

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2015.06.004

基于脂肪酸标志法的不同海区合浦珠母贝的摄食差异研究

沈亚男^{1,2}, 张博¹, 姜松¹, 刘宝锁¹, 黄桂菊¹, 喻达辉¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 中国水产科学研究院南海水产种质资源与健康养殖重点实验室, 农业部南海渔业资源开发与利用重点实验室, 南海生物资源开发与利用协同创新中心, 广东广州 510300;
2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 运用脂肪酸标志法分析了海南新村和黎安、广东徐闻和雷州、广西白龙和营盘 6 个海区养殖的合浦珠母贝 (*Pinctada fucata*) 的食物组成。结果表明, 硅藻、鞭毛藻类或原生动物、大型绿藻或陆生植物颗粒、褐藻类及细菌等都可能是合浦珠母贝的食物来源。其中新村的食物组成中大型绿藻或陆生植物脂肪酸标志物 $\Sigma [C_{18:2}(n-6) + C_{18:3}(n-3)]$ 相对质量分数高达 4.64%, 较其他地点差异显著。黎安的细菌脂肪酸标志物 $[C_{18:1}(n-7)/C_{18:1}(n-9)]$ 为 1.29, Odd & br FAs 达 4.21% 优势于其他地区。雷州的硅藻脂肪酸标志物 $[C_{16:1}(n-7)/C_{16:0} = 1.06$ 和 $DHA/EPA = 1.13]$ 显著高于其他地区。白龙地区贝体中褐藻类脂肪酸标志物 $[C_{20:4}(n-6)]$ 为 9.08% 较其他地区差异显著。新村、黎安、徐闻、白龙和营盘的鞭毛藻类或原生动物脂肪酸标志物 (DHA) 均高于雷州, 并且差异显著。结果表明, 合浦珠母贝饵料组成与其栖息环境息息相关。

关键词: 合浦珠母贝; 食物来源; 脂肪酸标志法; 珍珠质量

中图分类号: S 968.31+6.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2015)06-0027-07

Feeding differentiation of pearl oysters (*Pinctada fucata*) in different habitats based on fatty acid biomarkers

SHEN Yanan^{1,2}, ZHANG Bo¹, JIANG Song¹, LIU Baosuo¹, HUANG Guiju¹, YU Dahui¹

(1. Key Lab. of South China Sea Fishery Genetic Resources and Health Aquaculture, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Lab. of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture; South China Sea Resource Exploitation and Protection Collaborative Innovation Center (SCS-REPIC); South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: We studied the food composition of pearl oysters (*Pinctada fucata*) cultured in six habitats (Xincun and Li'an of Hainan Province, Xuwen and Leizhou of Guangdong Province, and Bailong and Yingpan of Guangxi) by using fatty acid biomarkers. The fatty acid biomarkers indicate that diatoms, dinoflagellates/protozoa, chlorophyta/terrestrial plants particles, brown seaweed and bacteria could be the food compositions of *P. fucata*. The biomarker of chlorophyta/terrestrial plants ($\Sigma [C_{18:2}(n-6) + C_{18:3}(n-3)]$) was significantly higher in Xincun (4.64%) than in the other places; the biomarkers of bacteria $\{ [C_{18:1}(n-7)/C_{18:1}(n-9)]$ and Odd&br FAs $\}$ were higher in Li'an (1.29 and 4.21%) than in the others; the markers of diatoms ($C_{16:1}(n-7)/C_{16:0}$ and DHA/EPA) were significantly higher in Leizhou (1.06 and 1.13) than in the others; the biomarker of brown seaweed $[C_{20:4}(n-6)]$ was significantly higher in Bailong (9.08%) than in the others; the biomarker of dinoflagellates/protozoa (DHA) was significantly higher in Xincun,

收稿日期: 2015-01-31; 修回日期: 2015-03-03

资助项目: 国家自然科学基金项目 (31372525); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-48); 广东省海洋渔业科技推广专项 (A201201A08, A201301A02, A201301A08, B201300B08)

作者简介: 沈亚男 (1991-), 女, 硕士研究生, 从事生物技术及水产动物育种研究。E-mail: hikerwode@sina.com

通信作者: 喻达辉 (1963-), 男, 研究员, 博士, 从事水产养殖与生物技术研究。E-mail: pearlydh@163.com

Li'an, Xuwen, Bailong and Yingpan than in Leizhou. It is indicated that the food composition of the pearl oysters was closely related with their habitats.

Key words: *Pinctada fucata*; food source; fatty acid biomarker; quality of pearl

合浦珠母贝 (*Pinctada fucata*) 分布范围广, 在中国主要分布于广东、广西、海南及台湾省沿海地区^[1-2], 是海水珍珠养殖的主要贝类, 其所产珍珠产量占中国整个海水珍珠产量的 95% 以上^[3], 具有极高的经济价值, 并且所产珍珠为蜚声中外的“南珠”。但不同产地合浦珠母贝所产珍珠质量有所差异, 传统上广东湛江的雷州所产珍珠的质量最为上乘, 而且雷州被誉为珍珠之乡, 并获得了“南珠”原产地认证。造成这种珍珠产地的质量差异的原因目前较少见有报道。合浦珠母贝属于滤食性双壳贝类, 水体中的浮游生物和其他悬浮颗粒等都可作为合浦珠母贝的饵料。不同饵料营养价值不同^[4], 不同营养价值的饵料对生理功能的影响也不同, 珍珠的形成是外因条件和贝体一系列生理功能作用的结果, 因此研究不同海区合浦珠母贝的食物组成及其差异或可为探讨珍珠质量的地区差异提供一定线索, 同时为进一步了解合浦珠母贝的摄食生理提供基础数据。

目前贝类的食物组成研究主要用解剖法^[5], 但该方法只能获得即时的摄食信息, 对过往的摄食情况和是否同化利用不得而知。而近年来发展起来的脂肪酸标志法则可弥补这一缺陷。脂肪酸标志法通过特定的化合物在生物体内的特异性表达来揭示生物可能摄取的食物^[6-8]。脂肪酸作为生物标志能够真实地反映动物最近一段时期内摄食并实际同化的食物来源状况, 具体体现在生物饵料中的脂肪经消费者消化吸收后被分解成脂肪酸并且相对稳定地储存在消费者的组织中, 或生物体内含某种特异性、或是某几种高含量的脂肪酸^[9], 这些具有特异性来源的脂肪酸可作为生物标志物来研究生物的食物来源。

国际上已经确定并得到较广泛认可的脂肪酸标志物主要有大型海洋植物、陆源有机质、浮游生物及异养细菌等几类, 其中尤以鞭毛藻类、硅藻、细菌以及陆源有机质标志应用较广泛^[10-12]。COOK 等^[13]采用脂肪酸标志法研究比较了 4 种生境中海胆的食物组成情况, 结果显示由于潮间带褐藻生长繁盛, 在此生活的海胆体内表现出高相对质量分数的 $C_{18:4}(n-3)$ 和 $C_{20:4}(n-6)$, 表明了海胆对褐藻的

高摄食; 而 $C_{18:1}(n-9)/C_{18:1}(n-7)$ 较低及奇数碳、支链脂肪酸的高相对质量分数显示了底质细菌对扇贝养殖筏架上和泥质潮间带生活的海胆的重要食物贡献。EZGETA-BALIC 等^[14]分析了不同季节 4 种经济贝类的脂肪酸标志情况, 消化腺脂肪酸分析显示春夏季所有物种主要摄入浮游植物, 其次是浮游动物和碎屑, 而秋冬季浮游动物和/或碎屑在双壳类动物的饮食中变得更加重要。XU 等^[15]联合应用脂肪酸标志法和稳定同位素比值法, 比较研究了胶州湾不同生境中滤食性贝类的食物来源差异, 发现浮游硅藻、细菌及陆源有机质为湾内栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 的主要饵料来源, 而潮间带贻贝 (*Mytilus galloprovincialis*) 和牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 饵料组成中硅藻类贡献最大, 其次是鞭毛藻。中国对于脂肪酸标志法研究水生生物的食性有不少报道, 而对合浦珠母贝的食性研究较少见到。该研究运用脂肪酸标志法分析海南新村和黎安、广东雷州和徐闻、广西白龙和营盘 6 个海区养殖的合浦珠母贝的 5 类食物组成及其差异, 并就饵料对珍珠质量的影响进行初步探讨。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2013 年 9 月 13 日, 9 月 15 日, 9 月 24 日, 9 月 25 日, 10 月 3 日和 10 月 4 日, 在海南的新村和黎安、广东的徐闻和雷州、广西的白龙和营盘 6 地分别随机取合浦珠母贝 (1.5 龄) 12 ~ 16 只, 样品采集地及基础数据见表 1。将所有的样品去除表面垃圾并清洗干净, 放于已过滤海水中暂养 24 h 排空胃内容物。将暂养后的合浦珠母贝进行解剖, 取消化腺组织, 冷藏带回实验室, 于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存备用。

1.2 样品处理

将 4 只合浦珠母贝消化腺组织合并 ($n=3$), 于冷冻真空干燥机冷冻干燥 48 h, 干燥后取出用剪刀将组织尽量剪碎, 密封后于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存待分析。

1.3 脂肪酸分析

1.3.1 脂肪酸测定 脂肪提取及脂肪酸甲酯化主要参照 SAITO^[16]的方法并适当改进。

表1 合浦珠母贝采集地及基础生理数据

Tab. 1 Cultivation locality and biological data of *P. fucata*

采样日期 sampling date	采样点 location	温度/°C temperature	壳长/mm shell length	壳高/mm shell height	壳宽/mm shell width
2013-09-13	新村新村港 18°22'N, 109°59'E	27	61.06 ± 1.69	61.06 ± 2.11	24.22 ± 0.97
2013-09-15	黎安黎安港 18°23'N, 110°06'E	24	60.54 ± 2.83	61.47 ± 2.37	24.19 ± 1.21
2013-09-24	徐闻丰隆港 20°24'N, 109°57'E	23	67.30 ± 1.44	70.40 ± 1.37	24.98 ± 1.04
2013-09-25	雷州流沙湾 20°27'N, 109°55'E	23	64.90 ± 2.76	67.53 ± 3.04	21.80 ± 0.94
2013-10-03	白龙珍珠港 21°31'N, 108°21'E	27	50.26 ± 2.24	54.36 ± 1.81	18.92 ± 4.29
2013-10-04	营盘北部湾 21°28'N, 109°52'E	26	64.35 ± 4.48	67.72 ± 5.37	25.91 ± 1.56

注: 壳长、壳宽及壳高均为平均值 ± 标准差

Note: Shell length, shell width and shell height are expressed as $\bar{X} \pm SD$.

1) 粗脂肪提取。取冷冻干燥样品 0.1 ~ 0.2 g 于离心管 I 中, 加入 2 mL 氯仿-甲醇溶液 [V(氯仿):V(甲醇) = 2:1], 密封后以振荡器充分混合, 室温下避光静置 2 ~ 3 h, 然后以 9 000 r·min⁻¹ 离心 15 min, 离心 2 次, 用 1 mL 注射器吸取上层溶液到试管 II 中。往离心管 I 中再次加入 2 mL 氯仿-甲醇溶液, 提取、分离同前, 并将 2 次的上清合并。向试管 II 中加入 0.5% 氯化钙 (CaCl₂) 1.6 mL, 振荡器上混合 0.5 min 后, 在 9 000 r·min⁻¹ 下离心 15 min, 离心 2 次。用 10 mL 注射器将下层溶液转移到质量为 W₁ 的离心管 III 中, 后用氮气 (N₂) 吹扫至干燥或粘稠油状。用纸巾清洁试管外壁汗渍及灰尘后称量管质量 W₂, 粗脂肪质量为 W₂ 与 W₁ 之差。后往离心管 III 中充 N₂, 加盖密封后保存于 -20 °C 冰箱。

2) 脂肪酸甲酯化。向试管 III 中加入 1 mol·L⁻¹ 氢氧化钠 (NaOH)-甲醇溶液 1.0 mL, 震荡混匀并充 N₂, 然后在 60 °C 水浴中振摇皂化至油滴消失 (约 15 ~ 30 min)。取出离心管并加入 2.0 mL 三氟

化硼甲醇溶液 (14%), 混匀后再次充 N₂ 并封口, 于 60 °C 水浴中水浴 30 min。趁热加入正己烷 (分析纯) 2.0 mL, 充入 N₂ 后混匀, 并继续在 60 °C 水浴锅中加热 2 min 后取出。待试管冷却到室温后加入 3.0 mL 饱和氯化钠 (NaCl) 溶液, 静置 15 min 后以注射器吸取上层有机层, 经过滤器过滤后盛入 1.5 mL 棕色进样瓶 I 中, 充入 N₂, 密封保存于 -20 °C 冰箱内。

3) GC-MS 仪器条件。色谱条件为色谱柱 DB-5MS (30 m × 0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 230 °C; 升温程序为 110 °C 保持 4 min, 以 10 °C·min⁻¹ 的速度升温到 160 °C 保持 1 min, 最后以 5 °C·min⁻¹ 上升到 240 °C 保持 15 min; 载气为氦气; 流量为 1.52 mL·min⁻¹; 采用恒线速度, 分流比为 1:30。质谱条件为离子源温度 200 °C; 电子能量 70 eV; 质量扫描范围 m/z 40 ~ 550, 溶剂切除时间为 3 min。

1.3.2 脂肪酸标志物 此研究所选用的脂肪酸标志物种类见表 2。

表2 主要脂肪酸标志物

Tab. 2 Main fatty acid biomarkers

来源 source	主要脂肪酸标志物 main fatty acid biomarker	参考文献 Reference
硅藻 diatom	C _{16:1} (n-7)/C _{16:0} 、EPA[C _{20:5} (n-3)]/DHA[C _{22:6} (n-3)]	[14], [17]
鞭毛藻类或原生动物 dinoflagellates/protozoa	DHA[C _{22:6} (n-3)]	[18], [19]
大型绿藻或陆生植物 chlorophyta/terrestrial plants	Σ [C _{18:2} (n-6) + C _{18:3} (n-3)]	[20], [21]
褐藻 phaeophyta	C _{20:4} (n-6)	[22], [23]
细菌 bacteria	C _{18:1} (n-7)/C _{18:1} (n-9)、奇数碳及支链脂肪酸	[24], [25]

1.4 统计分析

利用计算机 NIST 0.5 谱库数据库检索、参考各脂肪酸的保留时间,定性出所有的脂肪酸。按面积归一化法进行分析,求得各脂肪酸相对质量分数。检测的数据用平均值表示。用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,差异性检验采用单因子方差分析(ANOVA, Tukey 检验)检验,置信水平取 95%。

2 结果

2.1 6 个地域合浦珠母贝消化腺粗脂肪质量分数

海南新村和黎安、湛江雷州和徐闻、广西白龙和营盘 6 地合浦珠母贝消化腺粗脂肪质量分数见图 1,依次为 35.18%, 24.61%, 35.42%, 40.67%, 34.92% 和 30.21%。其中湛江徐闻合浦珠母贝消化腺粗脂肪质量分数最高,显著高于海南黎安与广西营盘的,而与新村、雷州及白龙的无显著差异。

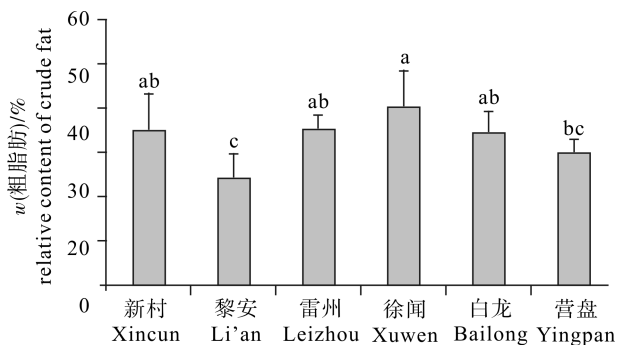


图 1 6 个地域合浦珠母贝消化腺粗脂肪质量分数
不同上标字母表示粗脂肪质量分数差异
显著($P < 0.05$), 后图同此

Fig. 1 Relative content of crude fat of digestive gland in *P. fucata* from six sites
Different superscript letters indicate significant difference in relative content of crude fat ($P < 0.05$). The same case in the following figures.

2.2 6 个地域合浦珠母贝消化腺的脂肪酸组成

广西白龙养殖的合浦珠母贝消化腺中均检出 18 种脂肪酸,海南新村、湛江雷州和广西营盘养殖的合浦珠母贝消化腺中检出 19 种,而海南黎安与湛江徐闻养殖的合浦珠母贝消化腺中检出 20 种(表 3)。实验测得新村和黎安养殖的合浦珠母贝消化腺脂肪酸总量显著高于其他 4 个地域,并且雷州和营盘的合浦珠母贝消化腺脂肪酸总量显著高于徐闻和白龙。对于饱和脂肪酸(SFA),徐闻和白龙合

浦珠母贝消化腺的相对质量分数显著低于其他 4 个地域。测得新村、黎安及雷州合浦珠母贝消化腺的单不饱和脂肪酸(MUFA)相对质量分数均显著高于其他 3 个地域,同时徐闻和营盘的合浦珠母贝消化腺 MUFA 相对质量分数也显著高于白龙。在相对质量分数最高的多不饱和脂肪酸(PUFA)中,雷州合浦珠母贝的相对质量分数显著低于其余 5 个地域,而新村和白龙的相对质量分数显著高于其余 4 个地域。

2.3 脂肪酸标志物

6 个地域合浦珠母贝脂肪酸标志及差异情况见图 2。在雷州养殖区,合浦珠母贝消化腺脂肪酸 $C_{16:1}(n-7)/C_{16:0}$ 大于 1(1.06),同时 EPA/DHA 也较高(1.13),表现出显著的硅藻类脂肪酸特征。相比而言其他地区合浦珠母贝硅藻类脂肪酸标志相对质量分数比较低, $C_{16:1}(n-7)/C_{16:0}$ 和 EPA/DHA 均低于 1($P < 0.05$)。总体来看黎安合浦珠母贝消化腺细菌脂肪酸标志相对质量分数显著高于其他 5 个地区, $C_{18:1}(n-7)/C_{18:1}(n-9)$ 大于 1(1.29),同时奇数碳/支链脂肪酸相对质量分数高达 4.21% ($P < 0.05$)。新村、黎安、徐闻、白龙及营盘合浦珠母贝消化腺中鞭毛藻类或原生动植物脂肪酸标志相对质量分数均显著高于雷州养殖海区($P < 0.05$)。新村合浦珠母贝消化腺表现出高优势的大型绿藻或陆生植物脂肪酸标志,高达 4.64%,是其他 5 个地区的 2 倍多,差异显著($P < 0.05$)。白龙养殖的合浦珠母贝消化腺中 $C_{20:4}(n-6)$ 显著高于其余地区,相对质量分数为 9.08%,表现出优势的褐藻脂肪酸标志($P < 0.05$)。

3 讨论

滤食性贝类的食物来源极其复杂,它可以筛选并摄取其所处环境中所有粒径大小合适的有机质颗粒作为食物来满足自身的能量需求^[26]。研究发现,双壳贝类消化腺是其脂质存储的主要组织^[27],并且其物质与能量也是由内脏囊(主要包括消化腺组织)流动传输到各组织^[28],所以该研究选取合浦珠母贝消化腺作为脂肪酸标志的分析材料。文章通过脂肪酸标志法分析发现,硅藻、鞭毛藻类或原生动植物、大型绿藻或陆生植物颗粒、褐藻类及细菌等都可能是合浦珠母贝的食物来源,并且不同养殖地区的合浦珠母贝的 5 类食物来源组成存在差异。

表 3 不同地域合浦珠母贝消化腺脂肪酸组成(相对质量分数, $n=3$)Tab. 3 Fatty acids of digestive gland in *P. fucata* from different places (fatty acids content)

脂肪酸 fatty acid (FA)		脂肪酸相对质量分数/% fatty acids content					
		新村 Xincun	黎安 Li'an	徐闻 Xuwen	雷州 Leizhou	白龙 Bailong	营盘 Yingpan
饱和脂肪酸 saturated FA	C _{14:0}	3.44 ± 0.55	3.74 ± 0.30	1.66 ± 0.04	3.67 ± 0.32	0.77 ± 0.29	1.67 ± 0.47
	C _{15:0}	0.38 ± 0.02	0.51 ± 0.07	0.31 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.39 ± 0.15
	C _{16:0}	14.60 ± 0.69	14.48 ± 0.63	13.26 ± 1.14	14.13 ± 0.09	13.38 ± 0.55	15.33 ± 1.30
	C _{17:0}	1.19 ± 0.09	1.31 ± 0.01	1.24 ± 0.01	0.25 ± 0.00	0.06 ± 0.01	-
	C _{18:0}	6.49 ± 0.15	6.72 ± 0.17	6.38 ± 0.19	7.86 ± 0.41	7.28 ± 0.28	8.54 ± 0.12
	C _{20:0}	0.47 ± 0.38	0.43 ± 0.14	0.09 ± 0.02	-	-	0.20 ± 0.15
	C _{22:0}	0.31 ± 0.27	0.17 ± 0.05	0.09 ± 0.00	0.72 ± 0.04	0.17 ± 0.03	0.13 ± 0.06
Σ SFA/%		26.88 ± 0.39 ^a	27.36 ± 0.85 ^a	22.94 ± 1.07 ^b	26.87 ± 0.61 ^a	21.92 ± 0.62 ^b	26.26 ± 1.21 ^a
单不饱和脂肪酸 multiple unsaturated FA	C _{16:1} (n-7)	10.97 ± 0.20	10.67 ± 0.64	8.72 ± 0.25	15.02 ± 0.29	8.30 ± 0.17	10.02 ± 0.26
	C _{18:1} (n-6)	-	1.78 ± 0.06	1.40 ± 0.73	0.45 ± 0.06	-	0.57 ± 0.70
	C _{18:1} (n-7)	2.46 ± 0.17	2.71 ± 0.09	1.75 ± 0.66	0.41 ± 0.01	0.48 ± 0.04	0.53 ± 0.07
	C _{18:1} (n-9)	2.97 ± 0.14	2.10 ± 0.18	2.27 ± 0.03	2.61 ± 0.11	2.43 ± 0.09	2.87 ± 0.89
	C _{20:1} (n-9)	2.07 ± 0.25	2.21 ± 0.29	1.32 ± 0.63	1.31 ± 0.17	1.22 ± 0.38	1.54 ± 0.80
Σ MUFA/%		18.47 ± 0.32 ^a	19.47 ± 0.48 ^a	15.46 ± 0.26 ^b	19.80 ± 0.23 ^a	12.43 ± 1.00 ^c	15.53 ± 0.69 ^b
多不饱和脂肪酸 poly unsaturated FA	C _{18:2} (n-6)	1.14 ± 0.19	0.45 ± 0.24	0.88 ± 0.04	1.17 ± 0.30	0.59 ± 0.01	1.03 ± 0.49
	C _{18:3} (n-3)	3.50 ± 1.17	0.54 ± 0.06	0.95 ± 0.15	0.89 ± 0.39	1.35 ± 0.10	1.03 ± 0.11
	C _{20:2} (n-7)	0.51 ± 0.17	1.12 ± 0.65	1.90 ± 0.28	0.59 ± 1.07	1.31 ± 0.18	2.26 ± 0.68
	C _{20:4} (n-6)	6.98 ± 0.55	6.53 ± 0.45	6.27 ± 0.76	3.61 ± 0.12	9.08 ± 0.58	5.26 ± 0.70
	C _{20:5} (n-3)	8.67 ± 0.28	8.77 ± 1.13	7.23 ± 0.11	9.40 ± 0.24	8.54 ± 0.33	8.81 ± 1.39
	C _{22:6} (n-3)	11.38 ± 0.76	11.43 ± 0.20	10.32 ± 0.24	8.32 ± 0.04	10.87 ± 0.38	10.56 ± 0.35
Σ PUFA/%		32.18 ± 0.78 ^a	28.84 ± 0.08 ^b	27.55 ± 1.77 ^b	23.98 ± 1.37 ^c	31.74 ± 1.22 ^a	28.95 ± 0.91 ^b
支链脂肪酸 branched-chain FA	14-iso	0.66 ± 0.04	0.98 ± 0.07	0.86 ± 0.17	0.33 ± 0.03	0.58 ± 0.20	0.12 ± 0.03
	16-iso	1.28 ± 0.28	1.41 ± 0.26	1.06 ± 0.18	0.59 ± 0.14	0.55 ± 0.15	0.78 ± 0.19
脂肪酸总量/% total FA		79.47 ± 2.66 ^a	78.06 ± 1.21 ^a	67.87 ± 1.44 ^c	71.57 ± 1.79 ^b	67.22 ± 1.18 ^c	71.64 ± 1.59 ^b

注：-，未检测到；不同上标字母表示相对质量分数差异显著($P < 0.05$)

Note: The symbol "-" indicates that fatty acids contents were not detected. Different superscript letters indicate fatty acids contents are significantly different ($P < 0.05$).

BUDGE 等^[29] 研究发现当 $\Sigma [C_{18:2}(n-6) + C_{18:3}(n-3)]$ 相对质量分数大于 2.5% 时即认为所研究对象对陆源有机质有明显的摄入。该研究结果显示, 海南新村养殖的合浦珠母贝的该指标高达 4.64%, 显著高于其他地区, 表明其摄入了部分陆生植物, 可能与新村港周围都是较陡的山地其陆源植物较多有关。新村贝类养殖区毗邻南湾猴岛, 岸边生长的灌木类及乔木类植物的树叶脱落腐解随水流进入港内, 成为新村港内合浦珠母贝的有机质来源之一。同时高含量的 $\Sigma [C_{18:2}(n-6) + C_{18:3}(n-$

3)] 也是大型绿藻的特征, 所以大型绿藻碎屑的贡献也不可忽视, 还需更详细的研究来进一步确定。通常粒径 $> 1.0 \mu\text{m}$ 的细菌能为双壳贝类所利用, 并且细菌类含氮量高, 是双壳贝类理想的氮源。该研究发现黎安合浦珠母贝体内具有较高的细菌脂肪酸标志, 表明黎安合浦珠母贝摄食了含大量细菌的悬浮颗粒物, 与 CHENG 和 LOPEZ^[30] 的研究结果一致。湛江徐闻养殖的合浦珠母贝体内 DHA 及 $C_{20:4}(n-6)$ 相对质量分数较高, 可能摄食了富含 DHA 的鞭毛藻类(主要有金藻门、裸藻门、隐藻门

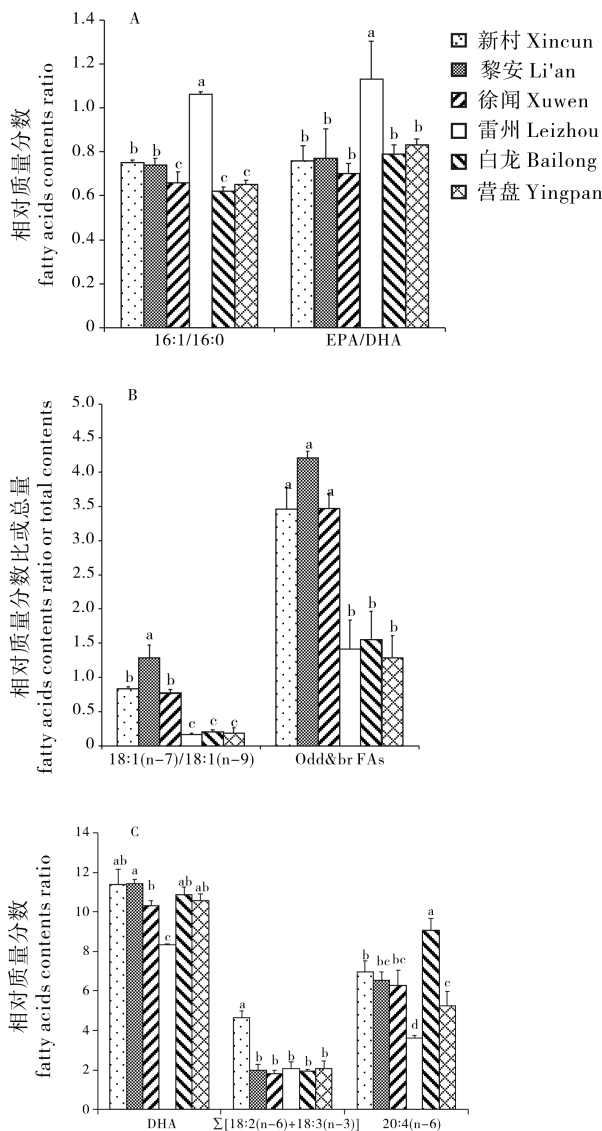


图2 硅藻(a)、细菌(b)和鞭毛藻类或原生动物、大型绿藻或陆生植物及褐藻类(c)脂肪酸标志差异
Fig. 2 Difference of fatty acid biomarkers for diatom (a), bacteria (b) and dinoflagellates/protozoa, chlorophyta/terrestrial plants and phaeophyta (c)

和甲藻门)、原生动物以及标志 $C_{20:4}(n-6)$ 的褐藻类的碎屑。湛江雷州地区生长的合浦珠母贝体内被检5类食物来源中硅藻显著高于其他地区。此外,徐闻养殖的合浦珠母贝处于流沙湾内的流沙港,而雷州养殖的处于流沙湾外,可见湾内与湾外的食物来源也具有显著性差异。在广西,除了鞭毛藻类或原生动物外,白龙海区的贝体中褐藻类脂肪酸标志物[$C_{20:4}(n-6)$]相对质量分数显著高于其他地区,这可能是由于贝滤食了褐藻这种大型藻类脱落及腐解的碎屑作为有机质来源之一,但海洋软体动物体内 $C_{20:4}(n-6)$ 的来源比较复杂,它可能还标志着一

些硅藻类、某些特定的细菌^[31]等,因此贝体内 $C_{20:4}(n-6)$ 的准确来源还需更进一步的研究。

合浦珠母贝主要用于生产珍珠,但不同产地的珍珠质量有所不同。在中国普遍认为雷州所产珍珠质量最好,且养殖规模也一度最大。不同产地珍珠质量的差异是否与所摄食的饵料不同有关,目前尚缺乏研究予以证实。JOUBERT等^[32]研究发现微藻饵料浓度会影响珍珠贝壳的生长,同时对珍珠形成相关的壳基质蛋白矿化基因起到调控作用。薛桂英^[33]研究发现不同种类、不同浓度的藻类对珍珠形成相关基因的表达影响不同。该研究结果显示不同地区合浦珠母贝的饵料组成存在差异,其中雷州合浦珠母贝粗脂肪质量分数较高,检测出的脂肪酸种类最多,其摄食的硅藻也显著高于其他地区。硅藻是双壳类最优质的饵料,优良的饵料有利于生理功能的发挥和贝类的健康生长,从而促进珍珠形成相关基因的表达和生化矿化作用,因此饵料质量对珍珠质量可能存在一定影响。但其影响程度如何以及作用机制等值得进一步深入研究。

综上所述,贝类的食物来源组成与其养殖环境密切相关,因此该研究中6个不同地区养殖群体食物构成的差异,可能主要取决于其养殖环境的不同。同时,合浦珠母贝的食物来源丰富,硅藻类、细菌、鞭毛藻类或原生动物、大型绿藻碎屑或陆生植物颗粒及褐藻类的碎屑等都可为合浦珠母贝同化利用,这就为合浦珠母贝养殖中的饵料配制提供了多种可供选择的原材料,甚至为合浦珠母贝的工厂化养殖模式的建立提供了必要的理论依据。此外,也为探究不同地区珍珠贝对食物的选择性差异与所育珍珠质量的潜在关系奠定了基础。

参考文献:

- [1] 吴曼, 刘宝锁, 黄桂菊, 等. 合浦珠母贝全同胞家系贝壳珍珠质颜色分析[J]. 南方水产科学, 2014, 10(6): 44-50.
- [2] 汤健, 刘文广, 林坚士, 等. 9个马氏珠母贝家系的中期生长性状评估[J]. 南方水产科学, 2011, 7(5): 30-36.
- [3] 刘文广, 何毛贤. 限食对合浦珠母贝幼虫生长、成活及变态的影响[J]. 南方水产科学, 2010, 6(2): 7-12.
- [4] 陈自强, 寿鹿, 廖一波, 等. 微藻饵料对双壳贝类幼体生长影响的研究进展[J]. 科技通报, 2013, 29(7): 46-55.
- [5] 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]. Est Coast Shelf Sci, 2008, 76(3): 704-709.
- [6] 许强, 杨红生, 王红, 等. 桑沟湾养殖带孔扇贝食物来源研

- 究——脂肪酸标志法[J]. 海洋科学, 2007, 31(9): 78-84.
- [7] 许强, 杨红生. 脂肪酸标志物在海洋生态系统营养关系研究中的应用[J]. 海洋学报, 2011, 33(1): 1-6.
- [8] 王娜. 脂肪酸等生物标志物在海洋食物网研究中的应用——以长江口毗邻海域为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2008: 7-11.
- [9] 黄亮, 吴莹, 张经. 脂肪酸标志水生生态系统营养关系的研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(3): 93-96.
- [10] BUDGE S M, PARRISH C C, MCKENZIE C H. Fatty acid composition of phytoplankton, settling particulate matter and sediments at a sheltered bivalve aquaculture site[J]. Mar Chem, 2001, 76(4): 285-303.
- [11] 许强. 贝藻混养系统中贝类食物来源的定量分析[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2007: 21.
- [12] BACHOK Z, MFILINGE P L, TSUCHIYA M. The diet of the mud clam *Geloina coaxans* (Mollusca, Bivalvia) as indicated by fatty acid markers in a subtropical mangrove forest of Okinawa, Japan[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2003, 292(2): 187-197.
- [13] COOK E J, BELL M V, BLACK K D, et al. Fatty acid compositions of gonadal material and diets of the sea urchin, *Psammechinus miliaris*: trophic and nutritional implications[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2000, 255(2): 261-274.
- [14] EZGETA-BALIĆ D, NAJDEK M, PEHARDA M, et al. Seasonal fatty acid profile analysis to trace origin of food sources of four commercially important bivalves[J]. Aquaculture, 2012, 334/337: 89-100.
- [15] XU Q, YANG H S. Food sources of three bivalves living in two habitats of Jiaozhou Bay (Qingdao, China): indicated by lipid biomarkers and stable isotope analysis [J]. J Shellfish Res, 2007, 26(2): 561-567.
- [16] SAITO H. Lipid and FA composition of the pearl oyster *Pinctada fucata martensii*: influence of season and maturation[J]. Lipids, 2004, 39(10): 997-1005.
- [17] 章炜, 徐继林, 严小军, 等. 利用脂肪酸组成对 26 种(株)海洋微藻聚类分析研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2007, 19(4): 445-450.
- [18] 卢丽娜, 孙利芹, 田焕玲, 等. 32 株海洋微藻总脂含量及其脂肪酸组成的研究[J]. 中国油脂, 2009, 34(11): 68-73.
- [19] IRISARRI J, FERNÁNDEZ-REIRIZ M, de TROCH M, et al. Fatty acids as tracers of trophic interactions between seston, mussels and biodeposits in a coastal embayment of mussel rafts in the proximity of fish cages [J]. Comp Biochem Physiol B, 2014, 172/173: 105-115.
- [20] SAHU A, PANCHAI I, JAIN D, et al. Fatty acids as biomarkers of microalgae[J]. Phytochemistry, 2013, 89: 53-58.
- [21] 李春颖, 仇雪梅. 海洋微藻脂肪酸组成的研究进展[J]. 生物技术通报, 2008(4): 63-65.
- [22] GOACH B J, PAUL N A, DE NYS R, et al. Seasonal and within-plant variation in fatty acid content and composition in the brown seaweed *Spatoglossum macrodontum* (Dictyotales, Phaeophyceae) [J]. J Appl Phycol, 2014, 27(1): 387-398.
- [23] 李宪瑾, 范晓, 韩丽君, 等. 中国黄, 渤海常见大型海藻的脂肪酸组成[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(2): 215-224.
- [24] 高菲. 刺参 *Apostichopus japonicus* 营养成分, 食物来源及消化生理的季节变化[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2008: 44.
- [25] PACE M L, CARPENTER S R, COLE J J, et al. Does terrestrial organic carbon subsidize the planktonic food web in a clear-water lake? [J]. Limnol Oceanogr, 2007, 52(5): 2177-2189.
- [26] EVAN WARD J, SHUMWAY S E. Separating the grain from the chaff: particle selection in suspension- and deposit-feeding bivalves [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2004, 300(1/2): 83-130.
- [27] CAERS M, COUTTEAU P, SORGELOOS P, et al. Impact of algal diets and emulsions on the fatty acid composition and content of selected tissues of adult broodstock of the Chilean scallop *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) [J]. Aquaculture, 2003, 217(1/2/3/4): 437-452.
- [28] 杨国欢, 侯秀琼, 孙省利, 等. 广东流沙湾 5 种贝类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值研究[J]. 台湾海峡, 2012, 31(4): 484-488.
- [29] BUDGE S M, PARRISH C C, MCKENZIE C H. Fatty acid composition of phytoplankton, settling particulate matter and sediments at a sheltered bivalve aquaculture site[J]. Mar Chem, 2001, 76(4): 285-303.
- [30] CHENG I, LOPEZ G R. Contributions of bacteria and sedimentary organic matter to the diet of *Nucula proxima*, a deposit-feeding protobranchiate bivalve [J]. Ophelia, 1991, 34(3): 157-170.
- [31] 高菲, 许强, 杨红生. 运用脂肪酸标志法分析刺参食物来源的季节变化[J]. 水产学报, 2010, 34(5): 760-767.
- [32] JOUBERT C, LINARD C, le MOULLAC G, et al. Temperature and food influence shell growth and mantle gene expression of shell matrix proteins in the pearl oyster *Pinctada margaritifera* [J]. PLoS ONE, 2014, 9(8): e103944.
- [33] 薛桂英. 合浦珠母贝壳壳基质蛋白基因的荧光定量表达研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013: 24-30.