

潮间带和潮下带养殖的福建牡蛎生长、营养及呈味成分的差异分析

王恬^{1,2}, 史博³, 周龙^{1,2}, 黄妙琴², 骆轩², 柯才焕^{1,2*}

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 海洋生物制备技术国家地方联合工程实验室, 福建 厦门 361102; 2. 福建省特色水产品种质资源保护与利用共享平台, 福建 厦门 361102; 3. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 福建牡蛎 (*Crassostrea angulata*) 的养殖模式已从早期的单一潮间带养殖发展到如今的潮间带与潮下带养殖并举。通过测定潮间带与潮下带不同养殖模式下福建牡蛎的生长速率、软体部的一般营养成分、矿物元素、游离氨基酸与呈味核苷酸的含量, 比较分析两种养殖模式对牡蛎生长、营养与呈味成分的影响。结果显示: 相同养殖周期中, 潮下带牡蛎的软体湿质量比潮间带牡蛎高 26.44%, 且糖原含量 (3.77%) 也显著高于潮间带牡蛎 (3.15%); 所测的 10 种矿物元素在潮间带牡蛎中的含量均高于潮下带牡蛎, 其中 Ca、Fe、Mn、Pb 含量差异显著; 潮间带牡蛎鲜样的味精当量 (EUC) 值比潮下带牡蛎高 1.5%。上述结果表明, 潮间带与潮下带两种养殖模式下福建牡蛎生长、营养及呈味成分均呈现出明显差异。

关键词: 福建牡蛎; 潮间带; 潮下带; 生长; 营养; 呈味成分

中图分类号: S 967 **文献标志码:** A

牡蛎肉质鲜美, 营养丰富, 有“海洋牛奶”的美称, 是重要的海洋经济贝类。2017 年, 我国牡蛎产量为 488 万吨, 占贝类总产量的 34%, 为我国第一大养殖贝类。福建省 2017 年牡蛎养殖产量为 178.8 万吨, 位列全国之首^[1]。福建牡蛎 (*Crassostrea angulata*) 又名葡萄牙牡蛎, 是福建地区牡蛎养殖的主要种类^[2]。

随着养殖技术的进步及人们对牡蛎需求量的不断提高, 牡蛎养殖方式有了较大发展, 除了传统的潮间带插竹养殖、底播养殖、条石和立石养殖方式外, 也发展了潮下带浅海区垂下养殖的方式, 包括棚架式、延绳式和浮筏式^[3]。牡蛎养殖从潮间带扩展到潮下带浅海区, 有效扩大了养殖空间, 显著提高了经济效益。调查表明, 潮下带吊养牡蛎方式使得牡蛎平均亩

产达到传统条石养殖方式的两倍以上^[4]。潮间带与潮下带浅海区养殖环境差异显著, 由于潮水的周期性涨落, 与潮下带牡蛎相比, 潮间带牡蛎需面临干露胁迫及盐度、温度、pH 等剧烈变化, 且可摄食时间较短。已有研究表明, 盐度、水温、饵料等环境因子均能影响牡蛎的生化组成^[5-7]。不同海域生长的同种牡蛎, 多种生化成分含量也有显著差异^[8]。而这些生化成分中, 糖原、蛋白质、脂肪、氨基酸、矿物质等对牡蛎的营养价值和呈味有重要贡献, 决定了牡蛎的品质^[9]。综上所述, 不同的养殖模式不仅影响牡蛎的产量, 还可能影响牡蛎的品质性状, 然而相关研究却鲜有报道。本研究以潮间带与潮下带浅海区两种不同环境下养殖的牡蛎为研究对象, 探究它们营养成分、呈味物质和重金属含量的差异, 评估不同养殖模式下牡蛎的生长性能、品质、风味及食用安全, 为牡蛎的科学养殖提供参考。

1 材料与方法

1.1 样本采集及样品制备

2017 年 11 月采集位于东山岐下村海域同一养殖群体中大小近似 (4 月龄)、软体质量 (3.79 ± 1.25) g 的福建牡蛎, 转移至厦门同安湾琼头海区, 以笼养方式分潮间带 (中潮区) 与潮下带浅海区养殖, 每笼放置相同个数牡蛎, 每月定期在低潮时后约 3 h 采集潮间带与潮下带水样用于测定环境因子。3 个月后 (2018 年 2 月) 采集在潮间带与潮下带养殖的牡蛎。潮间带养殖的福建牡蛎编号为 I 组, 潮下带的为 S 组。将采集的牡蛎洗净, 测量壳长、壳宽、壳高及总重。去壳后称量软体重。每组设置 6 个平行, 每 5 只牡蛎软体混样为一个平行并进行匀浆。取约 8 克匀浆样-80℃冷冻干燥后磨粉用于测定一般营养成分及矿物元素。由于烹饪可能改变游离氨基酸及呈味核苷酸含量^[10-11], 另取约 3 克匀浆样隔水蒸 10 min 用于比较鲜样与熟样的鲜味差异。样品处理后均存于-80℃超低温冰箱备测。

1.2 方法

1.2.1 海水环境因子测定

涨潮时采集海水样, 冷藏带回实验室, 过 0.22 μm 滤膜。过滤海水使用盐度计测定盐度, 使用 pH 计测定 pH, 酸化后使用 ICP-MS (电感耦合等离子体质谱) 测定矿物元素浓度^[12]。将滤膜溶于 90% 的丙酮溶液萃取叶绿素, 后用荧光计测定叶绿素 a 浓度^[13]。

1.2.2 一般营养成分测定

福建牡蛎的水分采用真空冷冻干燥法测定; 蛋白质采用凯氏定氮法, 按照 GB 5009.5—2016 测定; 脂肪采用索氏抽提法, 按照 GB 5009.6—2016 测定; 胶原蛋白按照 GB/T 9596.23

—2008 测定；糖原采用蒽酮比色法测定^[14]。

1.2.3 矿物元素测定

参考 GB 5009.268—2016 中电感耦合等离子体质谱法测定牡蛎中镁 (Mg)、铝 (Al)、钙 (Ca)、锌 (Zn)、硒 (Se)、铁 (Fe)、锰 (Mn)、铜 (Cu)、镉 (Cd)、铅 (Pb) 含量。

1.2.4 游离氨基酸测定

参考刘云等^[15]的方法测定。取约 1 g 牡蛎匀浆样纯水定容至 10 mL, 30 °C 放置 1 h, 超声 30 min, 7 000 r/min、4 °C 离心 10 min, 上清稀释后取 1 mL 依次加入 0.5 mL 0.1 mol/L 的 PITC 乙腈和 0.5 mL 1 mol/L 的三乙胺乙腈, 混匀后避光保存 1 h。随后加入 2 mL 正己烷, 充分混匀, 7 800 r/min、4 °C 离心 10 min, 抽取 1 mL 下层液体, 过 0.22 μm 膜至液相小瓶中待测。以乙腈为流动相 A, 0.1 mol/L 乙酸钠 (pH 6.5) 为流动相 B, 按照表 1 程序用 SB-Aq 柱 (4.6*250 mm, 粒径 5 μm, 购自 Agilent 公司) 以 1 mL/min 洗脱, 检测波长 254 nm, 柱温 35 °C。

表 1 游离氨基酸梯度洗脱程序

Tab. 1 Gradient elution program of free amino acids

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%
0	0	100
7	7	93
13	9	91
18	21	79
25	45	55
35	100	0
40	0	100
45	0	100

1.2.5 呈味核苷酸测定

参考陈德慰等^[16]的方法测定。取约 1 g 牡蛎匀浆样, 加入 5 mL 5% 高氯酸混匀, 4 °C 放置 1 h, 超声 15 min, 5 000 r/m、4 °C 离心 10 min, 收集上清液。在沉淀中加入 2 mL 5% 高氯酸再次混匀离心, 合并上清。用 2 mol/L 的 KOH 溶液调节 pH 至 6.5, 纯水定容至 10 mL。混匀后置于 4 °C, 待沉淀完全后过 0.22 μm 膜至液相小瓶待测。以甲醇为流动相 A, 0.05 mol/L 磷酸二氢钾+0.05 mol/L 磷酸氢二钾 (pH 6.5) 为流动相 B, 按照表 2 的程序用 SB-C18 柱 (4.6*250 mm, 粒径 5 μm, 购自 Agilent 公司) 以 0.8 mL/mim 洗脱, 检测波长 254 nm, 柱温 25 °C。

表 2 呈味核苷酸梯度洗脱程序

Tab.2 Gradient elution program of nucleotides

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%
0	0	100
5	0	100
10	5	95
15	5	95
20	0	100
22	0	100

1.2.6 呈味参数计算

味道强度值 (TAV): 定义为样品中呈味物质的测定值与该呈味物质的味道阈值之比^[17]。一般认为, 若一种物质对呈味有明显贡献, 则这种物质的 TAV 值应大于 1, 反之则无明显贡献。本研究中所用味道阈值均借鉴 Kato 等^[18]的结果。

味精当量 (EUC): 定义为鲜味氨基酸与呈味核苷酸协同作用所产生的鲜味强度相当于多少含量的谷氨酸钠 (MSG) 所产生的鲜味强度, 以 $\text{g} \cdot 100^{-1}\text{g}^{-1}$ 为单位^[19]。计算公式为:

$$\text{EUC} = \sum a_i b_i + 1218 (\sum a_i b_i) (\sum a_j b_j)。$$

式中: a_i 为鲜味氨基酸 (Asp 或 Glu) 的含量, 以 $\text{g} \cdot 100^{-1}\text{g}^{-1}$ 为单位; b_i 为鲜味氨基酸相对于 MSG 的相对鲜度系数 (Glu 为 1; Asp 为 0.077); a_j 为呈味核苷酸 (5'-AMP、5'-IMP、5'-GMP) 的含量, 以 $\text{g} \cdot 100^{-1}\text{g}^{-1}$ 为单位; b_j 为呈味核苷酸相对于 IMP 的相对鲜度系数 (5'-AMP 为 0.18、5'-IMP 为 1、5'-GMP 为 2.3); 1218 是协同作用常数^[20]。

1.2.7 数据处理

本研究所得数据均用 SPSS.20 软件进行统计学分析, 结果在表中以平均值 \pm 标准差表示。分析方法为单因素方差分析, 当 $p < 0.05$ 时认为实验组间差异显著。

2 结果与分析

2.1 潮间带与潮下带海水环境因子比较

潮间带与潮下带海水的环境因子测定结果如表 3 所示: 潮下带与潮间带海水中的 Mn 浓度在 2017 年 11 月与 2018 年 1 月之间有显著差异; 除 Mn 浓度外, 潮间带与潮下带海水的其他环境因子差异均不显著。

表 3 潮间带与潮下带海水环境因子测定结果

Tab.3 Results of sea water environmental factors in intertidal zone and subtidal zone

环境因子	养殖模式	2017年11月	2017年12月	2108年1月
盐度	潮间带	31.5	32	30
	潮下带	31	32	30
pH	潮间带	7.95	8.01	8.06
	潮下带	7.93	7.95	8.17
ρ (叶绿素 a) / ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	潮间带	0.79±0.15	1.34±0.16	0.62±0.13
	潮下带	0.95±0.10	1.88±0.30	0.66±0.04
ρ (Mg) / ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	938.60±68.53	949.77±45.83	919.73±4.75
	潮下带	963.60±11.03	946.70±20.59	918.33±32.92
ρ (Al) / ($\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	33.07±19.70	30.08±2.41	30.38±14.67
	潮下带	23.32±2.32	31.71±7.32	23.45±1.36
ρ (Ca) / ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	344.40±21.88	350.83±15.98	343.07±3.04
	潮下带	354.70±3.41	350.83±6.15	339.83±9.56
ρ (Zn) / ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	7.37±12.76	7.14±6.42	14.15±6.82
	潮下带	3.50±4.34	17.88±21.02	8.38±3.45
ρ (Se) / ($\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	163.47±12.01	160.83±4.13	160.93±7.72
	潮下带	177.80±1.42	168.70±6.79	166.77±9.01
ρ (Fe) / ($\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	-	-	-
	潮下带	-	-	-
ρ (Mn) / ($\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	9.46±0.18 ^a	7.34±2.90	4.51±0.37 ^a
	潮下带	19.03±0.50 ^b	11.64±0.74	8.19±0.44 ^b
ρ (Cu) / ($\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	-	1.63±1.04	1.29±0.63
	潮下带	0.68±0.61	1.53±0.30	0.98±0.46
ρ (Cd) / ($\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	0.28±0.03	0.39±0.06	0.33±0.03
	潮下带	0.31±0.02	0.39±0.02	0.34±0.03
ρ (Pb) / ($\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)	潮间带	0.46±0.55	0.48±0.23	0.19±0.20
	潮下带	0.36±0.43	0.34±0.08	0.45±0.25

注：同一环境因子的同列中两行上标字母不同表示有显著性差异 ($p < 0.05$)。“-”表示未检出，检出限为 0.1。

2.2 潮间带与潮下带牡蛎生长速率比较

潮间带与潮下带养殖的牡蛎的各项生长指标测定结果如表 4 所示：两种养殖方式下，潮下带牡蛎的软体湿重比潮间带牡蛎高 26.44%，两者具有显著差异；除软体湿质量外，其余指标差异不显著。

表 4 潮间带与潮下带牡蛎生长指标测定结果

Tab.4 Results of growth indices of oysters in intertidal zone and subtidal zone

指标	I 组	S 组
壳长/mm	76.95 ± 12.41	78.38 ± 9.15
壳宽/mm	38.15 ± 3.77	37.54 ± 4.50
壳高/mm	21.44 ± 4.90	22.90 ± 4.42

总质量/g	32.00±8.72	35.77±10.89
软体湿质量/g	3.48±1.45 ^a	4.40±1.51 ^b

注：同行数据不同小写字母表示有显著性差异($P < 0.05$)，下表同。

2.3 潮间带与潮下带牡蛎各组分含量比较

2.3.1 一般营养成分

潮间带与潮下带养殖的牡蛎一般营养成分含量如表 5 所示：潮下带牡蛎糖原含量较潮间带牡蛎高 19.7%，两者具有显著差异；除糖原含量外，其余 4 种营养成分在潮间带与潮下带牡蛎中的含量均无显著差异。

表 5 潮间带与潮下带福建牡蛎一般营养成分含量测定结果

Tab.5 Results of basic nutritional components in oysters cultured in intertidal zone and subtidal zone

一般营养成分	I 组	S 组
ω (水分) /%	87.32±2.793	88.24±0.98
ω (蛋白质) /%	46.65±5.43	51.09±5.80
ω (脂肪) /%	6.08±1.33	4.94±0.40
ω (糖原) /%	3.15±0.33 ^a	3.77±0.42 ^b
ω (胶原蛋白) /%	4.13±0.73	4.04±1.28

2.3.2 矿物元素

潮间带与潮下带养殖的牡蛎各种矿物元素含量测定结果如表 6 所示：所测的 10 种元素在潮间带与潮下带牡蛎中的含量由高到低排序相同，依次为 Mg、Ca、Zn、Al、Fe、Cu、Mn、Se、Cd、Pb；此外，各种元素在潮间带牡蛎中的含量均高于在潮下带牡蛎中的含量，其中 Ca、Fe、Mn、Pb 的含量具有显著差异。

表 6 潮间带与潮下带牡蛎矿物元素含量测定结果

Tab.6 Results of element contents in oysters cultured in intertidal zone and subtidal zone

元素	I 组	S 组
Mg 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	7684.93±673.89	7641.25±820.30
Al 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	522.29±77.67	475.85±69.84
Ca 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	5029.67±365.86 ^a	2988.67±457.85 ^b
Zn 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	850.18±79.77	755.97±113.69
Se 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	2.81±0.15	2.68±0.23
Fe 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	471.29±85.16 ^a	328.45±32.32 ^b
Mn 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	58.04±2.37 ^a	47.44±7.62 ^b
Cu 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	133.31±37.96	128.89±23.60
Cd 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	2.07±0.24	1.81±0.18
Pb 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.25±0.14 ^a	1.10±0.06 ^b

2.3.3 游离氨基酸

根据标准曲线及样品出峰面积分别计算潮间带与潮下带牡蛎各游离氨基酸含量得到结果如表 7 所示。测定结果表明：在新鲜样品中，8 种游离氨基酸在潮间带与潮下带牡蛎中的含量由高到低排序相同，依次为牛磺酸、谷氨酸、甘氨酸、精氨酸、天冬氨酸、丙氨酸、赖氨酸、甲硫氨酸；TAV 值大于 1 的均为谷氨酸和精氨酸；8 种游离氨基酸在潮间带与潮下带牡蛎中的含量仅甘氨酸有显著差异，潮下带牡蛎的甘氨酸含量比潮间带牡蛎高 34.34%。

表 7 鲜样的游离氨基酸含量及 TAV 值

Tab.7 Contents of free amino acids and TAV in raw oysters

氨基酸	含量/ (mg · 100 ⁻¹ g ⁻¹)		味道阈值/ (mg · 100 ⁻¹ g ⁻¹)	TAV		味道特征
	I 组	S 组		I 组	S 组	
天冬氨酸 (Asp)	54.10 ± 8.32	59.91 ± 8.02	100	0.54	0.60	鲜
谷氨酸 (Glu)	104.12 ± 16.79	101.73 ± 12.82	30	3.47	3.39	鲜
甘氨酸 (Gly)	73.45 ± 9.93 ^a	98.67 ± 22.37 ^b	130	0.57	0.76	甜
丙氨酸 (Ala)	38.91 ± 6.80	43.34 ± 8.52	60	0.65	0.72	甜
甲硫氨酸 (Met)	14.24 ± 5.17	12.05 ± 1.50	30	0.47	0.40	甜
精氨酸 (Arg)	60.87 ± 13.23	67.42 ± 13.00	50	1.22	1.35	苦
赖氨酸 (Lys)	21.49 ± 9.45	20.58 ± 6.72	50	0.43	0.41	苦
牛磺酸 (Tau)	474.44 ± 29.62	465.23 ± 33.73	-	-	-	-

注：“-”表示未见相关报道，下表同此。

将蒸熟后的牡蛎样本重新测定得到的游离氨基酸含量如表 8 所示：在蒸熟后的牡蛎样本中，牛磺酸含量仍位居潮间带和潮下带牡蛎游离氨基酸含量的首位，分别占潮间带和潮下带牡蛎总游离氨基酸含量的 59.16% 和 56.76%；TAV 值大于 1 的为谷氨酸和精氨酸两种，与鲜样结果一致；蒸熟的样本中，潮间带与潮下带牡蛎各游离氨基酸含量的差异均不显著。

表 8 熟样的游离氨基酸含量及 TAV 值

Tab.8 Contents of free amino acids and TAV in cooked oysters

氨基酸	含量/ (mg · 100 ⁻¹ g ⁻¹)		味道阈值/ (mg · 100 ⁻¹ g ⁻¹)	TAV		味道特征
	I 组	S 组		I 组	S 组	
天冬氨酸 (Asp)	55.64 ± 5.11 ^a	59.03 ± 8.35 ^a	100	0.56	0.59	鲜
谷氨酸 (Glu)	96.81 ± 12.58 ^a	92.23 ± 13.47 ^a	30	3.23	3.07	鲜
甘氨酸 (Gly)	82.68 ± 16.38 ^a	93.00 ± 28.16 ^a	130	0.64	0.72	甜
丙氨酸 (Ala)	37.97 ± 2.91 ^a	34.23 ± 4.45 ^a	60	0.63	0.57	甜
甲硫氨酸 (Met)	9.12 ± 1.76 ^a	8.88 ± 2.15 ^a	30	0.30	0.30	甜
精氨酸 (Arg)	54.50 ± 8.15 ^a	61.71 ± 8.44 ^a	50	1.09	1.23	苦
赖氨酸 (Lys)	10.08 ± 2.16 ^a	9.90 ± 1.43 ^a	50	0.20	0.20	苦
牛磺酸 (Tau)	502.46 ± 36.25 ^a	471.29 ± 52.58 ^a	-	-	-	-

潮间带牡蛎蒸熟后,牛磺酸、天冬氨酸、甘氨酸含量有少量提升,提升幅度分别为 5.91%、2.85%、12.57%,鲜样与熟样的差异均不显著。其余 5 种氨基酸在潮间带牡蛎熟样中含量均有所下降。甲硫氨酸与赖氨酸在潮间带牡蛎鲜样与熟样中含量差异显著。

潮下带牡蛎蒸熟后,牛磺酸含量稍有上升,上升幅度为 1.30%。其余七种氨基酸在潮下带牡蛎熟样中的含量均下降。丙氨酸与赖氨酸在潮下带牡蛎鲜样与熟样中含量差异显著。

2.3.4 呈味核苷酸

根据标准曲线及样品出峰面积分别计算潮间带与潮下带牡蛎各呈味核苷酸含量得到结果如表 6 所示:在潮间带与潮下带养殖的牡蛎鲜样中均检测出 4 种,这 4 种呈味核苷酸在两种不同养殖方式下牡蛎体内的含量由高到低排序相同,依次为 5'-IMP、5'-AMP、5'-GMP、5'-CMP; TAV 值大于 1 的均为 5'-IMP; 4 种呈味核苷酸在潮间带与潮下带牡蛎鲜样中含量均无显著差异。

表 9 鲜样的呈味核苷酸含量及 TAV 值

Tab.9 Contents of nucleotides and TAV in raw oysters

核苷酸	含量/ (mg·100 ⁻¹ g ⁻¹)		味道阈值 / (mg·100 ⁻¹ g ⁻¹)	TAV	
	I 组	S 组		I 组	S 组
5'-CMP	0.29±0.13 ^a	0.33±0.07 ^a	-	-	-
5'-GMP	1.86±0.38 ^a	2.02±0.22 ^a	12.5	0.15	0.16
5'-IMP	33.21±5.52 ^a	32.14±4.39 ^a	25	1.33	1.29
5'-AMP	2.72±0.92 ^a	3.25±1.01 ^a	50	0.05	0.07

将蒸熟后的样本重新测定得到的呈味核苷酸含量如表 10 所示:潮间带与潮下带牡蛎熟样的呈味核苷酸检测结果与鲜样基本一致,均检测出四种呈味核苷酸,含量由高到低排序与鲜样一致; TAV 值大于 1 的均为 5'-IMP; 4 种呈味核苷酸在潮间带与潮下带牡蛎熟样中含量均无显著差异。

表 10 熟样的呈味核苷酸含量及 TAV 值

Tab.10 Contents of nucleotides and TAV in cooked oysters

核苷酸	含量/ (mg · 100 ⁻¹ g ⁻¹)		味道阈值 / (mg · 100 ⁻¹ g ⁻¹)	TAV	
	I 组	S 组		I 组	S 组
5'-CMP	0.28±0.12 ^a	0.26±0.11 ^a	-	-	-
5'-GMP	2.27±0.69 ^a	2.42±0.52 ^a	12.5	0.18	0.19
5'-IMP	29.30±4.90 ^a	26.74±4.24 ^a	25	1.17	1.07
5'-AMP	4.14±1.60 ^a	4.48±0.74 ^a	50	0.08	0.09

潮间带牡蛎蒸熟后，5'-GMP 和 5'-AMP 含量提升，提升幅度分别为 22.04%和 52.21%；5'-CMP 和 5'-IMP 含量下降，下降幅度分别为 3.45%和 11.77 %。潮间带牡蛎鲜样与熟样的 4 种呈味核苷酸含量差异均不显著。

潮下带牡蛎蒸熟后，5'-GMP 和 5'-AMP 含量提升，提升幅度分别为 19.80%和 37.85%；5'-CMP 和 5'-IMP 含量下降，下降幅度分别为 21.21%和 16.80 %，潮下带牡蛎鲜样与熟样的 4 种呈味核苷酸含量差异均不显著。

2.3.5 游离氨基酸与呈味核苷酸协同作用

根据 1.2.6 中的公式，分别计算潮间带与潮下带牡蛎鲜样和熟样的 EUC 值，得到结果如表 11 所示：潮间带牡蛎的 EUC 值始终高于潮下带牡蛎，鲜样高 1.49%，熟样高 9.89%；此外，潮间带牡蛎鲜样的 EUC 值比熟样高 22.37%，潮下带牡蛎鲜样的 EUC 值比熟样高 32.49%。

表 11 潮间带与潮下带牡蛎鲜样与熟样的 EUC 值

Tab.11 EUC of raw and cooked oysters cultured in intertidal zone and subtidal zone

处理方式	EUC(g · 100 ⁻¹ g ⁻¹)	
	I 组	S 组
鲜样	4.76±1.10	4.69±0.46
熟样	3.89±0.77	3.54±0.93

3 讨论

牡蛎以富含优质蛋白、糖原、锌、硒、牛磺酸等著称，这些生化成分对牡蛎的营养价值和呈味有重要贡献，决定了牡蛎的品质^[9]。已有研究表明，温度、盐度、饵料等因子均能影响牡蛎的生化成分及品质^[5-7]。潮间带与潮下带养殖环境差异显著，两种养殖模式下多种影响因子交织对牡蛎生长及品质影响的研究却鲜有报道。本研究以在潮间带与潮下带养殖的同批福建牡蛎为研究对象，通过测定生长指标、一般营养成分含量、矿物元素含量、游离氨基酸含量及呈味核苷酸含量，比较两种养殖环境下牡蛎的生长性能、品质、呈味和食用安全性差异，为牡蛎的科学养殖提供参考。

3.1 潮间带与潮下带牡蛎生长性能分析

生长指标的测量结果显示潮下带养殖的牡蛎软体部分具有更快的生长速度，相同养殖周期下，潮下带牡蛎的软体湿重比潮间带牡蛎高 26.44%，其主要原因是潮间带牡蛎受涨落潮影响，每天约有 6 h 的干露时间无法摄食，而潮下带牡蛎 24 h 都可以摄食，更加充足的营养

使得潮下带牡蛎生长更快、软体部更重。可见，潮下带养殖除了可以拓展牡蛎养殖空间，还有利于牡蛎延长摄食时间，获取更多饵料，因此可提高牡蛎的生长速率，缩短养殖周期。

3.2 潮间带与潮下带牡蛎营养与呈味分析

3.2.1 一般营养成分分析

一般营养成分的测定结果显示潮下带牡蛎糖原含量较潮间带牡蛎高 19.7%，且具有显著差异，水分、粗蛋白、脂肪、胶原蛋白在潮间带牡蛎与潮下带牡蛎中的含量均无显著差异。作为贝类的主要储能形式，糖原对牡蛎的各项生理活动均有重要意义。杜以帅等^[21]研究发现干露条件下长牡蛎 (*C. gigas*) 的糖原合成速率减缓。牡蛎在抗逆过程中需消耗大量的糖原^[22]，Ivanina 等^[23]研究发现温度升高使美洲牡蛎 (*C. virginica*) 糖原储备减少。本研究中潮间带牡蛎牡蛎受涨落潮影响，平均每日约有 6 h 的干露时间，干露一方面可能导致潮间带牡蛎合成的糖原量少于潮下带牡蛎；另一方面可能使潮间带牡蛎受高温胁迫，致其糖原消耗增多，因而导致潮间带牡蛎糖原含量显著低于潮下带牡蛎。糖原不仅是一种营养成分，而且具有呈味作用^[24]，因此潮下带养殖使牡蛎更易积累糖原，提高营养价值和醇厚的口感。

3.2.2 矿物元素含量分析

牡蛎具有极强的金属富集能力。本研究发现所测的 10 种元素在潮间带牡蛎中的含量均高于在潮下带牡蛎中的含量，其中 Ca、Fe、Mn、Pb 这四种金属元素含量有显著差异。经过取样分析，琼头潮间带与潮下带海水的 pH、盐度、多数矿物元素浓度均无显著差异，因此潮间带牡蛎金属含量较潮下带牡蛎高的主要原因可能是受干露影响。Wang^[25]将干露后的翡翠贻贝 (*Perna viridis*) 重新浸入水中发现，贻贝对 Zn、Cd 的吸收率升高。Jin 等^[26]计算了长期养殖于同一区域不同位点牡蛎的 Cd、Zn 吸收速率常数，发现每天经历干露的牡蛎的吸收速率常数较大，由此推测，干露可能使牡蛎吸收金属的能力增强。因此潮间带牡蛎的周期性干露，可能导致其金属含量高于潮下带牡蛎。Watkins 等^[27]研究发现，温度对紫贻贝 (*Mytilus edulis*) 体内 Cd 的累积有重要影响。潮间带受涨落潮影响，温度变化剧烈，可能导致潮间带牡蛎金属含量高于潮下带牡蛎。本研究中牡蛎养殖海域海水中的 Pb、Cd、Zn、Cu 等金属浓度均低于国家渔业水质标准 (GB 11607—1989) 中规定的限量，在此条件下养殖的潮间带牡蛎金属含量虽较潮下带牡蛎高，但仍低于中国食品安全国家标准 (GB 2762—2017) 中规定的食品中污染物限量 (Pb 含量 \leq 1.5 mg/kg，Cd 含量 \leq 2.0 mg/kg)，为食用安全性较高的水产品。上述研究结果表明：一方面在无污染海域生长的潮间带牡蛎含有更多人体所需的 Zn、Se、Mn 等微量元素，营养价值更高；另一方面，潮间带牡蛎重金属含量超标

可能性更大，食用安全性可能较低，因而对养殖海域的选择需更加谨慎。

3.2.3 游离氨基酸含量分析

在潮间带与潮下带牡蛎鲜样中所测的 8 种游离氨基酸含量由高到低排序相同，牛磺酸含量均为最高，这与已有研究结果一致^[7,15]。7 种游离氨基酸为呈味氨基酸，对牡蛎呈味有重要贡献：谷氨酸和天冬氨酸呈鲜味，它们不仅自身对牡蛎呈味有贡献，还与核苷酸具有协同作用，可以大大增加牡蛎的鲜味^[19]；精氨酸虽是呈苦味的氨基酸，但它可以提高贝类的整体风味^[16]；甘氨酸、丙氨酸、甲硫氨酸为呈甜味氨基酸。游离氨基酸的含量决定其 TAV 值，TAV 值大于 1 表明其对呈味有明显贡献。在潮间带与潮下带牡蛎中，TAV 值大于 1 的游离氨基酸均为谷氨酸与精氨酸。前人研究结果显示，长牡蛎中谷氨酸、丙氨酸的 TAV 值大于 1^[15]；近江牡蛎 (*C. rivularis*) 中谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸的 TAV 值大于 1^[16]。游离氨基酸对牡蛎维持体内渗透压平衡有重要意义^[28]，其含量与盐度、季节等因子密切相关^[29]，例如长牡蛎的甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、精氨酸和牛磺酸含量随渗透压提高而增加^[6]，且冬春季游离氨基酸总量高于夏秋季^[7]。因而本研究与已有研究所得结果稍有差异可能是由于牡蛎品种、采样时节、养殖海域环境等不同造成的。本研究中 TAV 值大于 1 的谷氨酸和精氨酸在潮间带与潮下带牡蛎中的含量无显著差异，表明养殖模式对牡蛎体内单种氨基酸的呈味无显著影响。值得注意的是，潮下带牡蛎的甘氨酸含量比潮间带牡蛎高 34.34%，且具有显著差异，虽然其 TAV 值小于 1，但可能和其他呈味物质联合作用影响牡蛎呈味。潮间带与潮下带牡蛎熟样中游离氨基酸的含量差异均不显著，TAV 值大于 1 的均为谷氨酸与精氨酸。蒸熟后赖氨酸在潮间带与潮下带牡蛎中含量均显著降低，这可能与赖氨酸受热不稳定有关。游离氨基酸的测定结果表明，潮间带牡蛎与潮下带牡蛎牛磺酸含量相当，且对呈味有明显贡献的氨基酸含量均无显著差异，表明养殖方式对牡蛎氨基酸的营养价值和呈味作用无显著影响。

3.2.4 呈味核苷酸含量分析

在潮间带与潮下带养殖的牡蛎中均检测出 4 种主要呈味核苷酸，为 5'-CMP、5'-GMP、5'-IMP、5'-AMP，这与刘文等^[30]所得结果基本一致。在潮间带与潮下带牡蛎的鲜样与熟样中，对呈味有明显贡献的均为 5'-IMP，且潮间带牡蛎的 5'-IMP 含量在鲜样与熟样中均高于潮下带牡蛎。氨基酸与呈味核苷酸的协同作用主要影响牡蛎的鲜味。对潮间带与潮下带牡蛎、新鲜与蒸熟牡蛎的 EUC 值两两比较可知，潮间带牡蛎的 EUC 值始终高于潮下带牡蛎，表明潮间带牡蛎可能比潮下带牡蛎更鲜美。此外，牡蛎鲜样的 EUC 值也始终高于熟样，表明新鲜牡蛎鲜味可能更好。

综上所述,潮间带与潮下带两种养殖方式对牡蛎的生长、营养及呈味成分均有影响。潮下带养殖不但可以提高牡蛎生长速度,缩短养殖周期,而且有利于牡蛎积累糖原,提升醇厚感。潮间带养殖的牡蛎更易富集金属,含有更多人体所需的微量元素,同时也面临更大的重金属污染风险;此外,潮间带牡蛎的 EUC 值高于潮下带牡蛎,说明潮间带的养殖模式有利于提高牡蛎的鲜味。

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [2] 巫旗生, 宁岳, 曾志南, 等. 福建沿海牡蛎养殖群体的多重种类特异性 PCR 分析和形态参数比较[J]. 福建水产, 2014, 36(1): 7-13.
- [3] 曾志南, 宁岳. 福建牡蛎养殖业的现状、问题与对策[J]. 海洋科学, 2011, 35(9): 112-118.
- [4] 李朴生. 改进吊养牡蛎技术措施[J]. 福建农业, 1995(1): 18.
- [5] VAN H J, MEDINA I, MAEHRE H K, et al. The effect of algae diets (*Skeletonema costatum* and *Rhodomonas baltica*) on the biochemical composition and sensory characteristics of Pacific cupped oysters (*Crassostrea giga*) during land-based refinement[J]. Food Research International, 2017: S0963996917302958.
- [6] HOSOI M, KUBOTA S, TOYOHARA M, et al. Effect of salinity change on free amino acid content in Pacific oyster[J]. Fisheries science, 2010, 69(2):395-400.
- [7] 张智翠. 太平洋牡蛎品质的季节性变化及贮藏过程中的生化变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [8] 丁丹勇. 不同养殖区香港牡蛎营养成分的分析与评价[J]. 安徽农业科学, 2018, 46,582(5): 91-95.
- [9] MAËVA C, BROWN M, KUBE P, et al. Understanding the impact of growing conditions on oysters: a study of their sensory and biochemical characteristics[J]. Aquaculture Research, 2013, 46(3):637-646.
- [10] PENET C S, WORTHINGTON R E, PHILLIPS R D, et al. Free amino acids of raw and cooked ground beef and pork[J]. Journal of Food Science, 1983, 48(1):2.
- [11] 曹伟, 许晓曦. HPLC 测定不同热处理方式对镜鲤鱼中呈味核苷酸的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3):136-137.
- [12] JONATHAN E S, JILL M B, ROBERT K J. Data trend shifts induced by method of concentration for trace metals in seawater: automated online preconcentration vs. borohydride reductive coprecipitation of nearshore seawater samples for analysis of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb via ICP-MS[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2019, 17(4):266-276.

- [13] 戴荣继, 黄春, 佟斌, 等. 藻类叶绿素及其降解产物的测定方法[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2004(1): 75-80.
- [14] CARROLL K N, LONGLEY W, ROE J. The determination of glycogen in liver and muscle by use of anthrone reagent[J]. Journal of Biological Chemistry, 1956, 220(2): 583-593.
- [15] 刘云, 宫向红, 徐英江, 等. 烟台近海 3 种贝类中呈味核苷酸和氨基酸的测定及比较分析[J]. 中国水产科学, 2014, 21(2): 351-360.
- [16] 陈德慰, 苏键, 刘小玲, 等. 广西北部湾 3 种贝类中主要呈味物质的测定及呈味作用评价[J]. 食品科学, 2012, 33(10):165-168.
- [17] CHEN D W, ZHANG M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 1200-1205.
- [18] KATO H, RHUE M R, NISHIMURA T. Role of free amino acids and peptides in food taste [J]. ACS Symposium Series, 1989, 388(1): 158-174.
- [19] 施文正, 方林, 吴旭干, 等. 我国沿海主要海域雌性三疣梭子蟹呈味成分含量的比较[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 127-133.
- [20] YAMAGUCHI S, YOSHIKAWA T, IKEDA S, et al. Measurement of the relative taste intensity of some l- α -amino acids and 5'-nucleotides [J]. Journal of Food Science, 2010, 36(6): 846-849.
- [21] 杜以帅. 长牡蛎对干露的适应机制研究[C]//中国动物学会·中国海洋湖沼学会贝类学分会第九次会员代表大会暨第十五次学术讨论会会议摘要集. 广州: 中国动物学会贝类分会、中国海洋湖沼学会贝类分会, 2011:1.
- [22] LI B S, SONG K, MENG J, et al. Integrated application of transcriptomics and metabolomics provides insights into glycogen content regulation in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. BMC Genomics, 2017, 18(1): 713-.
- [23] IVANINA A V, DICKINSON G H, MATOO O B, et al. Interactive effects of elevated temperature and CO₂ levels on energy metabolism and biomineralization of marine bivalves *Crassostrea virginica*, and *Mercenaria mercenaria*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, 2013, 166(1): 101-111.
- [24] 杨文鹤, 徐大伦, 孙翠玲, 等. 缢蛏冰藏保活期间呈味物质的变化[J]. 中国食品学报, 2009, 9(03): 181-186.
- [25] WANG W X. Cd and Se aqueous uptake and exposure of green mussels *Perna viridis*: influences of seston quantity [J]. Marine Ecology Progress, 2002, 226: 211-221.
- [26] JIN Y, WANG W X. Biokinetics and metallothionein-like proteins response in oysters facing metal challenges

in an estuary[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(8): 1818-1825.

[27] WATKINS B, SIMKISS K. The effect of oscillating temperatures on the metal ion metabolism of *Mytilus edulis* [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1988, 68(1): 93-100.

[28] MENG J, ZHU Q H, ZHANG L L, et al. Genome and transcriptome analyses provide insight into the euryhaline adaptation mechanism of *Crassostrea gigas*[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(3): e58563-.

[29] ZHANG Z C, XUE C H, GAO X, et al. Monthly changes of glycogen, lipid and free amino acid of oyster[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2006(3): 257-262.

[30] 刘文, 张悦容, 李晔, 等. 牡蛎体液主要呈味物质的测定及脂类成分分析[J]. *核农学报*, 2013, 27(10): 1518-1524.

Difference analyses of growth, nutrition and taste components of *Crassostrea angulata* cultured in intertidal zone and subtidal zone

WANG Tian^{1,2}, SHI Bo³, ZHOU Long^{1,2}, HUANG Miaoqin², LUO Xuan²,
KE Caihuan^{1,2*}

(1. State-Province Joint Engineering Laboratory of Marine Bioproducts and Technology, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2 Platform for Germplasm Sharing of Characteristic Aquaculture Species in Fujian, Xiamen 361102, China; 3. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Fujian oyster (*Crassostrea angulata*) is an important kind of economic shellfish. The aquaculture area of Fujian oyster is not only intertidal zone now, but also subtidal zone. However, the effects of huge environmental differences between intertidal zone and subtidal zone on growth, nutrition and taste components of Fujian oyster were not reported. In this study, the growth index and contents of basic nutritional components, mineral elements, free amino acids and flavor nucleotides of oysters in different aquaculture environments were determined to analyse the effects of aquaculture modes in intertidal zone and subtidal zone on growth, nutrition and taste

components of oysters. The results showed that during the same culture period, the soft part of subtidal oyster is 26.44% heavier than that of intertidal oyster. In the meanwhile, the content of glycogen in subtidal oyster (3.77%) is significantly higher than that of intertidal oyster (3.15%). The contents of the 10 metal elements measured in intertidal oyster were higher than those of subtidal oyster, of which the contents of Ca, Fe, Mn and Pb were significantly higher. The EUC (equivalent umami concentration) value of raw intertidal oyster was 1.5% higher than that of raw subtidal oyster. This study showed that different culture modes had important effects on growth, nutrition and taste components of oysters.

Keywords: *Crassostrea angulata*; intertidal zone; subtidal zone; growth; nutrition; taste components

廈門大學學報(自然科學版)