含变种和变型), 硅藻是优势类群,

其中圆筛藻(*Coscinodiscus* sp.)、斯氏几内亚藻(*Guinardia striata*)、曲舟藻(*Pleurosigma* spp.)和尖刺拟菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)在两站位点的不同季节内均有出现。胃含物分析结果显示, 筏养魁蚶和底播魁蚶以摄食硅藻为主, 主要包括圆筛藻属(*Coscinodiscus*)、曲舟藻属(*Pleurosigma*)、菱形藻属(*Nitzschia*)和舟形藻属(*Navicula*)种类; 其次, 还有一定量的骨条藻属(*Skeletonema*)和筒柱藻属(*Cyclotilica*)种类。甲藻在魁蚶胃含物中所占比例极少。

筏养区 5 月采集的水样共鉴定浮游植物 3 门 11 科 18 属 22 种, 其中硅藻 18 种, 相对丰度 95.33%,

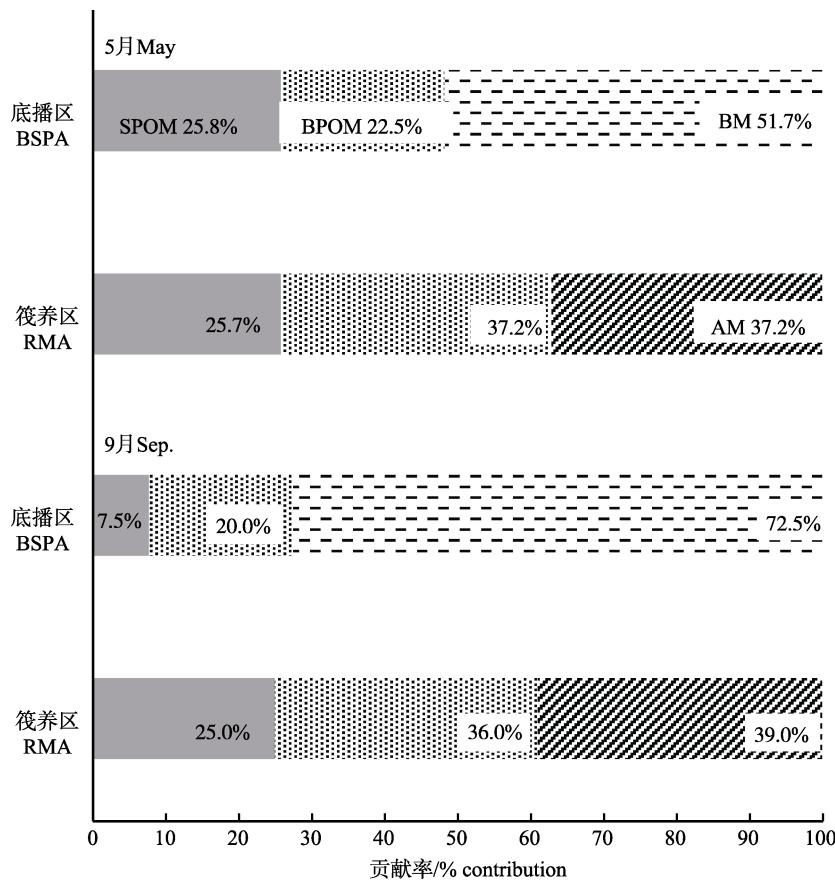


图3 两种增养殖模式下各食物源对魁蚶的饵料贡献率及其季节变化

AM代表附着微藻, BM代表底栖微藻, BPOM代表底层颗粒有机物, SPOM代表表层颗粒有机物。

Fig. 3 Seasonal changes in contribution (%) of food sources (SPOM, BPOM and AM or BM) of *A. brougonii* under the two culture models

AM stands for attached microalgae; BM stands for benthic microalgae; BPOM stands for bottom particular organic matter; SPOM stands for surface particular organic matter.

中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)为绝对优势种(90.51%)。9月有3门10科19属27种,其中硅藻25种(99.76%)。5月,筏养魁蚶的胃含物主要以菱形藻属、圆筛藻属、曲舟藻属、骨条藻属种类为主,9月则是菱形藻属、角毛藻属(*Chaetoceros*)、圆筛藻属、曲舟藻属、骨条藻属和舟形藻属种类占绝对优势。筏养魁蚶胃含物中各浮游植物种类的相对丰度比例季节变化明显,且与筏养区水体浮游植物的丰度比存在显著差异,两者的群落相似性系数PS仅为22.80%(5月)和38.95%(9月)(表4)。

底播区5月表层采集的水样共鉴定出浮游植物2门11科18属20种。其中硅藻13种(98.62%),底层有3门6科11属14种,其中硅藻11种(97.48%);9月表层有2门11科21属29种,其中硅藻25种

(97.17%);底层有3门9科19属30种,其中硅藻27种(99.08%)。5月,底播魁蚶的胃含物以圆筛藻属、菱形藻属、舟形藻属和曲舟藻属种类的比例最高,和底栖微藻中丰度最高的4个种属相一致,但却不同于底层水体中丰度前四位的浮游植物种类。底播魁蚶胃含物与底栖微藻和底层水体中浮游植物组成的PS值分别为85.30%和55.60%(表5)。9月,底层水体以角毛藻属种类最多(59.77%),几内亚藻属(*Guinardia*)和根管藻属(*Rhizosolenia*)次之,但魁蚶胃含物的优势种主要是圆筛藻属、舟形藻属、曲舟藻属、菱形藻属和几内亚藻属种类,更接近于底栖微藻的群落结构。底播魁蚶胃含物与底层水体浮游植物及底栖微藻群落的PS值分别为33.10%和77.20%(表5),底播魁蚶胃含物组成与底栖微藻群落的相似性更高。

表4 2014年5月和9月筏式养殖区魁蚶胃含物与水体浮游植物丰度相似性比例
Tab. 4 Proportional similarity of phytoplankton abundance between water and stomach contents under raft culture model in May and September 2014

种类 species	胃含物组成 composition of stomach contents	水体浮游植物组成 composition of phyto- plankton in water column			%
			5月 May	9月 Sep.	
硅藻门	曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	0.00	0.08	0.00	0.00
Bacillariophyta	星杆藻属 <i>Asterionella</i>	0.00	0.08	0.00	0.35
	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	18.60	1.66	22.30	3.80
	辐杆藻属 <i>Bacteriastrum</i>	0.00	0.00	0.00	1.23
	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	9.10	1.20	10.70	25.01
	圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i>	16.00	0.04	8.70	0.35
	双壁藻属 <i>Diploneis</i>	4.20	0.04	0.00	0.00
	筒柱藻属 <i>Cyclotheaca</i>	0.80	0.77	1.20	1.05
	几内亚藻属 <i>Guinardia</i>	0.00	0.31	3.80	18.76
	楔形藻属 <i>Licmophora</i>	0.00	0.08	0.00	0.00
	舟形藻属 <i>Navicula</i>	1.20	0.50	8.50	0.47
	曲舟藻属 <i>Pleurosigma</i>	13.70	0.04	16.90	0.09
	盒形藻属 <i>Odentella</i>	0.00	0.00	0.90	0.12
	弯角藻属 <i>Eucampia</i>	0.00	0.00	0.00	5.20
	根管藻属 <i>Rhizosolenia</i>	0.00	0.00	8.60	28.63
	半管藻属 <i>Hemiaulus</i>	0.00	0.00	0.00	0.41
	细柱藻属 <i>Leptocylindrus</i>	0.00	0.00	0.00	1.81
	骨条藻属 <i>Skeletonema</i>	18.40	90.51	9.80	10.52
	直链藻属 <i>Melosira</i>	0.00	0.00	0.00	1.87
	海链藻属 <i>Thalassiosira</i>	10.70	0.04	0.00	0.12
甲藻门	角藻属 <i>Ceratium</i>	0.00	0.15	0.00	0.00
Pyrrophyta	翅甲藻属 <i>Dinophysis</i>	0.00	0.04	0.00	0.00
	环沟藻属 <i>Gyrodinium</i>	0.50	0.12	0.00	0.00
	多甲藻属 <i>Peridinium</i>	0.00	0.00	0.30	0.18
金藻门 Chrysophyta	网骨藻属 <i>Dictyocha</i>	0.00	0.00	0.00	0.06
裸藻门 Euglenophyta	双鞭藻属 <i>Eutreptia</i>	0.00	4.36	0.00	0.00
其他 others		6.80	0.00	8.30	0.00
群落相似性系数 PS proportional similarity		22.80		38.95	

3 讨论

3.1 增养殖模式对魁蚶及其食物源稳定同位素特征的影响

研究表明, 浮游植物来源的颗粒有机物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 $-23.3\text{\textperthousand}$ ~ $-18\text{\textperthousand}$ 和 $3.3\text{\textperthousand}$ ~ $11.1\text{\textperthousand}$ ^[26-28]。灵山湾贝类增养殖区内 POMs 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-23.26\text{\textperthousand}$ ~ $-21.22\text{\textperthousand}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $6.26\text{\textperthousand}$ ~ $7.96\text{\textperthousand}$, 都介于上述范围内, 因此认为两站位点内的颗粒有机物主要由浮游植物组成, 受陆源有机碎屑影响

较小。随着水温升高, 增养殖区内浮游植物迅速生长、繁殖, 特别是 $\delta^{13}\text{C}$ 较为富集的内源性浮游植物快速增多^[29], 使9月筏养区 POMs 和底播区 SPOM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均大于5月。和浮游植物相比, AM 与 BM 富集了更多的 ^{13}C , 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值也均处在已报道的附着生物($-19.7\text{\textperthousand}$ ~ $-11.4\text{\textperthousand}$)^[28, 30] 和底栖微藻($-22.2\text{\textperthousand}$ ~ $-13.7\text{\textperthousand}$)^[27-28, 30] 范围内, 且 AM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于 BM, 推测附着微藻的组成种类具有更高的 ^{13}C 富集。9月 AM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于5月, 分析可能与秋初时节筏养区的太阳辐射水

表5 2014年5月和9月底播增殖区魁蚶胃含物与水体底层浮游植物、底栖微藻丰度相似性比例
Tab. 5 Proportional similarity of phytoplankton abundance among underlying water, benthic microalgae and stomach contents in BSPA in May and September 2014

种类 species		5月 May		9月 Sep.		%
		胃含物组成 composition of stomach con- tents	底层水体浮 游植物组成 composition of phytoplankton underlying water	底栖微藻组成 composition of benthic micro- algae	胃含物组成 composition of stomach con- tents	
硅藻门 Bacillariophyta	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	6.40	0.00	6.20	8.30	59.77
	圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i>	17.80	2.99	21.50	13.80	0.29
	几内亚藻属 <i>Guinardia</i>	8.30	7.58	3.40	10.50	11.74
	舟形藻属 <i>Navicula</i>	12.60	26.41	17.20	10.20	1.64
	曲舟藻属 <i>Pleurosigma</i>	12.60	1.03	15.30	10.60	0.29
	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	15.80	39.72	16.70	12.50	3.75
	海链藻属 <i>Thalassiosira</i>	3.60	1.84	3.80	6.20	0.38
	骨条藻属 <i>Skeletonema</i>	11.20	17.91	13.80	0.00	0.00
	莹形藻属 <i>Amphiprora</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48
	星杆藻属 <i>Asterionella</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15
	辐杆藻属 <i>Bacteriastrum</i>	0.00	0.00	0.00	0.80	1.44
	细柱藻属 <i>Leptocylindrus</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15
	筒柱藻属 <i>Cyclothecea</i>	0.00	0.00	0.00	8.60	0.19
	直链藻属 <i>Melosira</i>	0.00	0.00	0.00	2.40	5.87
甲藻门 Pyrrophyta	根管藻属 <i>Rhizosolenia</i>	0.00	0.00	0.00	2.60	10.73
	海线藻属 <i>Thalassionema</i>	0.00	0.00	0.00	1.20	0.19
金藻门 Chrysophyta	角藻属 <i>Ceratium</i>	2.10	1.49	1.30	0.00	0.00
	环沟藻属 <i>Gyrodinium</i>	1.20	0.81	0.80	1.80	0.34
	多甲藻属 <i>Peridinium</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19
其他 others	网骨藻属 <i>Dictyocha</i>	0.20	0.23	0.00	0.00	0.38
	群落相似性系数 PS proportional similarity	8.20	0.00	0.00	10.50	0.00
		55.60	85.30		33.10	77.20

平较高有关。通常, 太阳辐射水平的升高使浮游植物对C的需求量增大, 初级生产者的¹³C代谢能力减弱, 进而实现AM的¹³C富集^[31]。相比之下, 太阳辐射差异对底播区沉积物上的BM影响较小, 故BM的¹³C值并未表现出明显的季节差异。

养殖海区浮游植物组成及其可利用性的季节变化会对滤食性贝类的生长、存活产生影响^[3, 32-33], 并体现为消费者同位素特征值的差异^[34]。白富进^[35]研究指出, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值在牡蛎闭壳肌中的富集或贫化随生长环境的变化而发生改变。但Nadon等^[36]却指出, 近岸海区和离岸海区底栖消费者间

的 $\delta^{13}\text{C}$ 值不会因生活环境的水深变化而存在差异。本研究结果显示, 无论是筏养区或底播区, 浮游植物组成和数量的季节变化均使魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现差异, 但 $\delta^{15}\text{N}$ 值无明显变化。5月, 两种增养殖模式下魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值不存在明显差异; 9月, 筏养魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著高于底播区, 分析是随着太阳辐射水平及日照时间的增加(5月→9月), 筏养区内 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值较为富集的浮游植物数量逐渐多于底播区, 加之高温、大风降雨、水深等环境变化对增养殖海区饵料组成的影响, 进而通过食物关系表现在魁蚶的稳定同位素组成上。

3.2 增养殖模式对魁蚶及其食物源营养关系的影响

一般认为,沉积物表层的底栖微藻通过再悬浮作用成为底层颗粒有机物的重要组成,是滤食性生物的潜在食物来源^[37]。在筏养区和底播区内,底层颗粒有机物BPOM对魁蚶的饵料贡献率均达到了20.0%以上,是其重要的食物来源之一。附着微藻AM在筏养魁蚶的营养关系中扮演重要角色,饵料贡献率分别达到了37.2%(5月)和39.0%(9月),分析可能是因为网笼上污损生物的大量繁殖和生长阻碍了养殖网笼内外的水体交换,且污损生物与魁蚶的食物竞争关系逐渐增强,导致魁蚶对AM的滤食增加。因此,附着微藻是筏养魁蚶的重要食物补充,这一结论在Fukumori等^[7]对笼养珍珠牡蛎的研究中亦有报道,而Jaschinski等^[30]也指出,海草上的附着微藻是调查海区内食物网的重要初级生产者。另外,蔡德陵等^[38]研究指出,底栖微藻是海洋生态系统中底栖消费者的重要食物来源。本研究结果显示,底栖微藻BM对底播魁蚶具有极高的饵料贡献率(5月:51.7%→9月:72.5%),推测夏季的大风大浪及暴雨天气加剧了底播区沉积物的再悬浮作用^[39–40],使更多的BM容易被魁蚶滤食。类似结果也在Doi等^[41]研究中得到证实,底栖硅藻对河口大型底栖动物的饵料贡献率因调查站位空间和水文条件的差异而有所不同。

筏养魁蚶对浮游性饵料颗粒有机物的滤食较多;底播魁蚶则以底栖微藻为最主要的食物来源。由于底栖性饵料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常大于浮游性饵料^[42],即BM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于POMs,所以进一步解释了5月底播魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值略高于筏养魁蚶。而9月 $\delta^{13}\text{C}$ 富集的附着微藻对筏养魁蚶的贡献度有所增大,从而使底播魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于筏养魁蚶,XU等^[42]、张欢等^[43]的研究亦支持了上述结果。而筏养魁蚶的 $\delta^{15}\text{N}$ 值高于底播魁蚶,也符合浮游食性的消费者通常所具有的“低 $\delta^{13}\text{C}$ 值、高 $\delta^{15}\text{N}$ 值”的稳定同位素特征^[44]。由此推断,两种增养殖环境中不同食物源的生物量及其分布会影响其对魁蚶的饵料贡献率,进而使魁蚶的碳氮稳定同位素值存在一定差异。

3.3 魁蚶的滤食选择性

通常,滤食性双壳贝类通过鳃过滤食物,由于鳃丝结构的不同,对饵料生物大小、形态具有一定的选择性^[45],其食物组成亦会因栖息水域环境和饵料组成的季节性差异而有所不同^[10]。胃含物分析发现,魁蚶的滤食作用虽受海区内优势饵料季节变化的影响,但均以滤食硅藻类为主,包括圆筛藻属、曲舟藻属、菱形藻属和舟形藻属,还有一定量的筒柱藻属和骨条藻属种类。这些硅藻多数不是增养殖区内的优势种,但因个体小,无角毛、棘等易被魁蚶大量滤食,而具有角毛、棘等坚硬结构的甲藻、角毛藻等浮游植物种类则极少被滤食,或因难以消化以假粪形式直接排出。

研究发现,筏养魁蚶和底播魁蚶的胃含物组成与水体中浮游植物组成的相似性系数均较低,表明魁蚶的食物组成与水体浮游植物群落的季节变化并非完全吻合,其主要滤食种类不存在明显的季节差异。但5月和9月底播魁蚶胃含物组成与底栖微藻群落的相似性均超过了77.20%,分析是因为底栖微藻的群落组成相对简单,种类较少,且多为魁蚶适宜滤食的浮游植物种类属。

4 小结

(1) 增养殖海区饵料生物组成的季节变化会对魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值产生影响。两种增养殖模式下,魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均呈现明显的季节变化, $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著差异。5月,筏养魁蚶与底播魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均无明显差异;9月,筏养魁蚶的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值则显著高于底播魁蚶。

(2) 魁蚶的滤食作用虽受海区内优势饵料生物季节变化的影响,但主要滤食浮游性较弱、易于下沉的硅藻或底栖硅藻,包括圆筛藻属、曲舟藻属、菱形藻属和舟形藻属等种类。

(3) 海区再悬浮作用使底层颗粒有机物成为增养殖魁蚶重要的食物来源之一。筏养区魁蚶以滤食颗粒有机物(主要是浮游植物)为主,附着微藻是重要的食物补充;底播区魁蚶以底栖微藻为最主要的食物源。

参考文献

- [1] Bergh Ø, Strand Ø. Great scallop, *Pecten maximus*, research and culture strategies in Norway: a review[J]. Aquaculture International, 2001, 9(4): 305–317.
- [2] Mendoza Y, Freites L, Lodeiro C J, et al. Evaluation of biological and economical aspects of the culture of the scallop *Lyropecten (Nodipecten) nodosus* in suspended and bottom culture[J]. Aquaculture, 2003, 221(1): 207–219.
- [3] Bricelj V M, Shumway S. Physiology: Energy Acquisition and Utilization[M]/Scallops: Biology, Ecology and Aquaculture. Amsterdam: Elsevier, 1991, 21: 305–376.
- [4] Crocker K M, Passow U. Differential aggregation of diatoms[J]. Mar Ecol Prog Ser Oldendorf, 1995, 117(1): 249–257.
- [5] Aya F A, Kudo I. Isotopic determination of Japanese scallop *Patinopecten (Mizuhopecten) yessoensis* (Jay) tissues shows habitat-related differences in food sources[J]. J Shellfish Res, 2007, 26(2): 295–302.
- [6] Xu Q, Yang H S, Wang H, et al. Food sources of cultured scallop *Chlamys farreri* in Sanggou Bay: indicated by fatty acid biomarkers[J]. Marine Sciences, 2007, 31(9): 78–84. [许强, 杨红生, 王红, 等. 桑沟湾养殖栉孔扇贝食物来源研究—脂肪酸标志法[J]. 海洋科学, 2007, 31(9): 78–84.]
- [7] Fukumori K, Oi M, Doi H, et al. Food sources of the pearl oyster in coastal ecosystems of Japan: Evidence from diet and stable isotope analysis[J]. Estu Coast Shellfish Sci, 2008, 76(3): 704–709.
- [8] Zhao L, Yan X, Yang F. Food sources of the Manila clam *Ruditapes philippinarum* in intertidal areas: evidence from stable isotope analysis[J]. Chin J Oceanol Limnol, 2013, 31(4): 782–788.
- [9] Dou S Z. Fish-stomach content analysis, methods and application[J]. Marine Science Bulletin, 1992, 11(2): 28–31. [窦硕增. 鱼类胃含物分析的方法及其应用[J]. 海洋通报, 1992, 11(2): 28–31.]
- [10] Wang J. A preliminary study on feeding habits and seasonal variation of diet of *Scapharca broughtonii*[J]. Marine Fisheries Research, 1994, 15: 65–70. [王俊. 魁蚶食性及摄食季节变化的初步研究[J]. 海洋水产研究, 1994, 15: 65–70.]
- [11] Han D Y. Study on feeding ecology of dominate gobiid fishes in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. [韩东燕. 胶州湾主要虾虎鱼类摄食生态的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.]
- [12] Vander Zanden M, Rasmussen J B. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies[J]. Limnol Oceanogr, 2001, 46(8): 2061–2066.
- [13] Lin G H. Stable Isotope Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 161–162. [林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 161–162.]
- [14] Suh Y J, Shin K-H. Size-related and seasonal diet of the manila clam (*Ruditapes philippinarum*), as determined using dual stable isotopes[J]. Estuar Coast Shellfish Sci, 2013, 135: 94–105.
- [15] Zheng X Q, Wang Q, Huang L F, et al. Feeding habits for two dominant amphipod species in the Yundang Lagoon based on stable carbon and nitrogen isotope analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7589–7597. [郑新庆, 王倩, 黄凌风, 等. 基于碳氮稳定同位素的厦门筼筜湖两种优势端足类食性分析[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7589–7597.]
- [16] Lu Z C, Tian J S, Wang Z H, et al. Using stable isotope technique to study feeding habits of the finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 69–76. [鹿志创, 田甲申, 王召会, 等. 应用碳氮稳定同位素技术研究江豚(*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*)食性[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 69–76.]
- [17] Kasim M, Mukai H. Contribution of benthic and epiphytic diatoms to clam and oyster production in the Akkeshiko estuary[J]. J Oceanogr, 2006, 62(3): 267–281.
- [18] Wang X L. Raft culturing technique of *Anadara broughtonii*[J]. China Fisheries, 1997(3): 31–32. [王兴林. 魁蚶筏式养殖技术[J]. 中国水产, 1997(3): 31–32.]
- [19] Song Y J, Guo X Q. The practicable discussion of the ark shell *Anadara broughtonii* sowed in Rongcheng[J]. Shandong Fisheries, 2010(8): 53–54. [宋云杰, 郭旭强. 荣成市魁蚶底播增殖可行性探讨[J]. 齐鲁渔业, 2010(8): 53–54.]
- [20] The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB 12763–2007. The specification for oceanographic research (Part sixth): survey of marine life[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家质量技术监督局. GB 12763–2007 海洋调查规范(第6部分): 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [21] Zheng X Q, Huang L F, Du J G, et al. The source of particulate organic matter and sedimentation organic matter during macroalgal bloom in Yundang Lagoon[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(5): 102–111. [郑新庆, 黄凌风, 杜建国, 等. 筼筜湖绿潮期间颗粒有机物及沉积有机物的来源研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(5): 102–111.]
- [22] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. Can J Biochem Physiol, 1959, 37(8): 911–917.
- [23] Jacob U. Stable isotope food web studies a case for standardized sample treatment[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2005, 287: 251–253.
- [24] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable

- isotopes: coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261–269.
- [25] Whittaker R H. A study of summer foliage insect communities in the Great Smoky Mountains[J]. *Ecolog Monogr*, 1952, 22: 1–44.
- [26] Cai D L, Meng F, Han Y B, et al. Studies on $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios as a tracer for food web in a marine ecosystem—The trophic relations in pelagic food webs in Laoshan Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 30(6): 671–678. [蔡德陵, 孟凡, 韩贻兵, 等. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值作为海洋生态系统食物网示踪剂的研究——崂山湾水体生物食物网的营养关系[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(6): 671–678.]
- [27] Shang X, Zhang G S, Zhang J. Relative importance of vascular plants and algal production in the food web of a Spartina-invaded salt marsh in the Yangtze River estuary[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2008, 367: 93–107.
- [28] Baeta A, Pinto R, Valiela I, et al. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in the Mondonedo estuary food web: seasonal variation in producers and consumers[J]. *Mar Environ Res*, 2009, 67(3): 109–116.
- [29] Zheng X Q, Huang L F, Lin R C. Seasonal shifts in food sources influence feeding habits of three macrozoobenthos species in the Yundang Lagoon: the evidence from stable isotope[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(12): 32–40. [郑新庆, 黄凌风, 林荣澄. 环境饵料丰度的季节变化对筼筜湖 3 种大型底栖动物食性的影响—来自稳定同位素的证据[J]. 海洋学报, 2014, 36(12): 32–40.]
- [30] Jaschinski S, Brephohl D C, Sommer U. Carbon sources and trophic structure in an eelgrass (*Zostera marina* L.) bed based on stable isotope and fatty acid analyses[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2008, 358: 103–114.
- [31] Durako M J, Hall M O. Effects of light on the stable carbon isotope composition of the seagrass *Thalassia testudinum*[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1992, 86: 99–101.
- [32] Bayne B L, Svensson S. Seasonal variability in feeding behaviour, metabolic rates and carbon and nitrogen balances in the Sydney oyster, *Saccostrea glomerata* (Gould)[J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 2006, 332(1): 12–26.
- [33] Peharda M, Richardson C A, Mladineo I, et al. Age, growth and population structure of *Modiolus barbatus* from the Adriatic[J]. *Mar Biol*, 2007, 151(2): 629–638.
- [34] Madurell T, Fanelli E, Cartes J E. Isotopic composition of carbon and nitrogen of suprabenthic fauna in the NW Baleares Islands (western Mediterranean)[J]. *J Mar Sys*, 2008, 71(3): 336–345.
- [35] Bai F J. Preliminary study the spatial and temporal distribution of carbon and nitrogen isotope in *Ostrea rivularis Gould* and the response to inorganic nitrogen, Zhanjiang Harbor[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2010. [白富进. 湛江港近江牡蛎中碳氮同位素时空分布及其对无机氮响应的初步研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2010.]
- [36] Nadon M O, Himmelman J H. Stable isotopes in subtidal food webs: Have enriched carbon ratios in benthic consumers been misinterpreted?[J]. *Limnol Oceanogr*, 2006, 51(6): 2828–2836.
- [37] Kanaya G, Nobata E, Toya T, et al. Effects of different feeding habits of three bivalve species on sediment characteristics and benthic diatom abundance[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2005, 299: 67–78.
- [38] Cai D L, Hong X G, Mao X H. Preliminary studies on trophic structure of tidal zone in the Laoshan Bay by using carbon stable isotope[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 41–47. [蔡德陵, 洪旭光, 毛兴华. 崂山湾潮间带食物网结构的碳稳定同位素初步研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 41–47.]
- [39] Navarro J M, Widdows J. Feeding physiology of *Cerastoderma edule* in response to a wide range of seston concentrations[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1997, 152: 175–186.
- [40] Davies A M, Xing J, Huthnance J M, et al. Models of near-bed dynamics and sediment movement at the Iberian margin[J]. *Prog Oceanogr*, 2002, 52(2): 373–397.
- [41] Doi H, Matsumasa M, Toya T, et al. Spatial shifts in food sources for macrozoobenthos in an estuarine ecosystem: carbon and nitrogen stable isotope analyses[J]. *Estu Coast Shelf Sci*, 2005, 64(2): 316–322.
- [42] Xu J, Zhang M, Xie P. Stable isotope changes in freshwater shrimps (*Exopalaemon modestus* and *Macrobrachium nipponensis*): trophic pattern implications[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 605(1): 45–54.
- [43] Zhang H, Xie P, Wu G G, et al. Studies on trophic niches of *Macrobrachium nipponensis* and *Exopalaemon modestus*[J]. *Research of Environment Science*, 2013, 26(1): 22–26. [张欢, 谢平, 吴功绩, 等. 日本沼虾与秀丽白虾的营养生态位[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 22–26.]
- [44] Bunn S E, Davies P M, Winning M. Sources of organic carbon supporting the food web of an arid zone floodplain river[J]. *Freshw Biol*, 2003, 48(4): 619–635.
- [45] Defossez J M, Hawkins A J S. Selective feeding in shellfish: size-dependent rejection of large particles within pseudofaeces from *Mytilus edulis*, *Ruditapes philippinarum* and *Tapes decussatus*[J]. *Mar Biol*, 1997, 129(1): 139–147.

Comparative study of food sources of *Anadara broughtonii* in raft mariculture and bottom sowing proliferation

CAI Xingyuan¹, ZHANG Xiumei^{1,2}, LIU Xuxu¹, YOU Kai¹, ZHANG Peidong¹

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Laboratory for Marine Fisheries and Aquaculture, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266072, China

Abstract: Marine coastal ecosystems are commonly used for the aquaculture of suspension-feeding bivalves, such as oyster, scallops and mussels. The food sources for these bivalves often depend on particulate organic matter and benthic microalgae. Recent studies have suggested that attached microalgae and bacteria also become important food sources for suspension-feeding bivalves. Knowledge of the dietary regime of bivalves is crucial for understanding the coastal food web and cultured bivalve management. The ark shell, *Anadara broughtonii*, is one of the most important commercial bivalve species in China. They are usually cultured both in raft mariculture and bottom sowing proliferation. However, information on the food sources for cultured *A. broughtonii* is still limited. Based on stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) and stomach content analysis, this study analyzed the dietary regime of *A. broughtonii* under two different proliferation and culturing modes in May and September 2014, aimed to approach the potential food sources of *A. broughtonii* in this area. Results showed that there was a clear seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ values of *A. broughtonii*. The $\delta^{13}\text{C}$ value in the raft mariculture area (RMA) in May was significantly lower than that in September, but there was an opposite trend in the bottom sowing proliferation area (BSPA). There were no significant differences in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of *A. broughtonii* under two proliferation and culturing modes in May, but the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of *A. broughtonii* in the RMA were clearly higher than those in the BSPA in September. The POMs, mainly including phytoplankton, were the greatest sources of food in the RMA, with a contribution rate of 61.0%–62.9%, followed by attached microalgae (37.2%–39.0%). Comparatively, benthic microalgae was the most important food source in the BSPA, with a contribution rate of 51.7% in May and 72.5% in September. Stomach content analysis showed that *A. broughtonii* filter-fed mostly on *Coscinodiscus*, *Pleurosigma*, *Nitzschia* and *Navicula*. The similarity analysis results indicated the proportional similarity (PS) values between stomach content in the BSPA and the benthic microalgae community were 85.30% in May and 77.20% in September, which may suggest that *A. broughtonii* show a certain selectivity for diatoms of weaker planktonic habit, which sink easily, and for benthic diatoms. Overall, the results can improve our understanding of the biology of *A. broughtonii*, and provide theoretical evidence for scientific aquaculture management of suspension-feeding bivalves under these two proliferation and culturing modes.

Key words: *Anadara broughtonii*; food sources; raft mariculture area; bottom sowing proliferation area; stable isotope analysis; stomach content analysis

Corresponding author: ZHANG Xiumei. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn