

郑清梅, 刘兴隆, 郭江山, 等. 粤东海产经济贝类重金属含量与暴露风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 105-114.

ZHENG Qing-mei, LIU Xing-long, GUO Jiang-shan, et al. Analysis of heavy metal concentrations in marine economic shellfish from eastern Guangdong Province and its health risk[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 105-114.

粤东海产经济贝类重金属含量与暴露风险评价

郑清梅¹, 刘兴隆², 郭江山², 钟艳梅¹, 韩春艳¹

(1. 嘉应学院生命科学学院, 广东 梅州 514015; 2. 梅州市渔业技术推广与疫病防控中心, 广东 梅州 514071)

摘要: 为了解粤东地区海水经济贝类重金属的污染现状及摄入健康风险, 本研究采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)分别测定了10种海产经济贝类肌肉和内脏团中6种重金属(Zn、Cd、Pb、Cr、Cu及Mn)的质量分数, 并采用单因子污染指数(P_i)、目标危险系数(THQ)及总目标危险系数(TTHQ)分别评价其污染程度和食用健康风险。结果表明, 该10种贝类肌肉中重金属质量分数的平均值由高至低为Zn>Mn>Cu>Cr>Cd>Pb, 内脏团中为Zn>Mn>Cu>Pb>Cr>Cd。除Cr外, 贝类内脏团中其他5种金属质量分数的平均值均高于其相应的肌肉组织。 P_i 结果表明, 除Cu外, 贝类肌肉和内脏团均受Zn、Cd、Pb、Cr不同程度的污染, 其中Cd的 P_i 最高, 其次为Zn、Pb, 而Cr指数相对较低; 且大多数贝类内脏团中Cd、Zn及Pb的 P_i 值指示为重污染水平(即超标)。THQ评价结果显示, 除了栉江瑶内脏团中的Cd外, 该10种贝类中5种重金属暴露对儿童或成人没有明显的健康风险; 但TTHQ结果表明, 约有50%贝类的内脏团重金属TTHQ值大于1, 表明暴露人群若长期食用这些贝类的内脏团将对健康产生负面影响。总之, 粤东地区10种海水经济贝类分别受到Cd、Zn、Pb和Cr不同程度的污染, 表明该地区海洋生态环境或贝类生产已存在重金属污染的安全隐患, 建议加强该地区贝类产品重金属残留的质量监控及重金属污染的防控。

关键词: 经济贝类; 重金属; 肌肉; 内脏团; 评价

中图分类号: X55; S949

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2019)01-0105-10

doi: 10.13254/j.jare.2018.0085

Analysis of heavy metal concentrations in marine economic shellfish from eastern Guangdong Province and its health risk

ZHENG Qing-mei¹, LIU Xing-long², GUO Jiang-shan², ZHONG Yan-mei¹, HAN Chun-yan¹

(1. School of Life Science, Jiaying University, Meizhou 514015, China; 2. Meizhou Fishery Technical Extension and Disease Control Centre, Meizhou 514071, China)

Abstract: In order to evaluate the status of heavy metal pollution on marine economic shellfish in eastern Guangdong and the intake of health risk, the contents of lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn) and manganese (Mn) in muscle and visceral mass from 10 species of shellfish were determined by using method of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The single factor pollution index (P_i), target hazard quotient (THQ) and the total target hazard quotient (TTHQ) were used to evaluate the pollution status of heavy metals and dietary health risk. Results showed that the levels of metals in muscles of the shellfish were found in order of Zn>Mn>Cu>Cr>Cd>Pb, while which in visceral mass were in order of Zn>Mn>Cu>Pb>Cr>Cd. Except Cr, the heavy metals concentrations in visceral mass samples were significantly higher than those in the corresponding muscles. Based on the P_i indexes, the shellfish were polluted to one degree or another by Cd, Pb, Cr and Zn, except the P_i indexes of Cu. The shellfish P_i index from high to low

收稿日期: 2018-04-14 录用日期: 2018-07-06

作者简介: 郑清梅 (1978—), 女, 广东茂名, 博士, 副教授, 从事水生生物学技术研究。E-mail: zhqm78@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (81502257); 广东省自然科学基金项目 (S2013010013693); 粤东西北高校振兴计划“学科建设项目 (2018—2020)

Project supported: Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (81502257); Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (S2013010013693); Subject Construction Projects Foundation of “Revitalization Plan of Colleges and Universities in Eastern, Western and Northern Guangdong” (2018—2020)

was in order of $Cd > Zn > Pb > Cr > Cu$, While the P_i index of Cd, Zn and Pb in most shellfish viscera were in heavy pollution level. The results of THQ showed that the indexes exposure to individual metal (Cd, Zn, Pb, Cr, Cu, respectively) were at none risk level for children and adults except the index of Cd in visceral mass of *Pinna pectinata*. However, TTHQ results showed that the TTHQ value in about half of the shellfish species were more than 1, which indicated that long-term consumption of the visceral mass of these species would have a negative impact on human health. In summary, the shellfishes were polluted by Zn, Cd, Pb and Cr to some extent, which indicated that hidden danger of heavy metals pollution was present in ecological environment and fishery production in the area, and the monitoring of heavy metal residue in shellfish and heavy metals pollution need to be strengthened.

Keywords: economic shellfish; heavy metal; muscle; visceral mass; evaluation

中国是世界贝类养殖大国,年产量已经超过1300万t,产业规模及产量均居世界前列,在水产品生产和贸易中占有重要地位^[1-2]。其中,广东省是我国贝类生产及消费大省。贝类产品营养丰富,风味独特,备受广大消费者青睐。因此,贝类的质量及食用安全成为国内外关注的焦点。随着经济的快速发展,大量工业及生活废水、废渣等直接或间接排进海洋,导致海洋环境污染日益加剧^[3]。诸多污染物中,重金属易通过吸附、离子交换、络合、沉淀及生物吸收等过程,在海洋沉积物和生物中富集,进而在食物链中积累并传递^[4]。在众多海洋生物中,大部分贝类底栖生活,分布广泛,数量较大,且对多种重金属富集能力强,导致其很容易受到海域环境的影响,是理想的海洋重金属污染指示生物^[5]。

据报道,中国海洋贝类出现不同程度的重金属污染,尤其是毒性较强的Pb、Cd、As及Cr等^[6-10],引起人们对贝类食用安全的高度关注。程家丽等^[11]分析了中国海洋食用贝类重金属污染特征及其健康风险,结果表明,贝类中Cu、Cd和Cr含量存在超标现象,且部分海域中贝类Cd及As污染的健康风险超出了可接受水平。孙元敏等^[9]的研究也表明,中国22个典型海岛中9种经济贝类的重金属(Zn、Cu、Pb、Cr、Cd)均有不同程度的超标。此外,调查地区、时间、温度及贝类种类等因素均影响重金属在贝类体内的富集程度。王增焕等^[12]调查了广东、广西沿海5种贝类重金属的含量,结果显示贝类产品中Cd、Cu的合格率分别为65%和67.7%,且重金属的富集水平与贝类的种类有密切关系。蒋立新等^[13]研究了深圳市市售食品中Cd污染状况,结果表明,和其他食品相比,水产品中贝类的Cd质量分数最高,超标率达29.82%,且其最高含量、超标率均高于青岛、南通、泉州、大连等地的水产品,而这些贝类主要来源地为粤东沿海地区^[14-17]。因此,沿海地区贝类的食用安全质量控制及健康化养殖问题亟待解决。

目前,对贝类重金属污染的研究报道,主要从环

境污染方面研究贝类重金属的残留量^[18-20],而从贝类膳食消费方面评估贝类食用健康风险的研究仍较少。目标危险系数(Target hazard quotient, THQ)是美国环保署(USEPA)于2000年建立的一种评价人群摄入某种食物健康风险的方法。该评价指标的最大特点是不仅能够评价单一重金属的健康风险,而且能够评价多种重金属复合暴露的健康风险,即总目标危险系数(Total target hazard quotient, TTHQ)^[21]。此外,目前大部分报道通常只检测整体贝类软组织(除贝壳)的重金属质量分数^[22-24],而没有分别检测贝类不同组织(肌肉和内脏团)的重金属质量分数。因此,本研究分别测定了粤东地区10种海洋经济贝类肌肉和内脏团中重金属元素Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn的质量分数,并从单因子污染指数(P_i)和食用安全指标(THQ和TTHQ)方面进行评价,旨在对贝类的安全消费提供科学的指导,并为贝类安全生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验贝类

于2016年1月至12月,根据《海洋监测规范》中对样品采集的要求,分批次从粤东地区5个城市(潮州、汕头、揭阳、汕尾及惠州)的鱼港码头渔民手中(确定为当地捕捞)购买鲜活健康、体型匀称的10种海水经济贝类(波纹巴非蛤 *Paphia undulata*、蜆蚌 *Sinonovacula constricta*、近江牡蛎 *Crassostrea rivularis*、文蛤 *Meretrix meretrix*、小眼花帘蛤 *Ruditapes variegatus*、菲律宾蛤仔 *R. philippinarum*、毛蚶 *Scapharca subcrenata*、栉江瑶 *Pinna pectinata*、方斑东风螺 *Babylonia areolata*、杂色鲍 *Haliotis diversicolor*)作为样品。现场用海水冲洗干净后,放入聚乙烯袋中,冷藏运输至实验室中-20℃冷冻保存。取样时,将贝类置于冰盘上解剖,采用陶瓷刀具去除贝壳并取出软体组织,分离出肌肉组织(包括闭壳肌和足)与内脏团组织(除去肌肉组织的其他软组织)。用双蒸水清洗干净,滤纸吸干样品表面水分,于匀浆器中匀浆。所获得的组织匀浆

装入封口袋,于-20℃冰箱中保存,备用。至少10个以上贝类个体混合为1个样(视个体大小而定,分别混合肌肉和内脏团组织),每种贝类样品设3个平行。

1.2 试验方法

样品测定参考文献[25]的方法:贝类样品自然解冻后,分别准确称取贝类的肌肉(约1.0 g)与内脏团(约0.5 g),以超纯水为空白对照,分别置于高压消解罐中的聚四氟乙烯内罐中。该试验采用湿法消解样品,即在罐中分别加入约3 mL浓HNO₃(根据消解后混合液的清澈程度及pH值调整浓HNO₃的加入量)及3 mL H₂O₂,敞开盖子避光放置约24 h,使反应过程中产生的气体散去。然后,将高压消解罐盖好,移入烘箱(约150℃)中继续消解约6 h至混合液澄清。待冷却至室温后,将混合液移入容量瓶中,采用超纯水定容、备用。

采用电感耦合等离子体发射光谱仪(日本岛津,SP-127 ICPE-9000)分别测定贝类样品肌肉及内脏团中Zn、Pb、Cr、Cu、Mn及Cd的质量分数。同时,通过测定试剂空白和国家标准物质(贻贝,GBW 08571)进行样品的质量控制。标准物质各测定值和标准值相对偏差均须小于10%,才符合要求。

1.3 数据处理与评价方法

1.3.1 数据处理

样品中重金属的质量分数(湿质量,mg·kg⁻¹)根据以下公式计算:

$$X = [(A_1 - A_2) \times V \times 1000] / (M \times 1000)$$

式中: X 为样品中重金属的质量分数,mg·kg⁻¹; A_1 为样品所测得的质量分数,μg·mL⁻¹; A_2 为空白对照所测得的质量分数,μg·mL⁻¹; V 为样品处理(包括稀释)后的总体积,mL; M 为测试样品的实际质量(湿质量),g。分别测定每种贝类样品的3个平行,且所测定数据采用SPSS 17.0与Excel 2003进行数据处理。

1.3.2 单因子污染指数法

采用单因子污染指数法来评价贝类体内的某一重金属污染状况,计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中: P_i 为第*i*种单因子(金属元素)污染指数; C_i 为样品中金属元素*i*的实际测定质量分数,mg·kg⁻¹; S_i 为金属元素*i*的限量标准,mg·kg⁻¹。

本研究中,Cd、Cr、Cu、Pb采用文献[26]中的限量标准,Zn采用文献[27]中的限量标准(表1),元素Mn无限量标准。

采用文献[28-29]的方法进行评价:若 $P_i < 0.2$ 为正

常背景值;若 $0.2 \leq P_i < 0.6$ 为微污染-轻污染水平; $0.6 \leq P_i < 1.0$ 为污染水平; $P_i \geq 1.0$ 为重污染水平,即超标。统计了5种重金属(Mn由于无相应的评价标准,不参与统计)的某一单因子某一污染水平 P_i 占总指标数(10种贝类的肌肉和内脏团,计20个指标)的百分比。

1.3.3 健康风险评价法

采用美国环保署(USEPA)推荐的健康风险评价模型,即目标危险系数(Target hazard quotient, THQ)作为健康风险评价方法^[11,29]。该方法假定人体对食物中重金属吸收剂量等于摄入量,并通过评估人体摄入食物中重金属的剂量是否超出相应的参考剂量来判断人体的暴露风险。如果该值小于安全基准值1.0,说明暴露人群没有明显的健康风险;反之,则存在健康风险。其计算公式为:

$$THQ_i = E_f \times E_d \times R_f \times C \times 10^{-3} / (R_d \times W_A \times T_A)$$

式中: E_f 为暴露频率,365 d·a⁻¹; E_d 为暴露年限,取值于人的平均寿命,70 a; R_f 为食物摄取率,儿童取8.82 g·d⁻¹,成人取20.1 g·d⁻¹; C 为贝类样品中重金属的实测质量分数,mg·kg⁻¹; R_d 为参考剂量,Cu、Pb、Cd、Cr、Zn分别取0.04、3.5×10⁻³、1.0×10⁻³、3.0×10⁻³、0.3 mg·kg⁻¹·d⁻¹; W_A 为平均体重,儿童取32 kg,成人取60 kg; T_A 为非致癌源暴露的平均时间,365 d·a⁻¹×70 a。

通常情况下,重金属污染对人体健康的影响一般是多种重金属元素共同作用的结果。本研究假设各重金属的危害作用为相加,因此,重金属对人体的总目标危险系数TTHQ为:TTHQ=THQ₁+THQ₂+……+THQ_n。如果TTHQ≤1.00,表明没有明显的负面影响;若TTHQ>1.00,表明可能对人体健康产生负面影响;当TTHQ>10.00时,表明存在慢性毒性效应^[11,30]

2 结果与分析

2.1 贝类肌肉和内脏团中6种重金属的质量分数

试验分别测定了10种贝类肌肉和内脏团中Cd、Cr、Cu、Mn、Pb及Zn的质量分数,如表1所示。6种重金属在贝类体内均有检出,且在不同种类贝类及组织中的分布呈现明显不均匀性,在肌肉中质量分数的平均值由高至低为Zn>Mn>Cu>Cr>Cd>Pb,而内脏团为Zn>Mn>Cu>Pb>Cr>Cd。除Cr外,贝类内脏团其他5种金属质量分数的平均值分别高于其相应的肌肉组织。

Cd在不同贝类及其组织中的质量分数差异很大。其中,栉江瑶内脏团中Cd的质量分数明显高于其他贝类,为其他贝类的2~50倍。10种贝类内脏团中Cd质量分数由高到低为栉江瑶>毛蚶>方斑东风螺

表1 粤东沿海10种海产经济贝类肌肉和内脏团中重金属质量分数(湿质量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Heavy metal contents in muscle and visceral mass of ten kinds of marine economic shellfish from eastern Guangdong coast
(Fresh weight, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

组织 Tissues	种类 Species	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn
肌肉 Muscle	波纹巴非蛤 <i>P. undulata</i>	0.06±0.01f	1.06±0.07de	1.49±0.13e	38.18±1.76b	0.12±0.01d	176.10±8.62a
	蜆 <i>S. constricta</i>	0.06±0.01f	1.22±0.11cd	9.72±0.13a	3.33±0.18e	0.36±0.04b	23.89±1.46e
	近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	0.32±0.02b	0.82±0.07f	9.07±0.18b	3.45±0.29e	0.04±0.00f	43.77±2.77d
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	0.26±0.01c	1.08±0.11de	0.62±0.10g	26.00±1.16d	0.04±0.00f	173.51±9.27a
	小眼花帘蛤 <i>R. variegatus</i>	0.04±0.01f	1.46±0.07ab	1.14±0.10f	2.00±0.08e	0.03±0.00f	18.36±0.60e
	杂色鲍 <i>H. diversicolor</i>	0.04±0.01f	1.36±0.08bc	1.18±0.12f	0.92±0.05e	0.06±0.01ef	15.92±1.00e
	毛蚶 <i>S. subcrenata</i>	0.07±0.01ef	1.55±0.09a	0.71±0.11g	32.19±1.98c	0.18±0.01c	159.14±10.14b
	栉江瑶 <i>P. pectinata</i>	0.77±0.11a	0.93±0.10ef	0.60±0.01g	0.98±0.01e	0.08±0.01e	60.68±0.11c
	方斑东风螺 <i>B. areolata</i>	0.01±0.00f	1.02±0.11e	5.74±0.39c	1.81±0.12e	0.46±0.04a	21.02±1.16e
	菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	0.13±0.02d	1.26±0.07c	2.28±0.06d	75.15±6.92a	0.38±0.02b	38.74±1.96d
	肌肉均值*	0.18±0.23	1.18±0.24	3.25±3.54	18.40±23.85	0.17±0.16	73.11±65.82
Mean value in muscle							
内脏团 Viscera	波纹巴非蛤 <i>P. undulata</i>	0.07±0.01h	0.88±0.05bc	1.77±0.07e	32.19±2.01e	6.15±0.38c	137.22±7.71f
	蜆 <i>S. constricta</i>	0.45±0.06fg	0.77±0.06c	11.62±1.34c	19.09±1.14g	10.09±0.52a	618.40±29.63b
	近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	0.54±0.06e	0.98±0.15b	16.77±0.04b	75.54±2.11b	9.15±0.16b	640.11±9.94b
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	0.30±0.06g	1.18±0.05a	1.72±0.09e	38.40±1.86d	0.05±0.00e	140.56±6.76f
	小眼花帘蛤 <i>R. variegatus</i>	0.08±0.01h	1.03±0.12b	4.59±0.05d	20.04±1.20fg	0.14±0.02e	212.90±12.34e
	杂色鲍 <i>H. diversicolor</i>	0.90±0.07d	1.20±0.13a	20.05±0.93a	24.05±2.04f	0.71±0.05d	478.56±15.98d
	毛蚶 <i>S. subcrenata</i>	1.71±0.11b	1.23±0.10a	1.51±0.07e	73.52±2.48b	0.19±0.02e	221.64±10.42e
	栉江瑶 <i>P. pectinata</i>	3.89±0.36a	0.90±0.07bc	6.05±0.02d	46.23±2.53c	0.21±0.03e	515.66±16.86c
	方斑东风螺 <i>B. areolata</i>	1.26±0.07c	0.90±0.03bc	21.34±2.13a	137.28±6.21a	0.81±0.04d	695.91±29.34a
	菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	0.35±0.02ef	0.90±0.04bc	5.45±0.32d	36.40±0.15de	0.13±0.02e	210.90±9.68e
	内脏团均值*	0.95±1.12	1.00±0.17	9.09±7.53	50.27±35.30	2.76±3.92	387.18±216.16
Mean value in viscera							

注:“*”为10种贝类肌肉中重金属的平均值($n=10$);“#”为10种贝类内脏团中重金属的平均值($n=10$);其他数据为3次测定结果的平均值±标准差($n=3$);同一列数据中标注不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note:“*” is marked as the average heavy metal contents of 10 kinds of shellfish muscles($n=10$);“#” is marked as the average heavy metal contents of 10 kinds of shellfish viscera($n=10$);The other data are mean±standard deviation of three groups of shellfish($n=3$);Data of the same column (muscle and viscera, respectively) with different letters are significant difference($P<0.05$).

>杂色鲍>近江牡蛎>蜆>菲律宾蛤仔>文蛤>小眼花帘蛤>波纹巴非蛤。Cr在10种贝类体内的富集特征与其他5种重金属不一致,其在不同贝类及不同组织中质量分数的差异不大,且多数贝类肌肉中Cr的质量分数分别高于其相应的内脏团。Cu在贝类中富集水平差异较大,其中近江牡蛎、杂色鲍及方斑东风螺内脏团中Cu的质量分数明显高于其他种类及其相应的肌肉组织。与其他贝类相比,方斑东风螺内脏团中Mn的质量分数最高。波纹巴非蛤、蜆及近江牡蛎内脏团中Pb的质量分数明显高于其他贝类及其相应的肌肉组织。10种贝类Zn的质量分数均较高,其中5种贝类内脏团中Zn的质量分数高于 $450\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且大多数贝类内脏团中Zn质量分数明显高于其相应的肌肉组织(表1)。

2.2 贝类肌肉和内脏团中重金属单因子污染指数(P_i)评价

10种贝类重金属污染的单因子污染指数(P_i)如表2所示。10种贝类中Cd的 P_i 最高,其次为Zn、Pb,而Cr和Cu的 P_i 值较小。其中,Cd为重污染水平,即超标,其中超标数占总指标数(10种贝类的肌肉及内脏团,共20个指标)的60%,表明其受污染程度最高;其次为Zn, P_i 的超标数为55%;而在5种重金属中,Cu污染程度最低,80%的指标处于正常背景值水平,只有20%指标处于微污染-轻污染水平。此外,该5种重金属 P_i 在贝类不同组织中差异较大。除Cr外,其他4种重金属在10种贝类内脏团的 P_i 明显高于相应的肌肉组织。其中,在10种贝类内脏团中,Cd、Zn大多数为重污染水平,即超标,而其相应肌肉中,只有3

表2 粤东沿海10种海产经济贝类肌肉和内脏团的重金属单因子污染指数

Table 2 The single factor pollution index of heavy metals in muscle and visceral mass of the ten kinds of marine economic shellfish from eastern Guangdong coast

组织Tissues	种类Species	P_{Cd}	P_{Cr}	P_{Cu}	P_{Pb}	P_{Zn}
肌肉Muscle	波纹巴非蛤 <i>P. undulata</i>	0.59*	0.53*	0.03	0.25*	1.17***
	蜆蛭 <i>S. constricta</i>	0.64**	0.61**	0.19	0.72**	0.16
	近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	3.19***	0.41*	0.18	0.08	0.29*
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	2.63***	0.54*	0.01	0.07	1.16***
	小眼花帘蛤 <i>R. variegatus</i>	0.39*	0.73**	0.02	0.06	0.12
	杂色鲍 <i>H. diversicolor</i>	0.45*	0.68**	0.02	0.13	0.11
	毛蚶 <i>S. subcrenata</i>	0.68**	0.78**	0.01	0.35*	1.06***
	栉江瑶 <i>P. pectinata</i>	7.66***	0.47*	0.01	0.17	0.40*
	方斑东风螺 <i>B. areolata</i>	0.15	0.50*	0.11	0.93**	0.14
	菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	1.30***	0.63**	0.04	0.76**	0.26*
	肌肉均值 Mean value in muscle	1.77***	0.59*	0.06	0.35*	0.49*
内脏团Viscera	波纹巴非蛤 <i>P. undulata</i>	0.74**	0.44*	0.04	12.30***	0.91**
	蜆蛭 <i>S. constricta</i>	4.48***	0.38*	0.23*	20.17***	4.12***
	近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	5.43***	0.49*	0.34*	18.30***	4.27***
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	3.01***	0.59*	0.03	0.09	0.94**
	小眼花帘蛤 <i>R. variegatus</i>	0.75**	0.51*	0.09	0.29*	1.42***
	杂色鲍 <i>H. diversicolor</i>	8.97***	0.60**	0.40*	1.42***	3.19***
	毛蚶 <i>S. subcrenata</i>	17.06***	0.61**	0.03	0.38*	1.48***
	栉江瑶 <i>P. pectinata</i>	38.98***	0.45*	0.12	0.42*	3.44***
	方斑东风螺 <i>B. areolata</i>	12.57***	0.45*	0.43*	1.63***	4.64***
	菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	3.45***	0.47*	0.11	0.27*	1.41***
	内脏团均值 Mean value in viscera	9.54***	0.50*	0.18	5.53***	2.58***

注:“*”代表微污染-轻污染水平;“**”代表污染水平;“***”代表重污染水平。
Note:“*” represents slight pollution-light pollution level;“**” represents pollution level;“***” represents heavy pollution level.

种或4种贝类的 P_i 值指示为重污染水平。

2.3 贝类重金属污染的人体健康风险评估

表3、表4为10种贝类中重金属对于儿童和成人健康影响的THQ和TTHQ值。对于单一重金属元素,除了栉江瑶内脏团中的Cd外,10种贝类中Cd、Cr、Cu、Pb及Zn对儿童和成人的THQ值均小于1.00,表明这10种贝类产品对暴露人群没有明显的健康风险。但栉江瑶内脏团中Cd的儿童THQ为1.072,成人的为1.303,均大于1.00,表明其对暴露人群均有一定的健康风险。

对于多种重金属的健康总风险评估表明,无论是对于儿童还是成人,10种贝类内脏团中约有50%贝类的TTHQ值大于1,显示暴露人群若长期食用这些贝类内脏团将对健康产生不良的影响;其中蜆蛭、近江牡蛎及栉江瑶内脏团中重金属TTHQ值较高,其值接近2.00。但无论对于儿童还是成人,10种贝类肌肉中重金属TTHQ均小于1.00,表明食用该10种贝类肌肉对人体健康没有明显的负面影响。此外,10种贝

类肌肉及内脏团的TTHQ均小于10.00,表明成人和儿童食用这些贝类均不存在慢性毒性效应。

3 讨论

近年来,随着工业化、城市化及海水养殖业的快速发展,中国海域环境污染问题日益严峻,尤其是重金属污染问题。屡有报道表明,广东沿海贝类重金属污染超标^[13,19,31-33]。本研究的单因子污染指数评价结果表明,10种贝类肌肉和内脏团均受到Zn、Pb、Cd、Cr不同程度的污染,其中贝类内脏团受Cd、Zn及Pb污染较严重。可见,本研究结果与大多数研究结果相近。且水生生物体内的重金属蓄积水平与水体或底泥中重金属的含量密切相关。通常水体或底泥中重金属质量分数越高,生物体内蓄积的重金属质量分数越高^[25]。孙萍等^[31]调查了汕头港海产动物重金属含量,结果表明近江牡蛎体内的Cd、Cu、Ni和Zn含量高于人体食用限量标准;其中近江牡蛎体内的Zn含量最高,为限量标准的23.5倍。姜杰等^[3]也发现,广东

表3 粤东沿海10种海产经济贝类肌肉和内脏团中重金属对儿童的健康风险评估结果

Table 3 THQ and TTHQ for children exposure to heavy metals in muscle and visceral mass of the ten kinds of marine economic shellfish from eastern Guangdong coast

组织 Tissues	种类 Species	THQ					TTHQ
		Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	
肌肉 Muscle	波纹巴非蛤 <i>P. undulata</i>	0.016	0.097	0.010	0.010	0.162	0.295
	蜆蚌 <i>S. constricta</i>	0.018	0.112	0.067	0.028	0.022	0.247
	近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	0.088	0.076	0.062	0.003	0.040	0.269
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	0.073	0.099	0.004	0.003	0.159	0.338
	小眼花帘蛤 <i>R. variegatus</i>	0.011	0.135	0.008	0.002	0.017	0.172
	杂色鲍 <i>H. diversicolor</i>	0.012	0.125	0.008	0.005	0.015	0.165
	毛蚶 <i>S. subcrenata</i>	0.019	0.142	0.005	0.013	0.146	0.312
	栉江瑶 <i>P. pectinata</i>	0.211	0.086	0.004	0.007	0.056	0.363
	方斑东风螺 <i>B. areolata</i>	0.004	0.092	0.040	0.036	0.019	0.191
	菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	0.036	0.116	0.015	0.030	0.036	0.233
	肌肉均值 Mean value in muscle	0.049	0.108	0.022	0.014	0.067	0.260
内脏团 Viscera	波纹巴非蛤 <i>P. undulata</i>	0.020	0.081	0.012	0.484	0.126	0.724
	蜆蚌 <i>S. constricta</i>	0.123	0.071	0.080	0.794	0.568	1.637
	近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	0.150	0.090	0.116	0.720	0.588	1.664
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	0.083	0.108	0.012	0.004	0.129	0.336
	小眼花帘蛤 <i>R. variegatus</i>	0.021	0.094	0.032	0.011	0.196	0.353
	杂色鲍 <i>H. diversicolor</i>	0.247	0.110	0.138	0.056	0.440	0.991
	毛蚶 <i>S. subcrenata</i>	0.470	0.113	0.010	0.015	0.204	0.812
	栉江瑶 <i>P. pectinata</i>	1.072	0.083	0.042	0.017	0.474	1.687
	方斑东风螺 <i>B. areolata</i>	0.347	0.082	0.147	0.064	0.639	1.279
	菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	0.095	0.086	0.038	0.011	0.194	0.423
	内脏团均值 Mean value in viscera	0.263	0.092	0.063	0.218	0.356	0.991

沿海海域牡蛎体内 Zn、Cu 与栉孔扇贝和牡蛎中 Cd 含量出现超标现象。本试验所调查的贝类均生活在粤东近岸海域及潮间带,且本区域重金属污染严重^[31],推测被重金属污染的水体或底泥是贝类体内重金属超标的重要因素。但不同海域的贝类重金属污染存在差异性。李张伟等^[34]检测了粤东拓林湾海域海产品体内的重金属(Zn、Cr、Cd、Cu、Pb)含量,结果显示,大多数未被重金属污染或微污染。杜冰等^[35]对台海浅滩渔场水产品调查也表明,该海域的海产品未出现明显的污染问题,但 Cd 与 Cr 等元素的潜在风险需进一步关注。因此,不同海域贝类的重金属污染存在差异性,除了主要取决于当地海域的环境污染外,可能还与金属种类及其存在形式、贝的组织器官、季节以及海水的温度、溶解氧和盐度等有关^[36]。

贝类对不同种重金属的富集能力差异明显。孙元敏等^[9]对中国海岛潮间带贝类体内重金属含量研究结果也显示,各海岛潮间带贝类体内 Zn 和 Cu 含量较高,Pb、Cd、Cr 含量较低。庞艳华等^[20]对大连近岸

海域多种经济贝类重金属含量的调查也表明,Zn、Cu、Mn 及 Ni 质量分数显著高于 Pb、Cd 和 Hg。本研究所测定的 10 种贝类肌肉和内脏团对生命必需元素如 Zn、Mn 等的蓄积能力非常强,而对非必需元素 Pb、Cd 的蓄积能力相对较低;贝类体内 Zn、Mn 的质量分数平均值分别是 Pb 或 Cd 的几十或几百倍。本研究与大多数研究结果^[16-19]一致。普遍认为,重金属在贝类组织中的富集水平取决于重金属种类、暴露时间及浓度等,同时还受水化学性质、贝的种类及其组织器官特征、生理代谢活性等因子的影响^[25]。在软体动物体内,Cu 是构成血蓝蛋白及多种酶的必需元素,Zn、Mn 参与了生物酶的活动。因此,必需元素 Zn、Cu 及 Mn 在贝类体内的质量分数较高,Cd、Pb 不是生命必需元素,而是有毒元素,其含量高低在一定程度上反映了环境污染状况^[1]。

贝类不同组织对重金属的蓄积能力也显著不同,其中鳃和内脏是重金属富集及分布的主要部位^[22,37]。对大连近岸海域双壳贝类重金属污染状况的调查结

果^[22]也表明,Cd、Cu在虾夷扇贝闭壳肌中含量明显低于其他组织,Cr、Ni在各组织间差异较小。王军等^[38]也获得类似的研究结果,虾夷扇贝内脏团Cd、Pb质量分数高,但其闭壳肌中Pb、Cd的含量却显著低于其他组织。本试验结果显示,除Cr外,贝类内脏团中其他5种重金属质量分数的平均值均高于其相应的肌肉组织,为相应肌肉组织的2.73~15.77倍。可见,本研究与上述研究结果相近。贝类不同组织对重金属的蓄积能力的差异与相关组织的生理功能密切相关。内脏团是贝类的生化转化中心,其组织内可诱导产生大量束缚重金属的金属硫蛋白,使其对多种重金属亲和性更高,出现比肌肉更高蓄积水平的现象^[25]。李玉环等^[39]对海湾扇贝体内Cd的积累和排出规律进行了研究,结果显示该贝类内脏对重金属的富集能力远高于其肌肉组织。

本文还评估了重金属污染的人类摄入健康风险。结果表明,除了栉江瑶内脏团中Cd外,其他贝类肌肉

和内脏团中Cr、Cu、Pb、Zn的THQ均小于1.0,表明该4种重金属作为单一元素对儿童或成人没有明显的健康风险;但其总目标危险系数(TTHQ)结果表明,该10种贝类内脏团中约有50%贝类的TTHQ值大于1,表明暴露人群若长期食用这部分贝类内脏团将产生健康风险。由本研究结果推测,粤东沿海市售海产经济贝类已受到了重金属不同程度的污染,居民摄入海产贝类存在Cd暴露及多种重金属暴露的潜在健康风险。本研究与已有研究结果相近:程家丽等^[11]对我国海洋食用贝类重金属污染的健康风险分析表明,对于单一重金属,我国5个典型海域食用贝类中Cu、Pb、Cr、Hg对成人和儿童的THQ值均小于1.0,但部分海域一些贝类Cd和As污染的健康风险超出了可接受水平;杜冰等^[35]通过每周可耐受摄入量(PTWI)评价了台海浅滩渔场不同水产品中重金属的暴露风险,结果显示,Hg、Cu、Zn与Pb均处于低风险或无风险的水平,但有3.6%的样品中Cd超过推荐阈值。

表4 粤东沿海10种海产经济贝类肌肉和内脏团中重金属对成人的健康风险评估结果

Table 4 THQ and TTHQ for adults exposure to heavy metals in muscle and visceral mass of the ten kinds of marine economic shellfish from eastern Guangdong coast

组织 Tissues	种类 Species	THQ					TTHQ
		Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	
肌肉 Muscle	波纹巴非蛤 <i>P. undulata</i>	0.020	0.011	0.012	0.012	0.197	0.252
	蜆 <i>S. constricta</i>	0.021	0.012	0.081	0.034	0.027	0.176
	近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	0.107	0.008	0.076	0.004	0.049	0.244
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	0.088	0.011	0.005	0.003	0.194	0.302
	小眼花帘蛤 <i>R. variegatus</i>	0.013	0.015	0.010	0.003	0.021	0.061
	杂色鲍 <i>H. diversicolor</i>	0.015	0.014	0.010	0.006	0.018	0.063
	毛蚶 <i>S. subcrenata</i>	0.023	0.016	0.006	0.017	0.178	0.222
	栉江瑶 <i>P. pectinata</i>	0.257	0.010	0.005	0.008	0.068	0.347
	方斑东风螺 <i>B. areolata</i>	0.005	0.010	0.048	0.044	0.023	0.131
	菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	0.044	0.013	0.019	0.036	0.043	0.155
	肌肉均值 Mean value in muscles	0.059	0.012	0.027	0.017	0.082	0.197
内脏团 Viscera	波纹巴非蛤 <i>P. undulata</i>	0.025	0.009	0.015	0.589	0.153	0.790
	蜆 <i>S. constricta</i>	0.150	0.008	0.097	0.965	0.691	1.911
	近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	0.182	0.010	0.140	0.876	0.715	1.923
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	0.101	0.012	0.014	0.004	0.157	0.289
	小眼花帘蛤 <i>R. variegatus</i>	0.025	0.011	0.038	0.014	0.238	0.326
	杂色鲍 <i>H. diversicolor</i>	0.301	0.012	0.168	0.068	0.534	1.083
	毛蚶 <i>S. subcrenata</i>	0.572	0.013	0.013	0.018	0.247	0.863
	栉江瑶 <i>P. pectinata</i>	1.303	0.009	0.051	0.020	0.576	1.959
	方斑东风螺 <i>B. areolata</i>	0.421	0.009	0.179	0.078	0.777	1.464
	菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	0.116	0.010	0.046	0.013	0.235	0.419
	内脏团均值 Mean value in viscera	0.319	0.010	0.076	0.264	0.432	1.103

4 结论

(1)不同重金属在贝类体内的蓄积水平差异很大。粤东地区10种经济贝类肌肉中重金属质量分数的平均值由高至低为 $Zn>Mn>Cu>Cr>Cd>Pb$,其内脏团中重金属为 $Zn>Mn>Cu>Pb>Cr>Cd$ 。

(2)除Cu外,10种贝类肌肉和内脏团分别受到Cd、Zn、Pb、Cr不同程度的污染,其中大多数贝类内脏团中Cd、Zn及Pb的 P_i 指示为重污染水平(即超标),且多数贝类内脏团中重金属的质量分数分别高于其相应的肌肉组织。

(3)除了栉江瑶内脏团中的Cd外,10种贝类中5种重金属暴露对儿童或成人没有明显的食用健康风险,但暴露人群若长期食用该10种经济贝类的内脏团将对健康产生负面影响。

综上所述,粤东地区海洋生态环境及贝类生产已存在重金属(Cd、Zn、Pb、Cr)污染的安全隐患,建议加强该地区贝类产品重金属残留的质量监控。

参考文献:

- [1] 王增焕,王许诺.华南沿海贝类产品重金属含量及其膳食暴露评估[J].中国渔业质量与标准,2014,4(1):14-20.
WANG Zeng-huan, WANG Xu-nuo. The heavy metal contents in shellfish from south China sea coast and its dietary exposure risk[J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2014, 4(1):14-20.
- [2] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴2014[M].北京:中国农业出版社,2014.
Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture. China fishery statistical yearbook 2014[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [3] 姜杰,丘红梅,张慧敏,等.广东沿海海域海产品中重金属的含量及评价[J].环境与健康杂志,2009,26(9):814-816.
JIANG Jie, QIU Hong-mei, ZHANG Hui-min, et al. Assessment of content of heavy metals in seafood from sea area of Guangdong Province[J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26(9):814-816.
- [4] Díaz-de A M, Galindo-Riao M D, Casanueva-Marengo M J, et al. Assessment of the metal pollution, potential toxicity and speciation of sediment from Algeciras Bay (south of Spain) using chemometric tools[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1/2/3):177-187.
- [5] Cajaraville M P, Bebianno M J, Blasco J, et al. The use of biomarkers to assess the impact of pollution in coastal environments of the Iberian Peninsula: A practical approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 247(1/2):295-311.
- [6] 陈笑霞,陈红英,陈旭凌,等.广州市售四种贝类重金属含量分析及评价[J].广东微量元素科学,2015(2):1-4.
CHEN Xiao-xia, CHEN Hong-ying, CHEN Xu-ling, et al. Analysis and evaluation of heavy metal content of shellfish sold in Guangzhou[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2015(2):1-4.
- [7] 付文超,孟范平,王志峰,等.北部湾潮间带沉积物和双壳类动物中的重金属:污染特征与生物积累[J].环境科学学报,2013,33(5):1401-1409.
FU Wen-chao, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, et al. Heavy metals in the intertidal sediments and two marine bivalves along the Beibu Bay: Contamination status and bioaccumulation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5):1401-1409.
- [8] 易斌,周鹏,周俊杰,等.大亚湾海域2007—2010年海洋生物体内Hg、Pb、Cd和As含量及生物质量评价[J].海洋环境科学,2014,33(2):226-231.
YI Bin, ZHOU Peng, ZHOU Jun-jie, et al. Distribution and quality assessment of Hg, Pb, Cd and As in marine organisms from Daya Bay during 2007—2010[J]. *Marine Environmental Science*, 2014, 33(2):226-231.
- [9] 孙元敏,马志远,黄海萍.我国海岛潮间带贝类体中重金属含量及其评价[J].中国环境科学,2015,35(2):574-578.
SUN Yuan-min, MA Zhi-yuan, HUANG Hai-ping. Contamination and assessment of heavy metals in shellfish in the intertidal zone of sea islands in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2):574-578.
- [10] 孙维萍,潘建明,刘小涯,等.浙江沿海贝类体内重金属元素含量水平与评价[J].海洋学研究,2010,28(4):43-49.
SUN Wei-ping, PAN Jian-ming, LIU Xiao-ya, et al. Study of the content of heavy metals in the mollusks from the near-shore of Zhejiang Province[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2010, 28(4):43-49.
- [11] 程家丽,张贤辉,卓勤,等.我国海洋食用贝类重金属污染特征及其健康风险[J].中国食品卫生杂志,2016,28(2):175-181.
CHENG Jia-li, ZHANG Xian-hui, ZHUO Qin, et al. Accumulation and health risks of heavy metals in edible marine shellfishes from China[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2016, 28(2):175-181.
- [12] 王增焕,林钦,王许诺,等.华南沿海牡蛎重金属含量特征及其风险评估[J].水产学报,2011,35(2):291-297.
WANG Zeng-huan, LIN Qin, WANG Xu-nuo, et al. The variation features of heavy metal contents in oyster samples from the coast of South China sea and their safety assessment[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(2):291-297.
- [13] 蒋立新,杨梅,李玥,等.深圳市市售食品中镉污染状况分析[J].中国热带医学,2015,15(10):1194-1197.
JIANG Li-xin, YANG Mei, LI Yue, et al. Analysis on cadmium contamination of market-food in Shenzhen[J]. *China Tropical Medicine*, 2015, 15(10):1194-1197.
- [14] 石雪香,王本利,陈瞰,等.青岛市食品中铅、镉、总汞、总砷元素污染情况调查[J].中国卫生检验杂志,2013,23(10):2335-2337.
SHI Xue-xiang, WANG Ben-li, CHEN Jian, et al. Survey on the pollution of lead, cadmium, Hg and As in food in Qingdao[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2013, 23(10):2335-2337.
- [15] 许滋宁.南通市售食品铅镉汞铝含量监测结果分析[J].现代预防医学,2013,40(21):3933-3937.
XU Zi-ning. Analysis of lead, cadmium, mercury, aluminum pollution situation in food in Nantong[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2013, 40

- (21):3933-3937.
- [16] 苏晓鹏, 欧阳燕玲, 陈林刚. 2009—2013年泉州市售食品中重金属铅、汞和镉污染监测概况与分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, 24(12):1770-1775.
- SU Xiao-peng, OUYANG Yan-ling, CHEN Lin-gang. Monitoring and analysis of heavy metals (lead, mercury and cadmium) pollution in market food in Quanzhou during 2009—2013[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2014, 24(12):1770-1775.
- [17] 郑晓南, 王智勇, 李 瑞, 等. 2011—2012年大连市食品中镉、汞含量调查[J]. 预防医学论坛, 2014, 20(12):905-906.
- ZHENG Xiao-nan, Wang Zhi-yong, LI Rui, et al. Survey on content of cadmium and mercury in food, Dalian City, 2011—2012[J]. *Preventive Medicine Tribune*, 2014, 20(12):905-906.
- [18] 曹立民, 周 婷, 米娜莎. 贝类食品的重金属和毒素危害问题及对策[J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(5):12-17.
- CAO Li-min, ZHOU Ting, MI Na-sha. Issues and countermeasures of heavy metals and toxins in shellfish[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 33(5):12-17.
- [19] 陈清香, 杨 文, 初庆柱. 湛江硇洲岛海域19种贝类食用部位的重金属含量及评价[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):175-180.
- CHEN Qing-xiang, YANG Wen, CHU Qing-zhu. Assessments on contents of heavy metals in the edible parts of 19 mollusks from Nao-zhou Island, Zhanjiang[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(1):175-180.
- [20] 庞艳华, 隋 凯, 王秋艳, 等. 大连近岸海域双壳贝类重金属污染调查与评价[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(3):410-413.
- PANG Yan-hua, SUI Kai, WANG Qiu-yan, et al. Investigation and assessment on heavy metals in bivalve seashells of Dalian coastline [J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(3):410-413.
- [21] 郑 娜, 王起超, 郑冬梅. 基于THQ的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4):672-678.
- ZHENG Na, WANG Qi-chao, ZHENG Dong-mei. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc smelting plant based THQ[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4):672-678.
- [22] 王 宇, 刘东红. 贝类中重金属的研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(13):336-340.
- WANG Yu, LIU Dong-hong. Research progress of heavy metals in shellfish[J]. *Food Science*, 2011, 32(13):336-340.
- [23] 阮金山. 厦门贝类养殖区海水、沉积物和养殖贝类体内重金属含量的初步研究[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(5):47-54.
- RUAN Jin-shan. A preliminary study of heavy metal contents in sea water, sediments and cultured shellfish in shellfish culture areas of Xiamen[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(5):47-54.
- [24] 李学鹏, 励建荣, 段青源, 等. 杭州市近江市场食用贝类中重金属含量调查及评价[J]. 中国食品学报, 2008, 8(4):14-20.
- LI Xue-peng, LI Jian-rong, DUAN Qing-yuan, et al. Investigation and assessment of heavy metal in edible bivalves collected from the Jinjiang market of Hangzhou[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2008, 8(4):14-20.
- [25] 钟艳梅, 郑清梅, 韩春艳, 等. 粤东北地区淡水经济鱼类重金属含量的测定与评价[J]. 广东农业科学, 2014, 41(12):100-104.
- ZHONG Yan-mei, ZHENG Qing-mei, HAN Chun-yan, et al. Determination and evaluation of heavy metal concentrations in fresh water economic fishes from the northeast area of Guangdong Province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(12):100-104.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 农产品安全质量: 无公害水产品安全要求 GB 18406.4—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Safety qualification for agricultural product: Safety requirements for non-environmental pollution aquatic products GB 18406.4—2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [27] Anon G. Report on revised standard for metals in food. Appendix I—V [R]. Canberra: Commonwealth Government Printers, 1979:60-70.
- [28] 秦春艳, 方展强, 唐以杰, 等. 珠江口伶仃洋习见水生动物体内重金属含量测定与评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2010(3):104-109, 114.
- QIN Chun-yan, FANG Zhan-qiang, TANG Yi-jie, et al. Contents and evaluation of heavy metals in common aquatic from Lingding Yang in Pearl River estuary, South China Ocean[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2010(3):104-109, 114.
- [29] 刘 洋, 付 强, 高 军, 等. 江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价[J]. 环境科学, 2013, 34(10):4081-4089.
- LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, et al. Concentrations and safety evaluation of heavy metals in aquatic products of Yancheng, Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10):4081-4089.
- [30] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34(3):1076-1085.
- LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3):1076-1085.
- [31] 孙 萍, 黄长江, 乔永民, 等. 汕头港及其邻近水域潮间带海产动物体内重金属污染的调查[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(4):56-62.
- SUN Ping, HUANG Chang-jiang, QIAO Yong-min, et al. An investigation on heavy metal contamination of marine animals in Shantou Harbor[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(4):56-62.
- [32] 励建荣, 徐 辉. 海水双壳贝类的质量控制研究进展[J]. 食品科学, 2005, 26(增刊1):128-134.
- LI Jian-rong, XU Hui. Advances in study on quality controlling of marine bivalve mollusks[J]. *Food Science*, 2005, 26(Suppl 1):128-134.
- [33] 王许诺, 王增焕, 林 钦, 等. 广东沿海贝类4种重金属含量分析和评价[J]. 南方水产, 2008(6):83-87.
- WANG Xu-nuo, WANG Zeng-huan, LIN Qin, et al. Analysis and assessment of the content of four heavy metals in shellfish along Guangdong coastal waters[J]. *South China Fisheries Science*, 2008(6):83-87.
- [34] 李张伟, 郭婷子. 粤东拓林湾海产动物的重金属污染检测与评价

- [J]. 海洋环境科学, 2011, 30(5):664-667.
- LI Zhang-wei, GUO Ting-zi. Assessment on pollution of heavy metals in seafood of Tuolin Harbor in east of Guangdong Province[J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(5):664-667.
- [35] 杜冰, 孙鲁闽, 郝文博, 等. 台海浅滩渔场不同水产品中重金属含量与暴露风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11):2049-2058.
- DU Bing, SUN Lu-min, HAO Wen-bo, et al. Concentration and risk assessment of heavy metals in aquatic products collected from Taiwan shallow fishery[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11):2049-2058.
- [36] 王静凤. 重金属在海产贝类体内的累积及其影响因素的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2004.
- WANG Jing-feng. Studies on the bioaccumulation of heavy metal in marine bivalves and the influencing factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [37] 刘启明, 林建清, 张亚平. 福建沿海牡蛎重金属含量特征及其在不同组织器官的分布[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(3):343-352.
- LIU Qi-ming, LIN Jian-qing, ZHANG Ya-ping, et al. Contents of heavy metals and distribution characteristics in different tissues and organs of oyster from Fujian coastal waters[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(3):343-352.
- [38] 王军, 翟毓秀, 宁劲松, 等. 养殖虾夷扇贝不同组织中重金属含量的分布[J]. 海洋科学, 2009, 33(8):44-47.
- WANG Jun, ZHAI Yu-xiu, NING Jin-song, et al. Heavy metal distribution in different tissues of *Patinopecten yessoensis*[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(8):44-47.
- [39] 李玉环, 黄海, 王佃伟. 海湾扇贝体内重金属镉的富集和消除规律的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(3):109-113.
- LI Yu-huan, HUANG Hai, WANG Dian-wei, et al. Study on accumulation and elimination of cadmium in *Argopecten irradians*[J]. *Food Science*, 2009, 30(3):109-113.