

3 个地区可口革囊星虫营养成分及重金属含量的分析与评价

吴雪萍¹, 叶红霞¹, 姚又菊¹, 刘浩翔², 李瑞华¹, 童潼¹

1. 广西民族大学海洋与生物技术学院, 广西 南宁 530008;

2. 四川水利职业技术学院生物工程系, 四川 成都 611244

摘要: 通过对广西北海、广东湛江和福建宁德 3 个地区可口革囊星虫的脂肪酸、水解氨基酸、游离氨基酸和重金属含量等进行测定, 了解可口革囊星虫的肌肉品质、呈味特征并进行食用健康风险评价。在脂肪酸组成方面, 在 3 个地区的可口革囊星虫中均检测出 22 种脂肪酸, 其高胆固醇血症指数(hypercholesterolemia index, HI)分别为北海 13.11、湛江 14.09、宁德 16.64; 致动脉粥样硬化指数(atherogenic index, AI)分别为 0.49、0.49、0.56; 致血栓形成指数(thrombosis index, TI)分别为 0.62、0.75、0.81。在水解氨基酸组成方面, 在 3 个地区的可口革囊星虫中均含有 17 种水解氨基酸, 总氨基酸含量(total amino acids, TAA)分别为北海 159.70mg·g⁻¹、湛江 155.97mg·g⁻¹、宁德 161.49mg·g⁻¹, 且无显著性差异; 根据联合国粮农组织/世界卫生组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations / World Health Organization, FAO/WHO)评分模式, 以氨基酸评分(amino acid score, AAS)和化学评分(chemical score, CS)为标准时, 3 个地区的可口革囊星虫的第一、第二限制性氨基酸均分别为蛋氨酸+胱氨酸、缬氨酸; 另外, 必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)分别为 11.14、10.62、11.37, 说明 3 个地区可口革囊星虫均可作为理想的蛋白源。在游离氨基酸组成方面, 北海可口革囊星虫含 15 种游离氨基酸, 湛江和宁德可口革囊星虫均含 16 种游离氨基酸, 游离氨基酸总含量差异显著($p < 0.05$); 根据味道强度值(taste activity value, TAV)分析得知, 3 个地区游离氨基酸中谷氨酸、甘氨酸和丙氨酸的 TAV 值均大于 1, 说明这 3 种氨基酸对呈味贡献最大。在重金属含量方面, 北海、湛江的可口革囊星虫体内各重金属元素含量大体呈现出 Zn > Pb > Cu > As > Cd > Hg 的规律, 而宁德地区的重金属含量规律为 Zn > Cu > Pb > As > Cd > Hg, 3 个地区的可口革囊星虫都受到重金属 Pb 的重度污染, 其中宁德地区的最为严重; 综合污染指数(P)表明, 北海地区的可口革囊星虫的重金属污染接近轻度污染的警戒水平, 综合污染指数为 0.96; 宁德和湛江两地的可口革囊星虫受到重金属的轻度污染, 综合污染指数 $1 < P < 2$; 3 个地区可口革囊星虫的单一重金属危害系数(target hazard quotient, THQ)及复合重金属危害系数(compound target hazard quotient, TTHQ)均小于 1, 说明成人和儿童食用这些可口革囊星虫不存在健康风险。

关键词: 可口革囊星虫; 脂肪酸; 氨基酸; 重金属含量

中图分类号: S968.31; P735.53 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2024)02-0092-16

Analysis and evaluation of nutrient composition and heavy metal content of *Phascolosoma esulenta* in three regions

WU Xueping¹, YE Hongxia¹, YAO Youju¹, LIU Haoxiang², LI Ruihua¹, TONG Tong¹

1. School of Marine Science and Biotechnology, Guangxi Minzu University, Nanning 530008, China;

2. Department of Biological Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611244, China

收稿日期: 2023-05-12; 修订日期: 2023-06-29。殷波编辑

基金项目: 广西壮族自治区自然科学基金项目(2020GXNSFBA159010); 广西民族大学引进人才启动基金项目(2017KJQD007); 广西壮族自治区大学生创新创业训练计划项目(S202210608158、S202210608162、S202210608163)

作者简介: 吴雪萍(1987—), 女, 广西壮族自治区北海市人, 博士, 从事海洋经济软体动物遗传育种研究。email: wxuep2020@163.com

通信作者: 童潼。email: ttong1028@126.com

Received date: 2023-05-12; Revised date: 2023-06-29. Editor: YIN Bo

Foundation item: Guangxi Natural Science Foundation Grant (2020GXNSFBA159010); High Level Introduction of Talent Research Start-up Projects of Guangxi Minzu University (2017KJQD007); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students of Guangxi in 2022 (S202210608158, S202210608162, S202210608163)

Corresponding author: TONG Tong. email: ttong1028@126.com

Abstract: To evaluate the nutritional value, taste activity and health risk, the content of fatty acid, hydrolyzed amino acid, free amino acid and heavy metal in *Phascolosoma esulenta* from Beihai of Guangxi, Zhanjiang of Guangdong, and Ningde of Fujian were analyzed. Twenty-two types of fatty acids were detected in these three regions. The hypercholesterolemia index HI was 13.11 in Beihai, 14.09 in Zhanjiang, 16.64 in Ningde, the atherogenic index AI was 0.49, 0.49, 0.56, and the thrombosis index TI was 0.62, 0.75, 0.81, respectively. There were 17 hydrolyzed amino acids in each of the three regions, with a total amino acids (TAA) of $159.70 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $155.97 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, and $161.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively, and there was no significant difference. According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations / World Health Organization (FAO/WHO), when using the amino acid score (AAS) and chemical score (CA) as standards, the first and second limiting amino acids of the three regions of the *P. esulenta* are Met + Cys, and Val, respectively. In addition, the essential amino acid indexes (EAAI) were 11.14, 10.62 and 11.37, respectively, indicating that the three regions of the *P. esulenta* can all serve as ideal protein sources. The results of free amino acids showed that the *P. esulenta* of Beihai contained 15 kinds of free amino acids, while Zhanjiang and Ningde both contained 16 free amino acids, with a significant difference in total free amino acid content ($p < 0.05$). It was found that the taste activity values (TAV) of Glu, Gly and Ala in the free amino acids of the three regions were all greater than 1, indicating that these three amino acids contribute the most to flavor formation. Additionally, the heavy metal content analysis indicated that the heavy metal level in Beihai and Zhanjiang was $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$, while the content of heavy metals in Ningde was $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$. The single pollution index showed that the three geographic groups were all heavily polluted by the heavy metal Pb, of which Ningde was the most serious. The comprehensive pollution index showed that the heavy metal pollution of *P. esculenta* in the Beihai reached the threshold for slight pollution ($P = 0.96$), Zhanjiang and Ningde were moderately polluted ($1 < P < 2$). The single target hazard quotient (THQ) and the compound target hazard quotient (TTHQ) were all less than 1, indicating that there was no potential health risk for adults and children for the consumption of this species. The results provide a theoretical basis for the utilization and subsequent industrial precision processing of *P. esculenta*.

Key words: *Phascolosoma esulenta*; fatty acids; amino acids; heavy metal contents

可口革囊星虫(*Phascolosoma esulenta*), 隶属星虫动物门(Sipuncula)、革囊星虫纲(Phascolosomatidea)、革囊星虫目(Phascolosomiformes)、革囊星虫科(Phascolosomatidae)、革囊星虫属(*Phascolosoma*), 是我国特有的重要经济物种之一, 主要分布于福建、浙江、广东、广西等沿海滩涂(李凤鲁, 1989)。可口革囊星虫俗称泥虫、泥蒜、泥丁, 不仅肉质脆嫩, 味道鲜美, 并具有较高的药用、食疗价值, 被誉为动物人参、海洋冬虫夏草, 深受消费者们喜爱(管华诗等, 2009)。

近年来国内外对可口革囊星虫的繁育和养殖技术(林向阳, 2017)、组织学(邓中日等, 2007)、生物活性(Wu et al, 2014)、功能基因(Ding et al, 2017)等方面先后进行了研究。关于其营养成分及评价, 董兰芳等(2017)研究表明, 广西北海市合浦县闸口镇红树林区不同生长阶段可口革囊星虫体壁的蛋白质和氨基酸组成不同; 周化斌等(2006)发现, 浙江温州可口革囊星虫属蛋白质和脂肪酸含量高, 氨基酸种类齐全以及富含人体新陈代谢所需微量元素的绿色经济海洋动物; 梁川等(2016)研究结果得出, 广西北海可口革囊星虫是一种氨基酸和脂肪酸组成结构合理, 且饱和脂肪酸的含量较高的海产品; 黄岛平等(2012)检测出可口革囊星虫必需氨基酸占氨基酸总量的比值明显高于联合国粮农组织/世界卫生组织(Food and Agriculture

Organization of the United Nations / World Health Organization, FAO/WHO)评分模式, 营养价值高。但尚未见有关可口革囊星虫游离氨基酸和呈味特性的报道。此外, 可口革囊星虫也是一种良好的重金属污染的预警生物标志物。李懿等(2008)发现, Hg^{2+} 、 As^{3+} 的毒性大于 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} , 其可作为近海砷和汞的标志物; 陈细香等(2007)报道了 Zn、Pb 和 Cd 对可口革囊星虫 48h 内的毒性作用为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn}$, 但 96h 内的毒性无明显差异; 吴洪喜等(2015)在试验条件下探讨可口革囊星虫对 Cu^{2+} 和 Hg^{2+} 的富集得出, Cu^{2+} 和 Hg^{2+} 的浓度越高, 富集越快, 生长速率也随之减慢。目前有关不同自然海域可口革囊星虫重金属含量的分析和比较鲜见报道, 仅高业田等(2012)测定了可口革囊星虫及其栖息地底泥中重金属锌、铜、锰、铁、镉、铅、汞和砷等 8 种重金属含量的分布特征及相关性, 结果表明不同栖息地可口革囊星虫的重金属含量差异显著, 总体趋势为铁 > 锰 > 锌 > 铜 > 铅 > 砷 > 镉 > 汞。

本研究对 3 个地区可口革囊星虫的脂肪酸、水解氨基酸、游离氨基酸以及重金属含量进行测定, 通过对其营养成分品质、呈味特征和健康风险评价, 分析可口革囊星虫群体间的营养差异和食用安全性, 以期可为可口革囊星虫的人工繁育、食品开发及评价等产业

化发展提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用样品于 2019 年 7 月 15 日—8 月 15 日分别采自福建省宁德市霞浦县溪南镇(119°52'0.6",

26°43'22")、广东省湛江市东海岛(110°30'36", 20°58'48")及广西壮族自治区北海市白沙镇自然海域(109°41'24", 21°41'60")(图 1), 选取蠕动有力、体表无明显损伤且规格一致的野生可口革囊星虫个体。每个群体各取 90 尾, 体质量分别为(19.27±0.01)g、(19.81±0.01)g、(22.69±0.01)g。

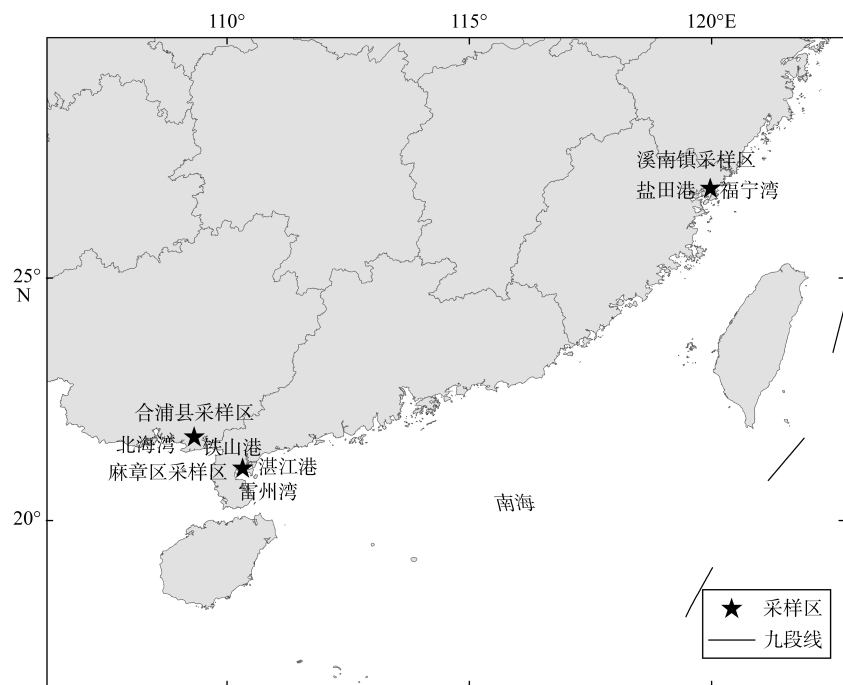


图 1 采样点

基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号标准地图制作, 底图无修改

Fig. 1 Sampling locations

新鲜可口革囊星虫带回实验室, 纯水洗净体表的淤泥后, 剪刀沿着体壁纵向剪开去除内脏和体腔液, 吸水纸吸干水分, 105℃恒温干燥至恒重。每个群体设置 3 个重复, 1 个待测样品为 30 尾可口革囊星虫干品合并而成。

1.2 方法

1.2.1 脂肪酸组分分析

根据《GB/T 22223-2008 食品中总脂肪、饱和脂肪(酸)、不饱和脂肪(酸)的测定水解提取—气相色谱法》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008), 脂肪酸测定采用加入内标物十一碳酸甘油三酯的方法测定。

1.2.2 氨基酸组分分析

根据《GB 5009.124-2016 食品氨基酸国家标准食品

中氨基酸的测定》(中华人民共和国国家食品药品监督管理总局, 2016)的方法检测可口革囊星虫中水解氨基酸和游离氨基酸的含量。

1.2.3 重金属含量测定

采用微波消解—全谱直读电感耦合等离子体原子发射光谱法(inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy, ICP-OES)(刘文政等, 2023)对 3 个地理群体可口革囊星虫重金属的含量进行测定。

1.2.4 营养价值评价

脂肪酸评价: 采用致动脉粥样硬化指数(atherogenic index, AI)和致血栓形成指数(thrombosis index, TI)评价可口革囊星虫体壁肌肉脂肪酸品质(楼乔明等, 2016)。

$$AI = (C12:0 + C14:0 + C16:0) / (\sum MUFA + \sum PUFA) \quad (1)$$

$$TI = \frac{C14:0 + C16:0 + C18:0}{0.5 \times \sum MUFA + 0.5 \times \sum PUFA(n-6) + 3 \times \sum PUFA(n-3) / \sum PUFA(n-6)} \quad (2)$$

式中: MUFA 为单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid)含量(单位: %); PUFA 为多不饱和脂肪酸

(polyunsaturated fatty acid)含量(单位: %)。

水解氨基酸评价: 按照 FAO/WHO 推荐的评分标

准和中国疾病预防控制中心营养与食品安全所提出的鸡蛋蛋白的氨基酸模式分别按以下公式计算氨基酸评

分(amino acid score, AAS)、化学评分(chemical score, CS)(王颖等, 2013)。

$$AAS = \frac{\text{样品中氨基酸含量}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})}{\text{FAO/WHO评分标准模式同种氨基酸含量}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})} \times 100 \quad (3)$$

$$CS = \text{待测样品氨基酸含量}(\%) / \text{鸡蛋蛋白质中同种氨基酸含量}(\%) \quad (4)$$

$$EAAI = \left\{ (\text{赖氨酸}' / \text{赖氨酸}') \times 100 \times (\text{缬氨酸}' / \text{缬氨酸}') \times 100 \dots \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

式中: EAAI 为必需氨基酸指数(essential amino acid index); n 为必需氨基酸(essential amino acid, EAA)数量(单位: 种); t 表示样品蛋白质的氨基酸含量(单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); s 表示鸡蛋蛋白的氨基酸含量(单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。

味道强度值(taste activity value, TAV)是呈味物质在样品中的含量(concentration, C)(单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)与其味道阈值(taste threshold, T)(单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)的比值。

$$TAV = C/T \quad (6)$$

当 $TAV > 1$ 时, 表示该呈味物质对样品呈味作用显著, 数值越大影响越大; 当 $TAV < 1$ 时, 表示该呈味物质对样品的呈味作用不明显(陈素华等, 2022)。

1.2.5 重金属污染评价

采用单因子污染指数法(彭礼洪等, 2020)评价可口革囊星虫体壁肌肉重金属污染状况。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (7)$$

式中: P_i 为第 i 种重金属的污染指数, C_i 为重金属 i 的实测数值, S_i 为该重金属的最高评价标准允量。若 $P_i < 0.2$, 表示未受到污染; $0.2 \leq P_i \leq 0.6$, 表示受到轻度污染; $0.6 < P_i < 1$, 表示受到中度污染; $P_i \geq 1$, 表示受到重度污染。根据《GB2762-2022 食品安全国家标准食品中污染物限量》(中华人民共和国国家市场监督管理总局, 2022), Pb、Zn、As、Cd、Cu、Hg 的标准限量值分别为 0.5、50、0.1、1.0、50、0.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

重金属综合污染指数法(罗钦等, 2020):

$$P = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}} + P_{\text{max}}}{2}} \quad (8)$$

式中: P 为可口革囊星虫体内的重金属综合污染指数, P_{ave} 为可口革囊星虫各单项污染指数 P_i 的平均值, P_{max} 为可口革囊星虫各单项污染指数中最大值。当 $P \leq 1.0$ 时, 重金属污染为正常背景水平; 当 $1.0 < P \leq 2.0$ 时, 为轻度污染; 当 $2.0 < P \leq 3.0$ 时, 为中度污染; 当 $P > 3.0$ 时, 为重度污染。

采用美国国家环境保护局(United States Environmental Protection Agency, USEPA)提出的单一重金属危害系数(target hazard quotient, THQ)健康风险评估模型进行评估(罗钦等, 2020), THQ 计算方法如下:

$$THQ = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C_i}{R_{FD} \times W_{AB} \times T_A} \times 0.001 \quad (9)$$

式中: E_F 为人群暴露频率, 一般设定为 $365 \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; E_D 为暴露时间, 一般等于人均寿命, 取 70a; F_{IR} 为食物摄入率, 根据联合国粮农组织(FAO)统计数据, 成年人和儿童的平均水产动物摄入率分别为 $9.8 \text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$ 和 $6.8 \text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$; C_i 为可口革囊星虫体内重金属 i 的实测含量(单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); R_{FD} 为口服参考剂量(单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 重金属 Pb、Zn、As、Cd、Cu、Hg 的 R_{FD} 分别为 0.0040、0.3000、0.0003、0.0010、0.0400、0.0005; W_{AB} 为人体平均体重, 采用的是世界卫生组织(WHO)推荐的成年人均体重为 60kg, 儿童人均体重为 36kg; T_A 为非致癌性暴露平均时间, 取 $365 \times 70 = 25550 \text{d}$ (刘洋等, 2021)。

当 $THQ < 1$ 时, 则认定暴露人群无明显健康风险; 当 $THQ \geq 1$ 时, 则认定暴露人群存在健康风险。

复合重金属危害系数(compound target hazard quotient, TTHQ)计算公式:

$$TTHQ = \sum THQ \quad (10)$$

1.3 数据处理

用 EXCEL 软件对数据进行处理, 以平均值 $\pm$ 标准差表示; 应用 SPSS25.0 进行单因素方差分析和相关性分析。采用 Duncan 氏法进行组间多重比较, 显著水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 脂肪酸组成分析

北海、湛江和宁德 3 个地区的可口革囊星虫脂肪酸的组成成分如表 1 所示。3 个地区的可口革囊星虫均含有 22 种脂肪酸, 皆由 C12~C23 脂肪酸组成, 包括 11 种饱和脂肪酸(saturated fat acid, SFA), 4 种单不饱和脂肪酸(MUFA)和 7 种多不饱和脂肪酸(PUFA)。饱和脂肪酸主要为棕榈酸(C16:0)、十七碳酸(C17:0)和硬脂酸(C18:0), 含量为 8.25%~22.99%; 单不饱和脂肪酸主要为芥酸(C22:1n9), 含量分别为北海 27.71%、湛江 28.55%、宁德 31.15%, 北海地区低于湛江和宁德地区 ($p < 0.05$); 多不饱和脂肪酸主要为亚油酸(C18:2n6c)和二十碳三烯酸甘油三酯(C20:3n3), 含量

为 3.18%~10.06%, 其中 $n-3$ 型多不饱和脂肪酸含量分别为北海 12.32%、湛江 8.92%、宁德 8.21%, 差异显著($p<0.05$); $n-6$ 型多不饱和脂肪酸含量分别为 5.20%、4.46%、7.81%, 差异显著($p<0.05$); $n-3$ 型与 $n-6$ 型的比值($n-3/n-6$)分别为 2.37、2.00、0.99。此外, 3 个地区的可口革囊星虫的二十二碳六烯酸甲酯(docosahexaenoic acid, DHA)(C22:6 n 3) + 二十碳五烯酸(ethernet for plant automation, EPA)(C20:5 n 3)的含量分别为北海 2.26%、湛江 1.50%、宁德 1.95%, 湛江地区显著低于北海和宁德地区($p<0.05$), 且 EPA 与 DHA 的比值(EPA/DHA)分别为北海 7.37、湛江 6.14、宁德 7.86。此外, 3 个地区可口革囊星虫的脂肪酸高胆固醇血症指数(hypercholesterolemia index, HI)分别为北海 13.11、湛江 14.09、宁德 16.64, 致动脉粥样硬化指数(AI)分别为 0.49、0.49、0.56, 致血栓形成指数(TI)分别为 0.62、0.75、0.81。

表 1 3 个地区可口革囊星虫体壁肌肉的脂肪酸组成及含量
Tab.1 Composition of fatty acids of *P. esculenta* of three regions

脂肪酸	含量/%		
	北海	湛江	宁德
月桂酸(C12:0)	0.09±0.01 ^a	0.09±0.00 ^a	0.11±0.01 ^a
十三碳酸(C13:0)	0.11±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.10±0.00 ^a
肉豆蔻酸(C14:0)	3.98±0.22 ^b	3.36±0.38 ^c	4.64±0.19 ^a
十五碳酸(C15:0)	1.22±0.10 ^b	1.58±0.09 ^a	1.53±0.13 ^a
棕榈酸(C16:0)	9.13±1.27 ^c	10.73±1.11 ^b	12.00±0.20 ^a
十七碳酸(C17:0)	8.25±0.17 ^b	8.99±0.46 ^a	8.41±0.14 ^b
硬脂酸(C18:0)	22.99±0.32 ^a	22.59±0.88 ^b	21.64±0.35 ^c
花生酸(C20:0)	1.71±0.09 ^a	1.26±0.07 ^b	1.27±0.10 ^b
二十一碳酸(C21:0)	0.49±0.10 ^b	0.70±0.04 ^a	0.52±0.07 ^b
二十二碳酸(C22:0)	0.55±0.02 ^b	0.68±0.03 ^a	0.57±0.05 ^b
二十三碳酸(C23:0)	0.13±0.00 ^b	0.16±0.02 ^a	0.20±0.03 ^a
饱和脂肪酸(ΣSFA)	48.65±0.70 ^b	50.26±0.38 ^a	50.99±0.67 ^a
棕榈油酸(C16:1 n 7)	1.66±0.05 ^b	2.19±0.24 ^a	2.35±0.31 ^a
油酸(C18:1 n 9 c)	3.57±0.47 ^b	4.13±0.50 ^a	4.05±0.25 ^a
二十碳一烯(C20:1)	0.54±0.14 ^b	0.48±0.09 ^b	0.69±0.10 ^a
芥酸(C22:1 n 9)	27.71±1.29 ^c	28.55±0.96 ^b	31.15±0.82 ^a
单不饱和脂肪酸(ΣMUFA)	32.98±0.93 ^c	35.35±0.41 ^b	38.24±0.46 ^a
亚油酸(C18:2 n 6 c)	4.31±0.16 ^b	3.18±0.70 ^c	6.93±0.43 ^a
二十碳二烯(C20:2)	0.85±0.13 ^b	1.05±0.08 ^b	1.57±0.06 ^a
二十碳三烯酸甘油三酯(C20:3 n 3)	10.06±1.15 ^a	7.42±0.41 ^b	6.24±0.20 ^c
二十碳三烯酸甲酯(C20:3 n 6)	0.41±0.03 ^b	0.47±0.03 ^a	0.47±0.05 ^a
花生四烯酸(ARA, C20:4 n 6)	0.48±0.11 ^b	0.81±0.08 ^a	0.41±0.02 ^b
二十碳五烯酸(EPA, C20:5 n 3)	1.99±0.14 ^a	1.29±0.21 ^c	1.73±0.04 ^b
二十二碳六烯酸甲酯(DHA, C22:6 n 3)	0.27±0.03 ^a	0.21±0.02 ^b	0.22±0.00 ^b
多不饱和脂肪酸(ΣPUFA)	18.37±1.31 ^a	14.43±0.41 ^c	17.57±0.63 ^b
ΣPUFA $n-3$	12.32±1.10 ^a	8.92±0.56 ^b	8.21±0.22 ^c
ΣPUFA $n-6$	5.20±0.14 ^b	4.46±0.10 ^c	7.81±0.05 ^a
ΣUFA	51.35±0.87 ^b	49.78±0.72 ^c	55.81±0.55 ^a
EPA+DHA	2.26±0.16 ^a	1.5±0.22 ^c	1.95±0.04 ^b
EPA/DHA	7.37	6.14	7.86
$n-3/n-6$	2.37	2.00	1.05
ΣUFA/ΣSFA	1.06	0.99	1.09
ΣPUFA/ΣSFA	0.38	0.29	0.34
HI	13.11	14.09	16.64
AI	0.49	0.49	0.56
TI	0.63	0.75	0.81

注: UFA 表示不饱和脂肪酸; HI 表示高胆固醇血症指数(C14:0+C16:0); AI 表示致动脉粥样硬化指数; TI 表示血栓形成指数。不同的上标字母表示组间差异显著($p<0.05$)

2.2 水解氨基酸的组成分析

2.2.1 水解氨基酸的组成

酸水解处理, 北海、湛江和宁德 3 个地区可口革囊星虫体壁肌肉中均检测出 17 种水解氨基酸 (表 2), 包括 7 种必需氨基酸(essential amino acid, EAA)、3 种半必需氨基酸(half essential amino acid, HEAA)、4 种鲜味氨基酸(delicious amino acid, DAA)和 3 种非必需氨基酸(non essential amino acid, NEAA)。

3 个地区水解氨基酸含量无显著性差异, 氨基酸总量 (total amino acids, TAA) 由高到低依次为宁德 (161.49mg·g⁻¹)、北海 (159.70mg·g⁻¹)、湛江 (155.97mg·g⁻¹), EAA 由高到低依次为宁德 (49.6mg·g⁻¹)、北海 (48.07mg·g⁻¹)、湛江 (46.34mg·g⁻¹), DAA(包括天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸)含量从高到低依次为宁德 (71.37mg·g⁻¹)、湛江 (70.03mg·g⁻¹)、北海(70.00mg·g⁻¹); HEAA 含量则是北海地区最高(26.37mg·g⁻¹), 湛江地区和宁德地区含量相同(24.53mg·g⁻¹)。3 个地区可口革囊星虫体壁肌肉中 EAA 占 TAA 的比重, 由高到低依次为宁德(30.77%)、北海(30.10%)、湛江(29.71%); EAA 占 NEAA 的比重从高到低依次为宁德(44.45%)、北海(43.06%)、湛江 (42.27%)。

表 2 3 个地区可口革囊星虫水解氨基酸组成(单位: mg·g⁻¹)
Tab. 2 Composition of hydrolyzed amino acids of *P. esculenta* of three regions (unit: mg·g⁻¹)

水解氨基酸	北海	湛江	宁德
天冬氨酸 Asp ^{***}	16.23±2.19 ^a	15.63±0.07 ^a	16.33±0.04 ^a
苏氨酸 Thr [*]	7.57±1.13 ^a	7.30±0.35 ^a	7.67±0.14 ^a
丝氨酸 Ser	6.83±1.13 ^a	6.40±0.07 ^a	6.80±0.14 ^a
谷氨酸 Glu ^{***}	26.47±1.03 ^a	26.30±1.06 ^a	26.47±0.35 ^a
甘氨酸 Gly ^{***}	14.60±2.69 ^a	14.90±1.67 ^a	14.37±1.34 ^a
丙氨酸 Ala ^{***}	12.70±1.91 ^a	13.50±0.85 ^a	14.20±0.21 ^a
胱氨酸 Cys	1.10±0.14 ^a	1.07±0.14 ^a	1.27±0.07 ^a
缬氨酸 Val [†]	6.04±0.62 ^a	5.70±0.14 ^a	6.17±0.07 ^a
蛋氨酸 Met [*]	2.33±0.49 ^a	2.17±0.49 ^a	2.37±0.26 ^a
异亮氨酸 Ile [*]	5.37±0.78 ^a	5.27±0.28 ^a	5.67±0.07 ^a
亮氨酸 Leu [*]	11.93±1.63 ^a	11.57±1.13 ^a	12.27±0.14 ^a
酪氨酸 Tyr ^{**}	6.80±1.41 ^a	5.83±0.35 ^a	5.63±0.14 ^a
苯丙氨酸 Phe [*]	4.53±0.64 ^a	4.20±0.14 ^a	4.67±0.07 ^a
赖氨酸 Lys [*]	10.30±1.20 ^a	10.13±0.92 ^a	10.87±0.14 ^a
组氨酸 His ^{**}	2.27±0.42 ^a	2.17±0.07 ^a	2.53±0.01 ^a
精氨酸 Arg ^{**}	17.30±3.18 ^a	16.53±2.26 ^a	16.37±0.64 ^a
脯氨酸 Pro	7.33±1.06 ^a	7.30±0.99 ^a	7.83±0.21 ^a
氨基酸总量 TAA	159.70 ^a	155.97 ^a	161.49 ^a
必需氨基酸 EAA	48.07 ^a	46.34 ^a	49.69 ^a
非必需氨基酸 NEAA	111.63 ^a	109.63 ^a	111.80 ^a
半必需氨基酸 HEAA	26.37 ^a	24.53 ^a	24.53 ^a
鲜味氨基酸 DAA	70.00 ^a	70.03 ^a	71.37 ^a
DAA/TAA (%)	43.83	44.89	44.19
EAA/TAA (%)	30.10	29.71	30.77
EAA/NEAA (%)	43.06	42.27	44.45

注: *表示必需氨基酸; **表示半必需氨基酸; ***表示鲜味氨基酸。相同上标字母表示组间数据无显著差异($p<0.05$)

2.2.2 水解氨基酸营养价值评价

根据 FAO/WHO 氨基酸评分标准模式计算氨基酸评分(AAS)、化学评分(CS)和必需氨基酸指数(EAAI)评价 3 个地区可口革囊星虫体壁肌肉的营养品质, 结果如表 3 所示。从 AAS 评分来看, 北海可口革囊星虫 0.10~0.19, 湛江可口革囊星虫 0.09~0.19, 宁德可口革囊星虫 0.10~0.20; 3 个地区可口革囊星虫的第一限制性氨基酸均为蛋氨酸+胱氨酸, 第二限制性氨基酸为缬氨酸。由 CS 作为评分标准时, 北海地区可口革囊星虫 0.06~0.16, 湛江地区可口革囊星虫 0.05~0.16, 宁德地区可口革囊星虫 0.06~0.16; 3 个地区可口革囊星虫第一和第二限制性氨基酸与 AAS 评分的结果相同。根据 EAAI 指数可知, 3 个地区由高到低依次为宁德 11.37、北海 11.14、湛江 10.62, 说明宁

德可口革囊星虫营养价值更高。

2.3 游离氨基酸组成分析

由表 4 可知, 北海可口革囊星虫含有 15 种游离氨基酸, 无胱氨酸和蛋氨酸; 湛江可口革囊星虫含有 16 种游离氨基酸, 无蛋氨酸; 宁德可口革囊星虫含有 16 种游离氨基酸, 无胱氨酸。3 个地区可口革囊星虫游离氨基酸含量存在显著差异($p<0.05$), 总量由高到低依次为湛江(9.08mg·g⁻¹)、宁德(7.94mg·g⁻¹)、北海(4.85mg·g⁻¹)。鲜、甜味的氨基酸主要包括天冬氨酸(Asp)、苏氨酸(Thr)、丝氨酸(Ser)、谷氨酸(Glu)、甘氨酸(Gly)、丙氨酸(Ala)、脯氨酸(Pro)共 7 种, 其含量由高到低依次为湛江(7.95mg·g⁻¹)、宁德(7.07mg·g⁻¹)、北海(4.11mg·g⁻¹), 湛江和宁德地区显著高于北海地区 ($p<0.05$)。

表 3 3 个地区可口革囊星虫必需氨基酸组成的评价
Tab. 3 Evaluation of essential amino acids of *P. esculenta* of three regions

氨基酸	FAO/WHO 评分	鸡蛋蛋白	北海		湛江		宁德	
			AAS	CS	AAS	CS	AAS	CS
苏氨酸(Thr)	250	292	0.19	0.16	0.18	0.16	0.19	0.16
缬氨酸(Val)	310	411	0.12	0.09	0.11	0.09	0.12	0.09
蛋氨酸+胱氨酸(Met+Cys)	220	386	0.10	0.06	0.09	0.05	0.10	0.06
异亮氨酸(Ile)	250	331	0.13	0.10	0.13	0.10	0.14	0.11
亮氨酸(Leu)	440	534	0.17	0.14	0.16	0.14	0.17	0.14
苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Thr)	380	565	0.19	0.13	0.16	0.11	0.17	0.11
赖氨酸(Lys)	340	441	0.19	0.15	0.19	0.14	0.20	0.15
EAAI			11.14		10.62		11.37	

表 4 3 个地区可口革囊星虫游离氨基酸组成和 TAV 值
Tab. 4 The contents and TAV of free amino acids in *P. esculenta* of three regions

游离氨基酸	呈味特性	味道阈值/ (mg·g ⁻¹)	含量/(mg·g ⁻¹)			TAV		
			北海	湛江	宁德	北海	湛江	宁德
天冬氨酸 Asp	鲜(+)	1.0	0.44±0.05 ^b	0.74±0.01 ^a	0.47±0.05 ^b	0.44	0.74	0.47
苏氨酸 Thr	甜(+)	2.6	0.14±0.03 ^a	0.15±0.05 ^a	0.13±0.02 ^a	0.05	0.06	0.05
丝氨酸 Ser	甜(+)	1.5	0.10±0.04 ^a	0.12±0.04 ^a	0.05±0.00 ^a	0.01	0.01	0.03
谷氨酸 Glu	鲜(+)	0.3	0.61±0.16 ^b	0.91±0.11 ^a	0.60±0.03 ^b	2.03	3.03	2.00
甘氨酸 Gly	甜(+)	1.3	1.77±0.06 ^c	2.93±0.21 ^a	2.33±0.15 ^b	1.36	2.25	1.79
丙氨酸 Ala	甜(+)	0.6	0.94±0.01 ^b	2.17±0.23 ^a	2.43±0.12 ^a	1.57	3.62	4.05
胱氨酸 Cys	苦/甜/硫(-)	ND	—	0.20±0.07	—	—	—	—
缬氨酸 Val	甜/苦(-)	0.4	0.08±0.02 ^a	0.11±0.03 ^a	0.06±0.01 ^a	0.20	0.28	0.15
蛋氨酸 Met	苦/甜/硫(-)	0.3	—	—	0.05±0.00	—	—	0.20
异亮氨酸 Ile	苦(-)	0.9	0.03±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.02±0.00 ^a	0.03	0.03	0.02
亮氨酸 Leu	苦(-)	1.9	0.10±0.04 ^a	0.10±0.03 ^a	0.13±0.05 ^a	0.01	0.01	0.07
酪氨酸 Tyr	苦(-)	ND	0.16±0.00 ^a	0.09±0.02 ^a	0.10±0.00 ^a	—	—	—
苯丙氨酸 Phe	苦(-)	0.9	0.09±0.00 ^a	0.09±0.00 ^a	0.13±0.01 ^a	0.10	0.10	0.14
赖氨酸 Lys	甜/苦(-)	0.5	0.15±0.05 ^b	0.27±0.04 ^a	0.12±0.05 ^b	0.30	0.54	0.24
组氨酸 His	苦(-)	0.2	0.05±0.00 ^b	0.11±0.02 ^a	0.13±0.01 ^a	0.25	0.55	0.60
精氨酸 Arg	苦/甜(+)	0.5	0.08±0.01 ^a	0.09±0.04 ^a	0.08±0.01 ^a	0.16	0.18	0.16
脯氨酸 Pro	甜/苦(+)	3.0	0.20±0.01 ^b	1.10±0.18 ^a	1.07±0.06 ^a	0.07	0.36	0.35
氨基酸总量 TAA			10.30 ^c	8.47 ^a	6.58 ^b			
鲜甜味氨基酸			4.11 ^b	7.95 ^a	7.07 ^a			
苦味氨基酸			0.74 ^b	1.13 ^a	0.87 ^b			

注: ND 表示阈值未找到;—表示未检测出。TAV: 味道强度值。不同的上标字母表示组间差异显著($p<0.05$)

北海可口革囊星虫各已知刺激阈值的游离氨基酸按呈味强度 TAV 的大小排序为: 谷氨酸(2.03) > 丙氨酸(1.57) > 甘氨酸(1.36) > 天冬氨酸(0.44) > 赖氨酸(0.33) > 组氨酸(0.25) > 缬氨酸(0.20) > 精氨酸(0.16); 湛江由高到低为: 丙氨酸(3.62) > 谷氨酸(3.03) > 甘氨酸(2.25) > 天冬氨酸(0.74) > 组氨酸(0.55) > 赖氨酸(0.54) > 脯氨酸(0.36) > 缬氨酸(0.28) > 精氨酸(0.18); 宁德的排序为: 丙氨酸(4.05) > 谷氨酸(2.00) > 甘氨酸(1.79) > 天冬氨酸(0.74) > 组氨酸(0.55) > 赖氨酸(0.54) > 脯氨酸(0.36) > 缬氨酸(0.28) > 精氨酸(0.16)。

2.4 重金属含量分析与评价

2.4.1 重金属含量特征

经过对北海、湛江、宁德 3 个地区的可口革囊星虫样品进行检测(表 5), 结果显示, 3 个地区的可口革囊

星虫体内重金属 Pb 含量均超出了限量标准值(0.5mg·kg⁻¹), 超出部分分别为: 北海(0.85mg·kg⁻¹)、湛江(1.99mg·kg⁻¹)、宁德(4.06mg·kg⁻¹), 重金属 As 含量也超出了限量标准值(0.1mg·kg⁻¹), 超出部分分别为 0.38mg·kg⁻¹、0.75mg·kg⁻¹、0.98mg·kg⁻¹; 其他项的重金属含量均没有超出重金属限量标准值。总体上看北海、湛江的可口革囊星虫体内各重金属元素含量大体呈现出 Zn > Pb > Cu > As > Cd > Hg 的规律, 而宁德地区的重金属含量规律为 Zn > Cu > Pb > As > Cd > Hg。

2.4.2 重金属污染评价

单因子污染指数计算结果表明(表 6): 北海可口革囊星虫受到重金属 Pb 的重度污染($P_i > 1$), As 的中度污染($0.6 \leq P_i < 1$), Zn 和 Cd 的轻度污染($0.2 \leq P_i < 0.6$), Cu、Hg 都处于正常背景水平($P_i < 0.2$); 湛江可口革囊星虫受到重金属 Pb 和 As 的重度污染, Zn 的轻度

表 5 可口革囊星虫体内重金属含量水平

Tab. 5 Levels of heavy metals in *P. esculenta*

采样点	重金属含量/(mg·kg ⁻¹)					
	Pb	Zn	As	Cd	Cu	Hg
北海	1.35±0.03	10.23±0.20	0.48±0.05	0.25±0.02	1.38±0.25	0.04±0.00
湛江	2.49±0.30	7.44±0.44	0.85±0.09	0.06±0.01	1.15±0.09	0.02±0.00
宁德	4.56±0.21	15.23±1.10	1.08±0.11	0.08±0.02	5.62±1.61	0.03±0.00
限量标准值/(mg·kg ⁻¹)	0.50	50.00	0.10	1.00	50.00	0.50

表 6 重金属单因子污染指数和综合污染指数

Tab. 6 Single pollution index and integrated pollution index of heavy metals in *P. esculenta*

采样点	单因子污染指数 P_i						综合污染指数(P)
	Pb	Zn	As	Cd	Cu	Hg	
北海	1.35	0.20	0.96	0.25	0.03	0.08	0.96
湛江	2.49	0.27	1.72	0.06	0.02	0.04	1.28
宁德	4.50	0.30	2.10	0.08	0.11	0.06	1.69

污染, Cd 和 Cu、Hg 都处于正常背景水平; 宁德可口革囊星虫受到重金属 Pb 和 As 的重度污染, Zn 的轻度污染, Cd 和 Cu、Hg 也均处于正常背景水平。总体上看, 3 个地区的可口革囊星虫都受到重金属 Pb 的重度污染, 其中宁德地区的最为严重。

重金属综合污染指数分析结果显示(表 6): 北海可口革囊星虫综合污染指数为 0.96 ($P \leq 1.0$), 重金属污染接近轻度污染水平; 湛江和宁德可口革囊星虫综合污染指数分别为 1.28、1.69, 均受到重金属的轻度污染($1.0 < P \leq 2.0$)。

表 7 不同地理群体可口革囊星虫重金属目标危害系数

Tab. 7 Target hazard quotients of heavy metals for different geographic groups of *P. esculenta*

人群	地名	单一重金属危害系数(THQ)						复合重金属危害系数(TTHQ)
		Pb	Zn	As	Cd	Cu	Hg	
成人	北海	0.051	0.005	0.240	0.038	0.005	0.012	0.351
	湛江	0.090	0.004	0.430	0.009	0.004	0.006	0.543
	宁德	0.171	0.008	0.540	0.012	0.021	0.009	0.761
儿童	北海	0.056	0.006	0.267	0.045	0.006	0.013	0.393
	湛江	0.100	0.004	0.470	0.010	0.005	0.007	0.596
	宁德	0.190	0.008	0.600	0.013	0.023	0.010	0.844

进一步分析各重金属对 TTHQ 的贡献率, 各地区成人和儿童的变化趋势类似。以成人为例, 北海地区贡献率大小排序为 $As > Pb > Cd > Hg > Zn = Cu$, 其中重金属 As、Pb、Cd 的比例分别为 68.38%、14.53%、10.38%; 湛江地区为 $As > Pb > Cd > Hg > Zn = Cu$, 其中 As 和 Pb 的比例分别为 79.20%、16.57%; 宁德地区为 $As > Pb > Cu > Cd > Hg > Zn$, 其中 As 和 Pb 的比例分别为 70.96%、22.47%。这说明在北海可口革囊星虫生活环境中 As、Pb 和 Cd 是主要风险元素; 在湛江和宁德地区 As 和 Pb 是主要风险元素。

2.4.3 食用健康风险评价

根据 3 个不同地理群体可口革囊星虫体内的重金属平均含量和人均消耗量, 对目标危害系数进行评价(表 7)。结果显示: 北海和湛江地区均表现为 $As > Pb > Cd > Hg > Cu = Zn$; 宁德地区则表现为 $As > Pb > Cu > Cd > Hg > Zn$ 。其次, 3 个地区可口革囊星虫的单一重金属危害系数值(THQ)均小于 1, 复合重金属危害系数值(TTHQ)也均小于 1, 说明不管是大人还是儿童长期食用这种可口囊星虫也不会造成潜在的重金属健康风险, 即食用安全性高。

3 讨论

3.1 不同地区可口革囊星虫脂肪酸组成特征与含量评价

脂肪酸在人体中发挥着不可替代的作用, 是机体的主要能量来源之一, 也是合成其他重要化合物的主要原料。同时, 肌肉中脂肪酸的组成和含量也是影响肌肉肉质的重要因素(刘静龙, 2022a)。本次研究在北海、湛江和宁德 3 个地区可口革囊星虫中检测到均含 22 种脂肪酸, 不同地区可口革囊星虫饱和脂肪酸含量依次为宁德(50.99%) > 湛江(50.26%) > 北海(48.65%),

由此可知宁德地区的可口革囊星虫的饱和脂肪酸营养价值较高。另外, 3 个地区可口革囊星虫饱和脂肪酸都主要由棕榈酸(C16:0)、十七碳酸(C17:0)、硬脂酸(C18:0)组成。棕榈酸(C16:0)有利于调节神经系统的发育, 促进躯体的生长和预防动脉粥样硬化; 十七碳酸(C17:0)可以提高胰岛素敏感性, 降低糖尿病的风险, 减少患心血管疾病的风险, 硬脂酸(C18:0)对于血液中胆固醇含量无上升作用(贾俊琦等, 2023)。因此, 食用这 3 个地区的可口革囊星虫不仅可以降低患心脑血管疾病的风险, 还对机体的生长发育起着一定的保健作用。棕榈酸(C16:0)+肉豆蔻酸(C14:0)之和构成高胆固醇血症指数(HI), 其中 C14:0 可有效增加血清胆固醇含量(Paszczyk et al, 2022), 3 个地区可口革囊星虫 HI 值大小排序为宁德(16.64) > 湛江(14.09) > 北海(13.11), 北海地区的 HI 值最低, 故相较于宁德和湛江地区, 食用北海地区可口革囊星虫对于增加患心血管病的风险更小。

不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA)在人体代谢活动中有重要作用, 可以有效降低血液中的胆固醇含量和血小板的粘附性, 而水产品是公认的不饱和脂肪酸的重要来源(崔丽莉等, 2021)。本研究湛江地区可口革囊星虫不饱和脂肪酸的含量(49.78%)显著低于北海地区(51.35%)和宁德地区(55.81%)($p < 0.05$), 且除湛江地区外, 北海和宁德地区的 UFA 含量均高于 SFA 含量。多不饱和脂肪酸(PUFA)的含量是评价水产品营养价值的重要指标之一并决定着肌肉的适口性, 3 个地区的可口革囊星虫 PUFA 含量湛江(14.43%)显著低于宁德(17.57%)和北海(18.37%)($p < 0.05$), 故北海地区的可口革囊星虫适口性最好。同时, 3 个地区可口革囊星虫的 PUFA 含量均高于牛肉、羊肉、猪肉等大部分肉类和巴氏牛奶、鲜牛奶、鸡蛋、鸭蛋, 以及高于鲢鱼、带鱼、鲳鱼、乌鱼、白蛤等常见水产种类(宋长虹等, 2014)。由此可见, 3 个地区可口革囊星虫肌肉脂肪酸的营养价值较高。研究表明, 富含 $n-3$ PUFA 的饮食可以减少脂肪积累且 $n-3$ PUFA 本身具有生物活性, 成年人食用 $n-3/n-6$ PUFA 比值高的食物可以增强抵抗肥胖的能力(楼乔明等, 2016)。本研究中, 3 个地区可口革囊星虫 $n-3$ 型的多不饱和脂肪酸含量均比 $n-6$ 型的多不饱和脂肪酸含量高, 两者比值 $n-3/n-6$ 分别为北海 2.37、湛江 2.00、宁德 1.05, 并且 3 个地区的 $n-3/n-6$ 都远高于世界卫生组织(1993)所推荐的日常膳食比值(0.1~0.2), 表明 3 个地区的可口革囊星虫都具有较高的膳食营养价值, 食用后不易发胖。

EPA 和 DHA 具有抗血栓、调整血脂等重要作用, 是人体必需的多不饱和脂肪酸(Araujo et al, 2021)。可口革囊星虫 EPA+DHA 含量依次为北海(2.26%) > 宁德(1.95%) > 湛江(1.5%); 3 个地区的可口革囊星虫的 EPA 与 DHA 的比值为北海 7.37、湛江 6.14、宁德 7.86, 均超过 FAO/WHO 给出的最佳比例 5.0, 具有一定的药用价值, 均可作为摄入 EPA+DHA 的重要食物来源。根据 FAO/WHO 提出的脂肪酸平衡模式, 膳食中饱和、单不饱和、多不饱和脂肪酸的比值(SFA:MUFA:PUFA)应达到 1:1:1, 则有助于人体营养均衡。根据本研究的结果, 3 个地区可口革囊星虫 SFA:MUFA:PUFA 的比例分别为北海 2.63:1.79:1、湛江 3.49:2.50:1、宁德 2.90:2.18:1, 其中, 北海地区可口革囊星虫的比例更接近理想比值。由数值可见, 食用 3 个地区的可口革囊星虫有助于人体摄入均衡的营养。

本研究利用致动脉粥样硬化指数(AI)和血栓形成指数(TI)来评价 3 个地区可口革囊星虫的脂肪酸组成可能产生的心脑血管疾病风险, AI 和 TI 的值越低, 患心血管疾病的风险就越低(楼乔明等, 2016)。3 个地区可口革囊星虫的 AI 值分别为北海 0.49、湛江 0.49、宁德 0.56, 低于牛肉(0.72)、羊肉(1.00)和猪肉(0.60)这 3 种肉类; 其 TI 值分别为北海 0.62、湛江 0.75、宁德 0.81, 也均低于牛肉(1.06)、羊肉(1.58)和猪肉(1.37)(Ulbricht et al, 1991), 表明 3 个地区可口革囊星虫脂肪酸的不饱和度高, 对于降低人类血液系统中的血脂和胆固醇含量从而减少患心脑血管疾病风险有良好的作用, 具有一定的营养食用和保健价值。

3.2 不同地区可口革囊星虫水解氨基酸组成特征及评价

氨基酸是组成蛋白质的基础物质, 在生物体的生理机能调节和生命活动的维持中起着重要作用。因水解过程中色氨酸被酸破坏, 没有测出色氨酸的含量(李婉君, 2015)。3 个地区可口革囊星虫共检测出 17 种氨基酸, 包括 7 种必需氨基酸(EAA), 3 种半必需氨基酸(HEAA), 4 种鲜味氨基酸(DAA)和 3 种非必需氨基酸(NEAA), 其中含量最高的是谷氨酸, 与周化斌等(2006)对浙江温州、梁川等(2016)和董兰芳等(2017)对北海可口革囊星虫的分析结果类似, 表明这 3 个地区可口革囊星虫的氨基酸组成丰富, 是较好的蛋白质来源。虽 3 个地区的可口革囊星虫所含氨基酸种类一致, 但含量略有差别, 肌肉氨基酸总量(TAA)由高到低为宁德($161.49\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、北海($159.70\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、湛江($155.97\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。必需氨基酸(EAA)是人体发育必不可

少的物质且只能从食物中摄取, 3 个地区 EAA 含量分别占总氨基酸的 30.10% (北海)、29.71% (湛江)、30.77% (宁德), 均与 FAO/WHO (1993)推荐的优质蛋白标准(36%)相近。因此, 3 个地区可口革囊星虫均属于优质蛋白, 宁德地区最优。另外, 3 个地区样品中 EAA 都主要由亮氨酸和赖氨酸组成, 亮氨酸和赖氨酸的含量也呈现出由宁德地区(12.27、10.87mg·g⁻¹)、北海地区(11.93、10.30mg·g⁻¹)、湛江地区(11.57、10.13mg·g⁻¹)依次递减。亮氨酸有着氧化供能、促进蛋白质合成和提高免疫力等功能, 而赖氨酸又被称为生长性氨基酸参与蛋白质的合成, 有利于提高人体对蛋白质的利用率和促进脂肪氧化(金洪宇 等, 2022)。这说明 3 个地区可口革囊星虫的营养价值比较高, 食用可有效地提高人体免疫力。此外, 宁德地区的可口革囊星虫肌肉中 EAA/NEAA 值(44.45%)高于北海地区(43.06%)和湛江地区(42.27%)。相较之下, 宁德地区的可口革囊星虫氨基酸价值更高。

鲜味氨基酸(DAA)决定着可口革囊星虫肉质的口感和风味。3 个地区鲜味氨基酸(DAA)含量均较高, 分别占氨基酸总量的 43.83%、44.89%、44.19%, 接近中国圆田螺(*Cipangopaludina chinensis*)(44.69%)(罗辉等, 2021)、近江牡蛎(*Crassostrea ariakensis*)(42.16%)(迟淑艳 等, 2007)、九孔鲍(*Haliotis diversicolor*)(40.15%)(迟淑艳 等, 2007)、纵肋织纹螺(*Nassarius variciferus*)(42.94%)(刘静龙, 2022b)等一些贝类; 高于大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)(8.43%)(宋理平等, 2013)、中国花鲈(*Lateolabrax maculatus*)(7.61%)(宋理平等, 2013)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)(34.96%)(孟丽华 等, 2019)、鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)(39.35%)(孟丽华 等, 2019)等一些鱼类; 也高于日本无针乌贼(*Sepiella japonica*)(32.39%)(贾俊琦等, 2023)和金乌贼(*Sepia esculenta*)(32.98%)(贾俊琦等, 2023)等。同时, 研究表明水产动物肌肉味道的鲜美程度主要是丙氨酸、甘氨酸、天冬氨酸和谷氨酸 4 种鲜味氨基酸决定(杜宁宁 等, 2022)。本研究中 3 个地区可口革囊星虫 DAA 含量由高到低顺序均为谷氨酸、天冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸, 谷氨酸不仅是鲜味最强的氨基酸, 还可以调节神经功能, 促进记忆以及智力发育。由此可见, 3 个地区可口革囊星虫不仅肉质鲜美, 而且对维持人体健康有一定作用。

根据 FAO/WHO 评分模式, 以 AAS 和 CS 为标准时, 3 个地区的可口革囊星虫的第一、第二限制性氨基酸均分别为蛋氨酸+胱氨酸、缬氨酸, 说明这 3 种氨

基酸影响其营养价值, 在今后对可口革囊星虫进行深加工时可适当添加这些限制性氨基酸。EAAI 指数也是用来评价食物中蛋白质营养价值的重要指标之一, 当 EAAI < 0.75 时为不适蛋白源; 0.75 ≤ EAAI ≤ 0.85 为可用蛋白源; 0.85 < EAAI ≤ 0.95 为良好蛋白源; EAAI > 0.95 为优质蛋白源(冀德伟 等, 2022)。本研究中, 3 个地区 EAAI 值分别为宁德 11.37、北海 11.14 和湛江 10.62, 说明 3 个地区可口革囊星虫均可作为理想的蛋白源。

3.3 不同地区可口革囊星虫游离氨基酸组成及呈味特性评价

游离氨基酸是形成海洋生物滋味的重要组成部分, 其组成和含量极大程度决定了海洋生物的鲜美程度(郭建港 等, 2022)。本研究中, 3 个地区可口革囊星虫游离氨基酸总量差异显著($p < 0.05$), 湛江和宁德地区共检测出 16 种游离氨基酸, 北海检测出 15 种游离氨基酸, 其中谷氨酸、甘氨酸和丙氨酸含量均最高。根据游离氨基酸的呈味特性, 可以将其分为鲜味、甜味和苦味等类型(Ylva, 2006)。3 个地区可口革囊星虫鲜味氨基酸均包含 2 种, 分别为天冬氨酸和谷氨酸; 甜味氨基酸包括 5 种, 分别为苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸和脯氨酸; 其他均为苦味氨基酸。

呈味物质的量及其味道阈值共同决定了人们对食物味道的感知, 当 TAV > 1 时该呈味物质对样品呈味有显著影响且数值越大贡献越大(曾莉婷 等, 2020)。本研究中, 北海可口革囊星虫体壁肌肉中 TAV > 1 的游离氨基酸为谷氨酸(2.03)、丙氨酸(1.57)和甘氨酸(1.36), 且呈味程度依次递减; 湛江可口革囊星虫体壁肌肉中 TAV > 1 的呈味氨基酸为丙氨酸(3.62)、谷氨酸(3.03)、甘氨酸(2.25), 呈味程度依次递减; 宁德可口革囊星虫体壁肌肉中 TAV > 1 的呈味氨基酸为丙氨酸(4.05)、谷氨酸(2.00)、甘氨酸(1.79)且呈味程度依次递减。由此可见, 对滋味有重要贡献的游离氨基酸为丙氨酸、谷氨酸和甘氨酸, 谷氨酸与鲜味有关, 丙氨酸和甘氨酸与甜味有关。对北海地区来说, 以鲜味为主; 而对于湛江和宁德地区来说, 以甜味为主。除这 3 种氨基酸外, 其他鲜甜味氨基酸虽对滋味呈现不起主要影响, 但能起增强效应。例如 Vandendool 等(1963)的研究表明, 高浓度的脯氨酸呈现苦味, 而低浓度的脯氨酸却呈现出甜味。就鲜、甜味氨基酸总量而言, 湛江和宁德地区显著高于北海地区($p < 0.05$), 这说明湛江和宁德地区可口革囊星虫的味道比北海地区更为鲜美。

人们通常在新鲜的水产品中感受不到苦味。另外, Lioe 等(2005)的研究结果表明苦味氨基酸含量低于其呈味阈值时, 呈现增强其他氨基酸鲜味和甜味的效果。本研究在 3 个地区可口革囊星虫中共检测的苦味氨基酸, 包括苯丙氨酸、组氨酸、赖氨酸、缬氨酸、精氨酸等, 它们的含量均远低于其相应阈值。苦味氨基酸中缬氨酸、赖氨酸、组氨酸和精氨酸在 3 个地区中的呈味强度均表现为 $0.15 < \text{TAV} < 1$ 。组氨酸与其他呈味物质共存时, 可增加鲜味, 使得水产品形成特有的肉香特征。多数海鲜中均含有高量的精氨酸, 它赋予水产品很适宜的风味, 也是一种重要的呈味物质(翁丽萍 等, 2015)。苯丙氨酸在 3 个地区中的呈味强度 TAV 表现为北海=湛江(0.10) < 宁德=0.14。据报道, 将 $0.5 \sim 5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的苯丙氨酸加入含有谷氨酸钠和盐的溶液中, 可明显提高溶液的鲜味, 酪氨酸也有类似作用(Dermiki et al, 2013)。此外, 湛江地区可口革囊星虫总的苦味氨基酸含量 ($1.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 与北海地区 ($0.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和宁德地区 ($0.87 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 呈差异显著 ($p < 0.05$), 这说明湛江地区可口革囊星虫呈味特性更加复杂。

3.4 不同地区可口革囊星虫重金属含量分析及健康风险评价

本研究共检测 3 个不同地理群体可口革囊星虫中体内的 6 种重金属含量, 含量相差很大。总体上看, 宁德地区可口革囊星虫体内 6 种重金属的含量都要比北海及湛江地区可口革囊星虫体内重金属的含量高, 生活环境的不同可能造成同一生物体内重金属含量的不同(陈海南 等, 2022)。北海和湛江地理群体可口革囊星虫体内重金属呈现出 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ 的规律, 而宁德地区的重金属含量规律为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$; 3 个地理群体 Zn 和 Cu 含量较高, Zn 和 Cu 为生物生命所必需的微量元素, 而 Pb、Cd、As、Hg 为非必需元素, 可能是由于自然条件下生命必需元素的背景含量通常高于非生命必需元素的含量(吴迪, 2020), 这与河蚬 (*Corbicula fluminea*) (孙平跃 等, 2004)、近江牡蛎 (*Crassostrea rivularis*) (莫小荣 等, 2019)、花蛤 (*Ruditapes philippinarum*) (阮金山 等, 2001) 等贝类的研究结果一致。然而, Pb 和 As 在各地理群体间含量均超出了限量标准, 并且北海和湛江群体 Pb 的含量高于 Cu, 说明这 3 个地区的重金属 Pb 和 As 的污染比较严重, 这可能是由于工业和渔业的发展, 各种废弃物品未经标准处理再排放, 导致周围海洋环境和生活在其中的生物均受到影响。另外, 也可能

与生物自身富集重金属的能力以及栖息地底泥重金属含量有关(高业田 等, 2012)。此外, 相关研究表明富集于水生生物体内的重金属含量累计超过其承受能力, 可能会毒害它们的生殖、生长和发育等方面(徐承香 等, 2020)。因此, 食用采自这 3 个地区可口革囊星虫时, 需要关注这些污染的源头。

利用单因子污染指数和综合污染指数对 3 个地区可口革囊星虫体内重金属含量进行评价, 结果显示: 宁德地区可口革囊星虫受到重金属污染较为严重 ($P = 1.69$), 达到轻度污染水平, 其中 Pb 和 As 的污染贡献最大, 单因子污染指数分别为 $P_{\text{Pb}} = 4.50$ 、 $P_{\text{As}} = 2.10$, 达到重度污染水平, 以及 Zn 的轻度污染 ($P_{\text{Zn}} = 0.3$); 湛江地区达到轻度污染水平 ($P = 1.28$), Pb 和 As 的污染贡献最大, 单因子污染指数分别为 $P_{\text{Pb}} = 2.49$ 、 $P_{\text{As}} = 1.72$, 达到重度污染水平, Zn 的轻度污染 ($P_{\text{Zn}} = 0.27$); 北海地区受到重金属的污染最小 ($P = 0.96$), 达到警戒水平, 主要是受到 Pb 的危害最大 ($P_{\text{Pb}} = 1.35$), 达到重度污染水平, 其次为 As 的中度污染 (0.96), 达到警戒水平, Zn 和 Cd 的轻度污染 ($P_{\text{Zn}} = 0.20$ 、 $P_{\text{Cd}} = 0.25$)。本研究的第 1 个采样点为福建省宁德市霞浦县溪南镇, 位于东吾洋海域, 为内湾性缺口型海湾且无河流注入, 该海湾内呈带状分布有养殖塘, 整个海湾遍布藻、贝和虾的养殖(倪正泉, 1993)。本研究中宁德地区受到 Pb 的污染最为严重, 考虑到可口革囊星虫中 Pb 的含量与栖息地底泥中的含量相关性不明显(高业田 等, 2012), 其主要受到自然源的影响(自然风化累积的结果), 同时还叠加一小部分来自于水产养殖的污染; As 主要来源于水产养殖的污染(卢欣, 2020)。因此, 建议加强该地区养殖用水的治理。东海岛位于雷州湾和湛江湾之间, 雷州湾内是东海道养殖比较密集的区域, 养殖废水排放进入通明湾可能导致重金属的沉积; 湛江湾沿海有较多的工厂和码头, 可能会受到区域性排污的影响。本研究中, 湛江地区采样区域受到 Pb 和 As 的重度污染, Pb 和 As 主要来源于海湾工业排污、机动车尾气的排放和大气沉降(刘加飞, 2013)。因此, 建议加强该地区工业污水的治理和环境监测。广西北海市白沙镇采样区域位于铁山港海域, 在广西北部湾的东北部海域, 是重要的港口运输基地, 船舶烟气排放、船舶防腐涂料及船运污染源是造成 Pb 污染的一个主要原因(Mortazavi et al, 2022; 曲良 等, 2023); As、Cd 主要来源于网箱养殖和工业生产(青尚敏 等, 2021)。因此, 建议该地区控制船舶污染的同时严格把控人类活动所带来的影响。

以往的研究也曾揭示 Pb 和 As 对 3 个海域滩涂构成的生态风险呈上升趋势(Yang et al, 2021; Zhang et al, 2021; Li et al, 2023), 本文的结果与以往的研究结论有很大的相似性。此外, 3 个地区均受到了 Zn 的轻度污染, 可能与水产养殖过程中投放的饵料和肥料中含有 Zn 有关。但在食品安全浓度范围内, 可口革囊星虫 Zn 的含量越高, 其营养价值也越大(高业田 等, 2012)。最后, 本次研究选取的采样点数量具有一定的局限性, 后续可通过增加采样点进一步说明 3 个地区可口革囊星虫重金属污染的问题。

可口革囊星虫作为一种功能性的食物, 已经大量进入到人们的生活中, 除了日常小吃, 还有部分用于制备药物, 然而本研究中 3 个地区可口革囊星虫均受到一定程度的重金属污染。因此人们更应该关注可口革囊星虫的食用与药用安全性。本研究对 3 个地区可口革囊星虫肌肉组织中的重金属含量进行健康风险评价, 结果表明 3 个地区可口革囊星虫对成人和儿童的 THQ 均小于 1, TTHQ 也均小于 1, 说明目前居民食用这 3 个地区可口革囊星虫不存在潜在的健康风险。6 种重金属对 3 个地区可口革囊星虫 TTHQ 的贡献率趋势相似, 其中 As 对成人和儿童的贡献率均最高, 是最主要的风险元素。As 是已知的人体致癌物, 摄入后可能导致引起肾癌、皮肤癌和精神紊乱, 严重威胁人类的身体健康(刘洋 等, 2021)。因此, 应优先对 3 个地区可口革囊星虫中的 As 予以防控, 可采取相关措施控制 3 个研究区域排放含 As 的养殖废水及其他人为活动的影响, 降低 As 通过食物链在人体内蓄积而产生毒害效应。3 个地区 Pb 的贡献率仅次于 As, 根据美国环境保护署综合风险信息系统的分类信息, Pb 属于可能的人体致癌物, 可引起肝硬化或肝坏死等症状。除了 Pb 和

As 外, 北海采样点 Cd 对 TTHQ 的贡献率也较高。国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将 Cd 归为 I 类致癌物, 可诱导 DNA 损伤, 引起胚胎发育异常等(De Angelis et al, 2017)。青尚敏等(2021)采集广西铁山港邻近海域沉积物并测定 7 种重金属含量, 发现该区域 Cd 含量符合《GB 18668-2002 海洋沉积物质量》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002)一类标准, 但受人类活动影响, 其潜在风险指数较高。这说明该研究区域 Cd 具有一定的健康风险, 应予以警惕。本研究中儿童的 THQ 和 TTHQ 均高于成人, 其 TTHQ 约是成人的 1.1 倍, 说明儿童处在成长发育的特殊阶段, 对重金属的敏感性高于成人, 更加容易受到重金属的危害。为了儿童的健康成长, 应该对儿童食用可口革囊星虫加以严格的检测与管控, 可适当降低食用量和食用频率。

综上所述, 3 个地区可口革囊星虫的肌肉营养价值均衡, 能满足人类的营养需求, 可作为人类优质的蛋白质来源。但可能由于其栖息环境的差别, 不同地区可口革囊星虫对环境产生了一定适应性, 其肌肉的脂肪酸、水解氨基酸和呈味物质游离氨基酸成分存在一定的差异。而关于不同地区可口革囊星虫营养物质差异的具体原因有待进一步的研究。这 3 个不同地理群体的可口革囊星虫都受到了 Pb 和 As 的重度污染, 因此, 为了保护当地生态环境以及各种生物的生存与发展, 同时也为人们提供健康的食物, 建议各地方的监管部门应对当地生态环境中重金属的监控严格把控, 保持高度的重视, 同时不定期对出现的部分重金属污染进行污染评价分析, 做到更加精确的管控。但是可口革囊星虫能否作为滩涂污染的指示物, 有必要通过增加采样区域来加强数据支撑。

参考文献 References

- 陈海南, 张春华, 刘国强, 等, 2022. 广西北部湾沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 41(9): 2872-2879. CHEN HAINAN, ZHANG CHUNHUA, LIU GUOQIANG, et al, 2022. Evaluation on sediment pollution and potential ecological risks in Guangxi Beibu Gulf[J]. Environmental Chemistry, 41(9): 2872-2879 (in Chinese with English abstract).
- 陈素华, 陈爱华, 吴杨平, 等, 2023. 文蛤与美洲帘蛤的营养组成及风味成分比较分析[J]. 水产科学, 42(06): 966-976. CHEN SUHUA, CHEN AIHUA, WU YANGPING, et al, 2023. Comparative evaluation of nutrient ingredients and flavor substances of *Meretrix meretrix* and *Mercenaria mercenaria*[J]. Fisheries Science, 42(06): 966-976 (in Chinese with English abstract).
- 陈细香, 卢昌义, 叶勇, 2007. 重金属 Zn、Pb 和 Cd 对可口革囊星虫的急性毒性作用[J]. 海洋环境科学, 26(5): 455-457. CHEN XIXIANG, LU CHANGYI, YE YONG, 2007. Acute toxicity of zinc, lead and cadmium to *Phascolosoma esculentus*[J]. Marine Environmental Science, 26(5): 455-457 (in Chinese with English abstract).
- 迟淑艳, 周歧存, 周健斌, 等, 2007. 华南沿海 5 种养殖贝类营养成分的比较分析[J]. 水产科学, 26(2): 79-83. CHI SHUYAN, ZHOU QICUN, ZHOU JIANBIN, et al, 2007. Comparative nutrition components in five cultured molluscs in coastal south China[J]. Fisheries Science, 26(2): 79-83 (in Chinese with English abstract).
- 崔丽莉, 鲁绍雄, 高海涛, 等, 2021. 5 个养殖虹鳟品种肌肉的营养成分分析与评价[J]. 水产学杂志, 34(6): 1-10. CUI LILI,

- LU SHAOXIONG, GAO HAITAO, et al, 2021. Analysis and evaluation of muscle nutritional components of five principal strains of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in China[J]. Chinese Journal of Fisheries, 34(6): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- 邓中日, 黄勃, 方再光, 2007. 可口革囊星虫体壁形态和组织学结构[J]. 水产科学, 26(6): 335–339. DENG ZHONGRI, HUANG BO, FANG ZAIGUANG, 2007. Morphological and histological characteristics of body wall in *Phascolosoma esculenta*[J]. Fisheries Science, 26(6): 335–339 (in Chinese with English abstract).
- 董兰芳, 曾梦清, 蒋艳, 等, 2017. 不同生长阶段可口革囊星虫的营养组成和消化酶活性[J]. 水产科学, 36(6): 789–793. DONG LANFANG, ZENG MENGQING, JIANG YAN, et al, 2017. Changes in nutritive components, amino acid composition and digestive enzyme activities of Sipunculid *Phascolosoma esculenta* at different growth stages[J]. Fisheries Science, 36(6): 789–793 (in Chinese with English abstract).
- 杜宁宁, 黄晓丽, 郝其睿, 等, 2022. 八种鲑科鱼类肌肉营养成分分析与营养价值评价[J]. 水产学杂志, 35(4): 9–18. DU NINGNING, HUANG XIAOLI, HAO QIRUI, et al, 2022. Analysis of nutritional components and evaluation of nutritive quality in muscle of eight members in Salmonidae[J]. Chinese Journal of Fisheries, 35(4): 9–18 (in Chinese with English abstract).
- 高业田, 潘丽素, 吴洪喜, 等, 2012. 可口革囊星虫与其栖息地底泥中的重金属含量及相关性分析[J]. 海洋科学, 36(10): 54–60. GAO YETIAN, PAN LISU, WU HONGXI, et al, 2012. Contents and correlation of heavy metals in *Phascolosoma esculenta* and their habitat sediments[J]. Marine Sciences, 36(10): 54–60 (in Chinese with English abstract).
- 管华诗, 王曙光, 2009. 中华海洋本草第3卷: 海洋无脊椎动物药[M]. 上海: 上海科学技术出版社: 78–90. GUAN HUASHI, WANG SHUGUANG, 2009. Chinese marine materia medica (Volume 3): marine invertebrates medicine[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers: 78–90 (in Chinese with English abstract).
- 郭建港, 何玉英, 王琼, 等, 2022. 中国明对虾野生群体与选育群体肌肉中滋味物质的比较分析[J]. 中国渔业质量与标准, 12(3): 9–16. GUO JIANGANG, HE YUYING, WANG QIONG, et al, 2022. Comparative analysis for taste substances in wild and selected populations muscle of the *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 12(3): 9–16 (in Chinese with English abstract).
- 黄岛平, 刘永强, 林葵, 等, 2012. 北部湾革囊星虫和方格星虫主要营养成分比较分析[J]. 大众科技, 14(8): 172–173. HUANG DAOPING, LIU YONGQIANG, LIN KUI, et al, 2012. Comparative analysis of main nutritive components on *Phascolosoma esculenta* and *Sipunculus nudus* in Beibu Gulf[J]. Popular Science & Technology, 14(8): 172–173 (in Chinese with English abstract).
- 冀德伟, 闫茂仓, 胡利华, 等, 2022. 不同规格野生刀额新对虾肌肉营养成分分析[J]. 水产科学, 41(6): 1045–1051. JI DEWEI, YAN MAOCANG, HU LIHUA, et al, 2022. Analysis of nutritional compositions in muscle of wild sword prawn *Metapenaeus ensis* with different sizes[J]. Fisheries Science, 41(6): 1045–1051 (in Chinese with English abstract).
- 贾俊琦, 张悦, 廖月琴, 等, 2023. 2种乌贼肌肉的营养成分及品质评价[J]. 渔业科学进展, 44(4): 234–243. JIA JUNQI, ZHANG YUE, LIAO YUEQIN, et al, 2023. Evaluation of the nutritional composition and quality of muscles in two cuttlefish species[J]. Progress in Fishery Sciences, 44(4): 234–243 (in Chinese with English abstract).
- 金洪宇, 李雷, 覃东立, 等, 2022. 弧唇裂腹鱼肌肉营养成分分析[J]. 生物资源, 44(2): 198–204. JIN HONGYU, LI LEI, QIN DONGLI, et al, 2022. Nutritional composition in muscle of *Schizothorax curvlabiatus*[J]. Biotic Resources, 44(2): 198–204 (in Chinese with English abstract).
- 李凤鲁, 1989. 中国沿海革囊星虫属(星虫动物门)的研究[J]. 青岛海洋大学学报, 19(3): 78–90. LI FENGLU, 1989. Studies on the genus *Phascolosoma* (Sipuncula) of the China coasts[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 19(3): 78–90 (in Chinese with English abstract).
- 李婉君, 2015. 南极磷虾与南美白对虾营养与滋味成分比较[D]. 上海: 上海海洋大学: 8–45. LI WANJUAN, 2015. Nutritional and flavor components analysis of Antarctic krill and White shrimp[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University: 8–45 (in Chinese with English abstract).
- 李懿, 李太武, 苏秀榕, 2008. Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 、 As^{3+} 对可口革囊星虫的急性毒性试验[J]. 水产科学, 27(2): 71–74. LI YI, LI TAIWU, SU XIURONG, 2008. Acute toxicity of Cd^{2+} , Hg^{2+} and As^{3+} to *Phascolosoma esculenta*[J]. Fisheries Science, 27(2): 71–74 (in Chinese with English abstract).
- 梁川, 刘小玲, 2016. 广西两种星虫营养及生物质量比较分析[J]. 轻工科技, 32(1): 8–10. LIANG CHUAN, LIU XIAOLING, 2016. Comparative analysis of nutrition and biological quality of two species of Sipuncula in Guangxi[J]. Light Industry Science and Technology, 32(1): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- 林向阳, 2017. 可口革囊星虫人工繁育技术研究[D]. 厦门: 集美大学: 9–37. LIN XIANGYANG, 2017. Studies on the technique for artificial breeding of *Phascolosoma esculenta*[D]. Xiamen: Jimei University: 9–37 (in Chinese with English abstract).
- 刘加飞, 2013. 东海岛潮间带表层沉积物重金属含量、形态分布及其潜在生态风险评价[D]. 湛江: 广东海洋大学: 23–25. LIU JIAFEI, 2013. Distributions of contents, species and potential ecological risk assessment of heavy metals in intertidal surface sediments of Donghai Island[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University: 23–25 (in Chinese with English abstract).

- 刘静龙, 2022a. 光滑河蓝蛤营养成分分析与评价[J]. 黑龙江水产, 41(1): 6–11. LIU JINGLONG, 2022. Analysis and evaluation of nutrient composition of *Potamocorbula laevis*[J]. Northern Chinese Fisheries, 41(1): 6–11 (in Chinese with English abstract).
- 刘静龙, 2022b. 纵肋织纹螺(*Nassarius variciferus*)营养成分分析与评价[J]. 黑龙江水产, 41(2): 3–7. LIU JINGLONG, 2022. Analysis and evaluation of nutrient components of *Nassarius variciferus*[J]. Northern Chinese Fisheries, 41(2): 3–7 (in Chinese with English abstract).
- 刘文政, 刘利亚, 周贻兵, 等, 2023. 黔产市售鱼腥草中重金属含量分析及膳食风险评估[J]. 中国无机分析化学, 13(5): 425–432. LIU WENZHENG, LIU LIYA, ZHOU YIBING, et al, 2023. Content analysis and dietary risk assessment of heavy metals in *Houttuynia Cordata* from Guizhou province[J]. Chinese of Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 13(5): 425–432 (in Chinese with English abstract).
- 刘洋, 林彩, 陈金民, 等, 2021. 南海游泳动物重金属含量特征及风险评价[J]. 海洋环境科学, 40(3): 401–406. LIU YANG, LIN CAI, CHEN JINMIN, et al, 2021. Distribution and risk assessment of heavy metal in nekton of South China Sea[J]. Marine Environmental Science, 40(3): 401–406 (in Chinese with English abstract).
- 楼乔明, 张问, 刘连亮, 等, 2016. 狭鳕鱼皮脂肪酸组成分析及其营养评价[J]. 核农学报, 30(2): 332–337. LOU QIAOMING, ZHANG WEN, LIU LIANLIANG, et al, 2016. Analysis and nutritional evaluation of fatty acids in fish skin of *Theragra chalcogramma*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 30(2): 332–337 (in Chinese with English abstract).
- 卢欣, 2020. 闽东近海水产养殖区表层沉积物重金属元素分布特征及来源解析[D]. 福州: 福建师范大学: 57–59. LU XIN, 2020. Distribution characteristics and sources of heavy metals in surface sediments from offshore aquaculture areas of eastern Fujian[D]. Fuzhou: Fujian Normal University: 57–59 (in Chinese with English abstract).
- 罗辉, 陈李婷, 敬庭森, 等, 2021. 田螺科四种螺的肌肉主要营养成分[J]. 水产学报, 46(11): 2177–2185. LUO HUI, CHEN LITING, JING TINGSEN, et al, 2021. Muscle nutrition analysis of four snail species of Viviparidae[J]. Journal of Fisheries of China, 46(11): 2177–2185 (in Chinese with English abstract).
- 罗钦, 吴建衍, 潘葳, 2020. 3 种养殖淡水鱼重金属含量测定及健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 11(18): 6568–6574. LUO QIN, WU JIANYAN, PAN WEI, 2020. Determination of heavy metal content of 3 kinds of cultured freshwater fish and health risk assessment[J]. Journal of Food Safety and Quality, 11(18): 6568–6574 (in Chinese with English abstract).
- 孟丽华, 史艳伟, 刘方, 等, 2019. 济宁太白湖湿地系统 4 种淡水鱼类营养成分分析及安全评价[J]. 中国渔业质量与标准, 9(1): 50–55. MENG LIHUA, SHI YANWEI, LIU FANG, et al, 2019. Safety evaluation and the nutritional composition analysis of four fishes in Taibai lake wetland system[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 9(1): 50–55 (in Chinese with English abstract).
- 莫小荣, 管超毅, 罗良娟, 等, 2019. 近年钦州沿海海水、沉积物及牡蛎重金属污染分析和评价[J]. 南方农业学报, 50(3): 554–561. MO XIAORONG, GUAN CHAOYI, LUO LIANGJUAN, et al, 2019. Analysis and evaluation of heavy metals pollution in seawater, sediments and oysters of Qinzhou coastal area in recent years[J]. Journal of Southern Agriculture, 50(3): 554–561 (in Chinese with English abstract).
- 倪正泉, 1993. 东吾洋水产开发技术研究报告[J]. 福建水产, (4): 1–7. NI ZHENGQUAN, 1993. Aquatic product development technology research report of Dongwuyang[J]. Fujian Fisheries, (4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- 彭礼洪, 孟范平, 刘群群, 等, 2020. 东营市北部海域文蛤重金属污染特征与食用风险评价[J]. 中国环境科学, 40(4): 1800–1808. PENG LIHONG, MENG FANPING, LIU QUNQUN, et al, 2020. Contamination characteristics of heavy metal and risk assessment of seafood safety for bivalves *Meretrix meretrix* collected from the northern coastal area of Dongying city[J]. China Environmental Science, 40(4): 1800–1808 (in Chinese with English abstract).
- 青尚敏, 陈海南, 孙燕, 等, 2021. 广西铁山港邻近海域表层沉积物中重金属污染现状[J]. 广西科学, 28(6): 568–576. QING SHANGMIN, CHEN HAINAN, SUN YAN, et al, 2021. Pollution status of heavy metals in surface sediments near Tieshangang bay sea area, Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 28(6): 568–576 (in Chinese with English abstract).
- 曲良, 谭海涛, 刘涛, 等, 2023. 北部湾铁山港附近海域水体和沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 43(3): 757–768. QU LIANG, TAN HAITAO, LIU TAO, et al, 2023. Distribution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in the seawater and sediment of Tieshan Port, Beibu Gulf[J]. Environmental Chemistry, 43(3): 757–768 (in Chinese with English abstract).
- 阮金山, 李秀珠, 罗冬莲, 等, 2001. 闽南沿海牡蛎、花蛤、缢蛏体内重金属的检测与评价[J]. 福建水产, (3): 1–7. RUAN JINSHAN, LI XIUZHU, LUO DONGLIAN, et al, 2001. Assessment of heavy metals in cultured shellfishes in coastal areas of South Fujian Province[J]. Journal of Fujian Fisheries, (3): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- 徐承香, 杨瑞泉, 巴家文, 等, 2020. 贵州省威宁草海主要野生鱼类重金属含量及健康风险评价[J]. 南方农业学报, 51(12): 3040–3048. XU CHENGXIANG, YANG RUIQUAN, BA JIAWEN, et al, 2020. Heavy metal contents and health risk assessment of wild fish species in Caohai Lake in Weining County, Guizhou Province[J]. Journal of Southern Agriculture, 51(12): 3040–3048 (in Chinese with English abstract).
- 宋长虹, 唐生, 郝克非, 等, 2014. 中国居民日常食物中脂肪酸含量的分析[J]. 食品与机械, 30(5): 61–63. SONG

- CHANGHONG, TANG SHENG, HAO KEFEI, et al, 2014. Investigation and analysis on intake fatty acids from daily food[J]. Food & Machinery, 30(5): 61–63 (in Chinese with English abstract).
- 宋理平, 王春生, 曾宪富, 等, 2013. 大菱鲆肌肉基本成分分析与营养价值评价[J]. 长江大学学报(自然科学版), 10(23): 45–49. SONG LIPING, WANG CHUNSHENG, ZENG XIANFU, et al, 2013. Basic components analysis and nutritive value evaluation of *Scophthalmus maximus* muscle[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 10(23): 45–49 (in Chinese with English abstract).
- 孙平跃, 王斌, 2004. 长江口区河蚬体内的重金属含量及其污染评价[J]. 应用与环境生物学报, 10(1): 79–83. SUN PINGYUE, WANG BIN, 2004. Metal content and contamination assessment in *Corbicula fluminea* from the Yangtze River estuary[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental, 10(1): 79–83 (in Chinese with English abstract).
- 王颖, 吴志宏, 李红艳, 等, 2013. 不同地理群体魁蚶的营养成分的比较研究[J]. 食品科学, 34(3): 248–252. WANG YING, WU ZHIHONG, LI HONGYAN, et al, 2013. Comparison of nutrient composition in *Anadara uropygimelana* from different areas[J]. Food Science, 34(3): 248–252 (in Chinese with English abstract).
- 翁丽萍, 戴志远, 赵芸, 等, 2015. 养殖大黄鱼和野生大黄鱼特征滋味物质的分析与比较[J]. 中国食品学报, 15(4): 254–261. WEN LIPING, DAI ZHIYUAN, ZHAO YUN, et al, 2015. Comparative studies of characteristic flavor compounds between cultured and wild large yellow croakers[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 15(4): 254–261 (in Chinese with English abstract).
- 吴迪, 2020. 王港滩重金属累积特征与污染评价[D]. 南京: 南京信息工程大学: 14–21. WU DI, 2020. Heavy metal accumulation and pollution evaluation in Wanggang tidal flat[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology: 14–21 (in Chinese with English abstract).
- 吴洪喜, 高业田, 黄振华, 等, 2015. 可口革囊星虫对 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的富集及其影响[J]. 应用生态学报, 26(6): 1871–1876. WU HONGXI, GAO YETIAN, HUANG ZHENHUA, et al, 2015. Enrichment of Cd^{2+} and Hg^{2+} in *Phascolosoma esculenta* and their effects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(6): 1871–1876 (in Chinese with English abstract).
- 曾莉婷, 钟诗懿, 游伟伟, 等, 2020. 南北接力养殖对皱纹盘鲍营养成分的影响[J]. 水产学报, 44(1): 111–117. ZENG LITING, ZHONG SHIYI, YOU WEIWEI, et al, 2020. Effects of south-north relay mode on the nutritive compositions of *Haliotis discus hannai*[J]. Journal of Fisheries of China, 44(1): 111–117 (in Chinese with English abstract).
- 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 2022. GB 2762 —2022 食品安全国家标准食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–19 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家食品药品监督管理总局, 2016. GB 5009.124 —2016 食品氨基酸国家标准食品中氨基酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–6 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002. GB 18668 —2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–8 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008. GB/T 22223 —2008 食品中总脂肪、饱和脂肪(酸)、不饱和脂肪(酸)的测定水解提取—气相色谱法[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–13 (in Chinese).
- 周化斌, 张永普, 吴洪喜, 等, 2006. 可口革囊星虫的营养成分分析与评价[J]. 海洋湖沼通报, 2: 62–68. ZHOU HUABIN, ZHANG YONGPU, WU HONGXI, et al, 2006. Analysis and evaluation of the nutritive composition of clam *Phascolosoma esculenta*[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2: 62–68 (in Chinese with English abstract).
- ARAUJO P, TRUZZI C, BELGHIT I, et al, 2021. The impact of seawater warming on fatty acid composition and nutritional quality indices of *Trematoma bernacchii* from the Antarctic region[J]. Food Chemistry, 365: 130500.
- DE ANGELIS C, GALDIERO M, PIVONELLO C, et al, 2017. The environment and male reproduction: the effect of cadmium exposure on reproductive function and its implication in fertility[J]. Reproductive Toxicology, 73: 105–127.
- DERMIKI M, PHANPHENSOPHON N, MOTTRAM D S, et al, 2013. Contributions of non-volatile and volatile compounds to the umami taste and overall flavour of shiitake mushroom extracts and their application as flavour enhancers in cooked minced meat[J]. Food Chemistry, 141(1): 77–83.
- DING HONGWEI, ZHANG DIJUN, CHU SHUANGSHUANG, et al, 2017. Screening and structural and functional investigation of a novel ferritin from *Phascolosoma esculenta*[J]. Protein Science, 26(10): 2039–2050.
- LI TINGTING, JIA LILI, ZHU XIN, et al, 2023. Distribution and risk assessment of heavy metals in surface sediments of coastal mudflats on Leizhou Peninsula, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 42: 25–34.
- LIOE N H, APRIYANTONO A, TAKARA K, et al, 2005. Umami taste enhancement of MSG/NaCl mixtures by subthreshold L- α -aromatic amino acids[J]. Journal of food science, 70(7): 401–405.
- MORTAZAVI M S, SHARIFIAN S, MOHEBBI-NOZAR S L, et al, 2022. The spatial distribution and ecological risks of heavy metals in the north of Persian Gulf[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(10): 10143–10156.
- PASZCZYK B, POLAK-ŚLIWIŃSKA M, ZIELAK-STECIWKO A E, 2022. Chemical composition, fatty acid profile, and lipid quality indices in commercial ripening of cow cheeses from different seasons[J]. Animals (Basel), 12(2): 198.
- ULBRICHT T L, SOUTHGATE D A, 1991. Coronary heart disease: seven dietary factors[J]. Lancet, 338(8773): 985–

- 992.
- VANDENDOOL H, KRATAZ P D, 1963. A generalization of the retention index system including linear temperature programmed gas-liquid partition chromatography[J]. Journal of chromatography, 11: 463–471.
- WU YANLING, FANG MING, DU LEI, et al, 2014. The nutritional composition and anti-hypertensive activity on spontaneously hypertensive rats of sipuncula *Phascolosoma esculenta*[J]. Food Function, 5(9): 2317–2323.
- YANG QIONG, YANG ZHONGFANG, ZHANG QIZUAN, et al, 2021. Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil-rice system in the karst areas with high geochemical background of Guangxi, China[J]. Science China Earth Sciences, 64: 1126–1139.
- YLVA A, 2006. Flavour formation by amino acid catabolism[J]. Biotechnology advances, 24(2): 238–242.
- ZHANG YU'NA, WANG QIANWEN, 2021. Determination and ecological risk assessment of arsenic and mercury in sediments from the Changjiang River Estuary and adjacent East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 40(4): 32–38.