

风险监测

嘉兴市经营环节海产品中砷的形态分布与膳食暴露风险评估

葛森华,周莹,张翔,吴小琼

(嘉兴市疾病预防控制中心,浙江嘉兴 314050)

摘要:目的 了解嘉兴市经营环节海产品中砷的形态分布情况,评估食用海产品暴露的砷对人体的健康风险。方法 采用液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术(HPLC-ICP-MS)对嘉兴市经营环节中采集的5种共105份海产品样品总砷及砷形态污染情况进行检测,结合嘉兴市居民水产品消费数据,对食用海产品带来的无机砷暴露的健康风险进行分析。结果 105份样品中,5种海产品中总砷平均含量范围为0.85~41.85 mg/kg,主要以无毒的砷甜菜碱或砷糖为主,有机砷含量占总砷的90%以上。无机砷的检出率为45.7%,检出浓度范围为0.015~1.169 mg/kg,中位值为0.011 mg/kg,含量较高的海产品主要为海藻类、甲壳类,其中1份样品高于GB 2762—2022的水产品限量值,超标率为0.95%。暴露边界比值(MOE)健康风险分析结果表明,嘉兴市居民食用海产品的健康风险较低(MOE值均远大于1),城市居民风险程度略高于农村居民,女性风险程度略高于男性。结论 嘉兴市居民食用一般海产品暴露的无机砷引起的健康风险较低,但要避免长期大量摄入无机砷较高的海产品(海藻类、甲壳类)。

关键词:总砷;砷形态;无机砷;海产品;健康风险

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2023)10-1468-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2023.10.010

Speciation analysis and health risk assessment of arsenic in seafood from Jiaxing markets

GE Miaohua, ZHOU Ying, ZHANG Xiang, WU Xiaoqiong

(Jiaxing Center for Disease Control and Prevention, Zhejiang Jiaxing 314050, China)

Abstract: Objective To understand the speciation of arsenic in seafood sold in Jiaxing City, the health risks of arsenic exposure due to seafood consumption were evaluated. **Methods** Total arsenic levels and arsenic speciation in 105 samples collected from five seafood categories were detected by high-performance liquid chromatography inductively coupled plasma mass spectrometry. The health risks of inorganic arsenic exposure caused by edible seafood were analyzed based on data for the consumption of aquatic products. **Results** After testing 105 samples, the average total arsenic content in the five major types of seafood ranged from 0.85 to 41.85 mg/kg. However, it was primarily in the form of nontoxic arsenobetaine or arsenosugars, with organic arsenic accounting for more than 90% of the total arsenic content. The detection rate of inorganic arsenic was 45.7%, with concentrations ranging from 0.008 to 1.169 mg/kg, and a median value of 0.011 mg/kg. Seafood products with the highest levels of arsenic were mainly seaweed and crustaceans, and one sample exceeded the maximum limit set by the National Food Safety standard GB 2762—2017 for water products by 0.95%. The results of the margin of exposure health risk analysis indicated that the health risks associated with consuming seafood for residents of Jiaxing City were relatively low (margin of exposure values significantly higher than 1). The risk level was slightly higher for urban residents than for rural residents and slightly higher for females than for males. Increased seafood consumption increased the risk level. Considering factors, such as overall dietary exposure, cooking methods, and transformation during consumption, the risk level would further increase. **Conclusion** The health risk caused by inorganic arsenic exposure in seafood is relatively low, but long-term intake of seafood (seaweed and chitin) with high inorganic arsenic content should be avoided.

Key words: Total arsenic; arsenic form; inorganic arsenic; seafood; health risk

收稿日期:2022-12-14

基金项目:嘉兴市科技工作专项计划(2023AY11055)

作者简介:葛森华 男 副主任技师 研究方向为理化检验 E-mail:76485685@qq.com

通信作者:吴小琼 女 副主任技师 研究方向为理化检验 E-mail:285016065@qq.com

随着生活水平的提高,海产品因其特有的营养价值,越来越受人们的喜爱,随之兴起的也有部分海产品通过人工养殖的方式进入了人类的餐盘。但是随着工业的发展,海洋环境的恶化,自然界中的砷和人类滥用抑制剂造成的污染物,由地表径流的方式汇入海水,通过食物链的方式在海产品中富集^[1-4],又通过污染的海产品进入人体,长期摄入和累积可对人体的健康产生危害^[5-6],因此海产品摄入成为人体暴露砷元素的主要途径之一^[7-9]。

砷的生物毒性与其存在形态息息相关,以半数致死剂量(LD₅₀)计,各形态的毒性大小为:三价砷[As(Ⅲ)]>五价砷[As(V)]>一甲基砷(MMA)>二甲基砷(DMA)>砷甜菜碱(AsB)>砷胆碱(AsC)>砷糖,其中AsC、AsB、砷糖被认为低毒或者无毒^[10-14]。因此科学合理评估摄入海产品带来的健康风险,需要掌握常见海产品的砷形态分布数据,结合居民膳食摄入水平进行风险评估分析。食品安全风险评估是结合了污染物浓度、膳食数据和剂量毒理效应而进行的一种潜在风险评价,是国际公认的制定食品安全政策法规、标准以及解决贸易争端的重要依据^[15-16]。

本研究以高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术对嘉兴市经营环节中常见的海产品中砷污染情况进行监测分析,测定了5种105个海产品样品中的总砷、无机砷[As(Ⅲ)、As(V)]及有机砷[ROX(洛克沙肿)、Carbstone(卡巴肿)、AsC、AsB、DMA、MMA]的砷形态含量分布,并结合居民水产消费数据进行风险分析,为人群建立合理安全的消费习惯提供指导依据。

1 材料与方 法

1.1 主要仪器与试剂

NEXION 350D 电感耦合等离子体质谱仪、AltusTM A-10 高效液相色谱仪(美国铂金埃尔默公司),MARS6 微波消解仪(美国 CEM 公司),超纯水系统(Milli-Q,美国 Millipore 公司)。

砷标准:As(Ⅲ)(1.011 μmol/g, GBW08666)、As(V)(0.233 μmol/g, GBW08667)、MMA(0.335 μmol/g, GBW08668)、DMA(0.706 μmol/g, GBW08669)、AsC(0.374 μmol/g, GBW08671)、AsB(0.518 μmol/g, GBW08670)、砷单元素标准溶液(1 000 mg/L, GBW08611)均购自中国计量科学研究院,Carbstone(100 mg, 99.8%, 中国食品药品检定研究院),ROX(0.25 g, 99.6%, TMstandard),扇贝粉(GBW10024, 地球物理地球化学勘查研究所),金枪鱼组织中砷形态标准物质(BCR-627, 欧洲标准局),流动相 A:

磷酸铵(AR, 国药, 30 mmol/L)-硝酸铵(AR, 国药, 30 mmol/L), pH 8.5, 流动相 B: 碳酸铵(AR, 国药, 1 mmol/L), 流动相 C: 甲醇(色谱纯, 美国天地公司)。

1.2 样本的采集与选择

随机采集嘉兴市域范围内各农贸市场、超市在售的海产品,包括海鱼类(带鱼、小黄鱼、秋刀鱼等)、甲壳类(蛤蜊、蛏子、花蛤等)、海藻类(紫菜、海带等)、海虾类(明虾、北极虾、北美红虾等)、海蟹类(梭子蟹、青蟹、面包蟹等),取可食部分绞碎混合均匀后备用。

1.3 实验方法

1.3.1 总砷含量的测定

参照《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》GB 5009.11—2014^[17],准确称取搅碎混匀后的样品 0.300 0 g(精确至 0.000 1 g),加入 5 mL 硝酸,加入 3 mL 双氧水,加盖过夜,次日于 190 °C 微波消解 25 min,消解完成后定容到 50 mL,高浓度样品用 0.15 mol/L 硝酸稀释,用 ICP-MS 进行测定。

总砷分析 ICP-MS 仪器参数:RF 功率:1 300 W;等离子体气:16 L/min;辅助气:0.6 L/min;雾化气:1.1 L/min;检测模式:DRC(NH₃);RPQ:0.25;分析质量数:As⁷⁵。

1.3.2 砷形态的测定

参照《高效液相-电感耦合等离子体质谱联用测定海产品中 8 种砷形态》进行测定^[18]。称取样品 1.00 g,加入 20 mL 0.15 mol/L 硝酸,于 90 °C 微波提取 30 min,过 0.22 μm 滤膜后上 HPLC-ICP-MS 测定 As(Ⅲ)、As(V)、AsC、AsB、DMA、MMA、ROX、Carbstone 八种砷形态,无机砷为 As(Ⅲ)、As(V)的含量之和。

砷形态分析 ICP-MS 仪器参数:RF 功率:1 300 W;等离子体气:16 L/min;雾化气:1.1 L/min;检测模式:STD;RPQ:0.45;分析质量数:As⁷⁵。砷形态分析 HPLC 色谱调件见表 1。

表 1 梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution procedure

时间/min	流速/(mL/min)	流动相 A/%	流动相 B/%	流动相 C/%
0.00	1	5	87	8
1.50	1	5	87	8
2.50	1	92	0	8
17.0	1	92	0	8
18.0	1	5	87	8
20.0	1	5	87	8

1.3.3 结果质量控制

在 0~200.00 μg/L 的砷单元素标准溶液浓度下,总砷测定的标准曲线回归方程 Y=0.000 93X+3.605,相关系数 r=0.999 98。GBW10024 扇贝质控

标准物质的6次测定均值为:3.53 mg/kg, RSD为5.42%, 6次结果均在参考值范围内(总砷参考值:3.6±0.6 mg/kg),说明本研究采用的海产品中总砷的ICP-MS检测方法准确度高,结果可靠。

分别配制浓度为1.0、2.0、5.0、10.0、25.0、50.0、100.0 μg/L的As(Ⅲ)、As(V)、MMA、DMA、AsC、AsB标准系列和浓度为2.0、4.0、10.0、20.0、50.0、100.0、200.0 μg/L的Carbstone、ROX标准系列,8种砷形态化合物的色谱峰响应面积与对应的质量浓度呈良好线性关系,相关系数均大于0.999 0,以HPLC-ICP-MS色谱峰3倍信噪比(S/N)所对应的浓度计算检出限(Limit of detection, LOD),

以10倍S/N所对应的浓度计算定量下限(Limit of quantitative, LOQ),在进样量为20 μL时,8种砷形态化合物的检出限为2.95~11.35 μg/kg,定量下限为9.83~37.83 μg/kg(以As计),见表2。

对BCR-627的金枪鱼质控标准物质进行6次平行测定,AsB测定均值为3.91 mg/kg, RSD为3.14%;DMA测定均值为0.155 mg/kg, RSD为7.12%,6次结果均在质控品参照值范围内(AsB参考值:3.90±0.22 mg/kg;DMA参考值:0.150±0.022 mg/kg)。结果表明采用本研究的HPLC-ICP-MS检测海产品中的砷形态分析,具有较好的准确度、精密度,能够满足检测需求。

表2 8种砷化合物的线性参数及检出限

Table 2 Linear parameters and detection limits of 8 arsenic compounds

组分	回归方程	相关系数r	线性范围/(μg/L)	检出限/(μg/kg)	定量限/(μg/kg)
AsC	y=38 800x-6 730	1.00 000	0~100	9.15	30.50
AsB	y=41 600x-17 900	0.99 992	0~100	5.25	17.50
As(Ⅲ)	y=35 400x-19 700	0.99 996	0~100	11.35	37.83
DMA	y=40 300x-20 800	0.99 983	0~100	3.25	10.83
MMA	y=36 200x-7 880	0.99 996	0~100	2.95	9.83
As(V)	y=37 300x+79 000	0.99 987	0~100	4.60	15.30
Carbstone	y=34 400x-37 500	0.99 938	0~200	9.65	32.17
ROX	y=32 700x-5 290	0.99 972	0~200	10.55	35.17

1.4 评价依据

1.4.1 海产品无机砷超标率评价依据

本文以《食品安全国家标准 食品中污染物限量》GB 2762—2022^[19]为判定标准对海产品中砷形态含量进行评价,鱼类无机砷限量为0.1 mg/kg,甲壳、虾、蟹、海藻等无机砷限量为0.5 mg/kg。

1.4.2 海产品摄入带来的无机砷健康风险分析

对海产品消费的人群健康风险评估采用欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)在2005年提出的暴露边界法(Margin of exposure, MOE)^[20]。本文通过调查海产品中无机砷的污染水平,结合当地居民水产品消费量,按照以下公式进行无机砷暴露风险评估,MOE≤1,认为健康风险需引起关注,反之则健康风险较低。MOE数值越大,表明潜在风险越小。

$$CDI = \frac{C \times M}{BW} \quad \text{公式(1)}$$

$$MOE = \frac{BMDL_{0.5}}{CDI} \quad \text{公式(2)}$$

其中:BMDL_{0.5}为0.5%基准水平下线,即引起0.5%动物阳性反应的最低剂量,联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)给出的无机砷基准剂量下限值(BMDL_{0.5})分别为0.3~8.3 μg/kg·BW·d^[21]; CDI为人群每日实际暴露的无机砷水平,mg/kg·BW·d; C为海产品中

无机砷中位值含量,mg/kg; M为居民海产品每日消费量,kg/d; BW:居民平均体质量,kg。

1.5 统计学分析

数据统计采用SPSS 20.0统计学软件,未检出值的处理利用世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐的替代法,未检出值用1/2 LOD进行替换,数据处理采用EXCEL 2019。

2 结果

2.1 在售海产品中的砷污染情况调查

本文对采购于嘉兴市场的海产品(甲壳类、海鱼类、海虾类、海蟹类、海藻类)的总砷含量进行了测定,所有样品的总砷平均值为10.36 mg/kg,5种海产品的总砷平均含量范围为0.85~41.85 mg/kg,其中海鱼类含量平均值最低,为0.85 mg/kg;海藻类含量平均值最高,为41.85 mg/kg;海虾类含量平均值为7.23 mg/kg,除1份北极虾检出浓度高达124.47 mg/kg之外,其余19份虾的含量范围为0.06~8.81 mg/kg,平均值为1.06 mg/kg,结果见表3。

全部样品的形态分析结果显示,Carbstone、ROX等人造砷制剂,在所有海产品中均未检出,其余6种砷形态化合物均有不同程度的检出,其中以无毒的AsB为主。48份样品检出无机砷(检出限为0.015 mg/kg),检出率为45.7%,检出值范围

0.015~1.169 mg/kg,平均值为 0.048 mg/kg,其中 1 份样品(海带)无机砷检出浓度为 1.169 mg/kg,超过 GB 2762—2022 中水产品的无机砷限量,超标率 0.95%。不同种类的海产品中无机砷含量有一定的

差异,从平均值来看,海藻类(0.161 mg/kg)>甲壳类(0.052 mg/kg)>海鱼类(0.016 mg/kg)>海虾类(0.005 mg/kg)>海蟹类(0.004 mg/kg),结果见表 4、表 5。

表 3 海产品中总砷的检测结果

Table 3 Detection results of total arsenic in seafood

样品类型	样品量/份	总砷含量范围/(mg/kg)	总砷含量中位数/(mg/kg)	总砷含量平均值(mg/kg)
甲壳类	21	0.47~2.61	1.73	1.77
海鱼类	30	0.11~2.65	0.52	0.85
海虾类	20	0.06~124.47	0.39	7.23
海蟹类	15	2.65~15.32	4.87	5.66
海藻类	19	27.88~62.59	41.68	41.85

表 4 海产品中无机砷的检测结果

Table 4 Detection results of inorganic arsenic in seafood

样品类型	样品量/份	检出率/%	无机砷含量范围/(mg/kg)	无机砷含量中位数/(mg/kg)	无机砷含量平均值/(mg/kg)
甲壳类	21	95.2	0.015~0.195	0.034	0.052
海鱼类	30	30.0	0.015~0.045	0.010	0.016
海虾类	20	20.0	0.015~0.019	0.009	0.005
海蟹类	15	20.0	0.015~0.027	0.008	0.004
海藻类	19	63.2	0.015~1.169	0.094	0.161

表 5 海产品中砷形态检测结果

Table 5 Detection results of 8 arsenic forms in seafood

样品种类	AsC/(mg/kg)			AsB/(mg/kg)			As(III)/(mg/kg)		
	平均值	中位数	检出范围	平均值	中位数	检出范围	平均值	中位数	检出范围
甲壳类	0.063	0.032	0.009~0.599	1.436	1.332	0.350~2.458	0.024	0.006	0.006~0.122
海鱼类	0.012	0.005	0.009~0.058	0.505	0.349	0.005~2.390	0.010	0.006	0.006~0.027
海虾类	0.016	0.005	0.009~0.090	6.111	0.342	0.041~103.938	0.006	0.006	ND
海蟹类	0.041	0.014	0.009~0.407	5.158	4.377	2.244~13.432	0.006	0.006	0.006~0.019
海藻类	0.006	0.005	0.009~0.031	37.770	38.635	23.501~55.552	0.012	0.006	0.006~0.078

样品种类	DMA/(mg/kg)			MMA/(mg/kg)			As(V)/(mg/kg)		
	平均值	中位数	检出范围	平均值	中位数	检出范围	平均值	中位数	检出范围
甲壳类	0.044	0.041	0.022~0.091	0.003	0.002	0.003~0.018	0.033	0.034	0.002~0.072
海鱼类	0.013	0.002	0.003~0.087	0.030	0.002	0.003~0.137	0.009	0.005	0.002~0.310
海虾类	0.005	0.002	0.003~0.043	0.008	0.002	0.003~0.098	0.006	0.003	0.002~0.019
海蟹类	0.024	0.024	0.003~0.044	0.033	0.029	0.003~0.179	0.005	0.002	0.002~0.027
海藻类	0.885	0.686	0.274~1.791	0.047	0.042	0.003~0.109	0.155	0.089	0.002~1.115

注:ND为未检出

2.2 海产品中砷的形态分布特征

以鱼、蟹、甲壳、虾和藻类为代表来分析海产品中的砷形态分布特征,图 1~5 为 5 种海产品中的各种形态砷化合物平均浓度占总砷平均浓度的百分比。5 种海产品中的砷形态分布均以无毒的 AsB 为主,占比均超过 89%,海虾类最高为 99.55%,As(III)、As(V)、MMA、DMA、AsC、AsB 等均有不同程度的检出,其中甲壳类、海鱼类的无机砷[As(III)、As(V)]占比相对较高,分别为 3.28%、2.30%,其他 3 类均低于 1.00%。根据现有文献资料报道,AsB 也有可能是另外一种砷化合物-砷糖,李卫华等^[22]研究发现海藻样品中的砷糖-OH 和 AsB 在阴离子交换色谱中出峰时间一致无法分离,并通过阳离子交换实现了二者分离,证明以砷糖-OH 为主。刘永涛^[23]建立了海带、紫菜中的高分辨率质谱检测方法,结果显示海带主要以砷糖-OH、砷糖-PO₄ 和砷

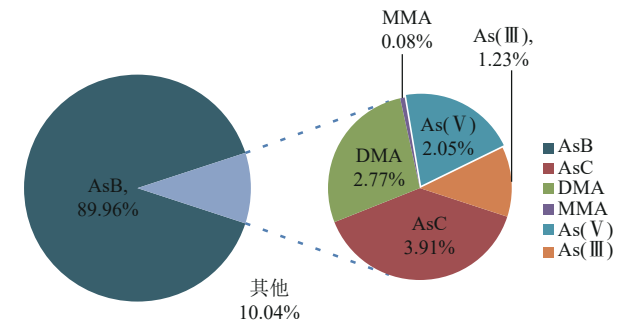


图 1 甲壳类砷形态分布特征

Figure 1 Speciation analysis of arsenic in chitin

糖-SO₃形式为主,紫菜则以砷糖-OH、砷糖-PO₄形式为主,因此本研究海产品中的 AsB 也可能是砷糖类。

2.3 海产品无机砷摄入风险分析

根据中国水产流通与加工协会发布的 2014—2020 年全国及城镇、农村居民人均水产品消费量报

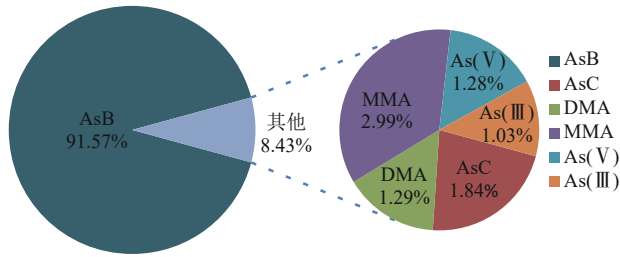


图2 海水鱼类砷形态分布特征

Figure 2 Speciation analysis of arsenic in marine fishes

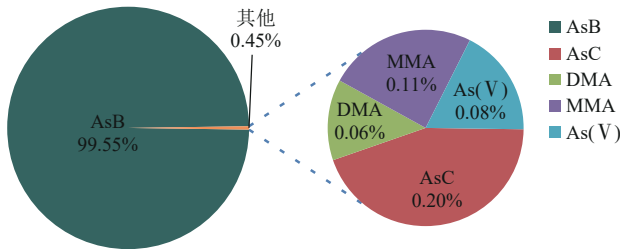


图3 海虾类砷形态分布特征

Figure 3 Speciation analysis of arsenic in sea shrimp

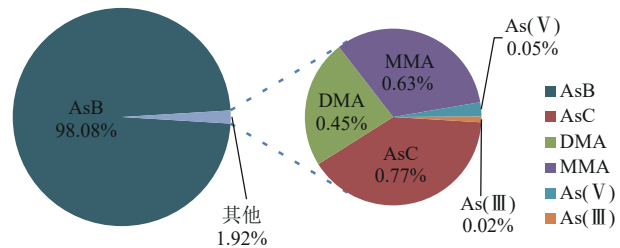


图4 海蟹类砷形态分布特征

Figure 4 Speciation analysis of arsenic in sea crabs

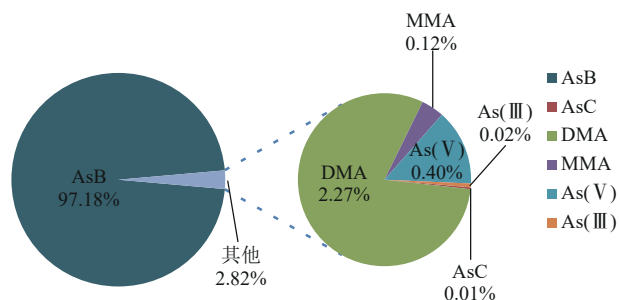


图5 海藻类砷形态分布特征

Figure 5 Speciation analysis of arsenic in seaweed

告,浙江省水产消费量城镇居民 0.077 kg/d、农村居民 0.058 kg/d,全部 105 份样品的无机砷检测结果,其中位数为 0.011 mg/kg,男性和女性的平均体重分别为 69.6 和 59.0 kg(中国居民营养与慢性病状况报告 2020 年版),按照 JECFA 的标准,无机砷的基准剂量置信下限值(BMDL_{0.5})为 3 μg/(kg·BW·d),采用公式 1 和公式 2 计算食用各类海产品所带来的无机砷摄入风险,结果显示,MOE 值均远大于 1,健康风险较低,但考虑海产品只是无机砷摄入众多饮食消费中的一部分,根据吴永宁等^[24]发布的第五次总膳食研究数据(2009—2013 年),浙江省居民水产类的无机砷摄入贡献约占 3.2%,实际摄入风险

会增加,其中风险程度城市略高于农村,女性略高于男性,海产品消费量的增加能提高风险程度,结果见表 7。

表7 嘉兴市居民暴露量

Table 7 Residents' exposure level in Jiaxing city

居民类别	水产消费量/ (kg/d)	平均体重/ kg	BMDL _{0.5} / (μg/kg·BW·d)	MOE
城镇居民	男	0.077	69.6	3.0
	女	0.077	59.0	3.0
农村居民	男	0.058	69.6	3.0
	女	0.058	59.0	3.0

3 结论

对嘉兴市经营环节 5 大类共计 105 份海产样本中的总砷及砷形态化合物进行了检测,结果发现总砷均值范围为 0.85~41.85 mg/kg,无机砷的检出率为 45.7%,检出率含量 0.015~1.169 mg/kg,中位值 0.011 mg/kg,其中 1 份样品高于 GB 2762—2022 的水产限量值,超标率 0.95%。海产品中砷化合物主要以砷甜菜碱或砷糖等有机砷形态存在,占总砷 90% 以上。结合 2014—2020 年全国及城镇、农村居民人均水产品消费量报告中水产消费情况对食用海产品的无机砷摄入风险分析,结果显示嘉兴市居民食用一般海产品引起的无机砷安全风险极低,但考虑食物总膳食因素、结合海产在烹饪^[25]、消化过程可能导致的砷形态转化,长期大量摄入会存在一定的健康风险,尤其是幼童、孕妇等敏感人群应避免长期大量食用无机砷含量较高的海产品。有研究显示对样品进行预冲洗可降低 50% 风险^[26],因此在食用无机砷含量较高的海产品时,应对海产品进行必要的浸泡、冲洗和蒸煮,可降低摄入无机砷的风险。

参考文献

[1] 由丽萍,孙珊,赵玉庭,等.洛克沙砷在栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)体内的富集与释放规律[J].海洋环境科学,2020,39(2):211-215.
YOU L P, SUN S, ZHAO Y T, et al. Biological accumulation and release of roxarsone in marine scallop (*Chlamys farreri*) [J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(2): 211-215.

[2] 邓辅财,廖桂红,刘丹,等.粤西地区农田土壤中氨基甲酸含量调查研究[J].江西农业,2019(10):100-101.
DENG F C, LIAO G H, LIU D, et al. Investigation and research on glyphosate residue levels in farmland soil in western Guangdong [J]. Jiangxi Agriculture, 2019(10): 100-101.

[3] 许润东.养殖废水中洛克沙砷的生物电化学转化研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
XU R D. Study on bioelectrochemical transformation of loksarsenic in aquaculture wastewater [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

- [4] 龚立科, 王姝婷, 任韧, 等. 杭州市市售蟹类水产品的多元素分布特征[J]. 中国卫生检验杂志, 2020, 30(16): 2012-2017.
GONG L K, WANG S T, REN R, et al. Characteristics of multi-elemental distribution in crab from Hangzhou market [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2020, 30(16): 2012-2017.
- [5] JOARDAR M, DAS A, CHOWDHURY N R, et al. Health effect and risk assessment of the populations exposed to different arsenic levels in drinking water and foodstuffs from four villages in arsenic endemic Gaighata block, West Bengal, India [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43(8): 3027-3053.
- [6] BIBI I, SHAHID M, NIAZI N K, et al. Hydrogeochemical and health risk evaluation of arsenic in shallow and deep aquifers along the different floodplains of Punjab, Pakistan [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402: 124074.
- [7] 张荣昶, 宋扬, 于红卫, 等. 青岛市市售海产品砷污染状况及无机砷暴露风险评估[J]. 现代预防医学, 2020, 47(6): 1016-1019.
ZHANG R C, SONG Y, YU H W, et al. Arsenic pollution and risk assessment of inorganic arsenic from seafood in Qingdao [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(6): 1016-1019.
- [8] 杨红丽, 朱四喜. 舟山加工海产品中无机砷含量分析及评价[J]. 广州化工, 2010, 38(9): 117-118.
YANG H L, ZHU S X. The analysis and assessment of inorganic arsenic in produced seafood of Zhoushan [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2010, 38(9): 117-118.
- [9] LUVONGA C, RIMMER C A, YU L L, et al. Determination of total arsenic and hydrophilic arsenic species in seafood [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96: 103729.
- [10] 陆奕娜, 魏建华, 许慨, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法同时测定海产品中9种砷形态化合物[J]. 理化检验-化学分册, 2017, 53(9): 1087-1093.
LU Y N, WEI J H, XU K, et al. Simultaneous determination of nine arsenic species in marine products by HPLC-ICP-MS [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B (Chemical Analysis), 2017, 53(9): 1087-1093.
- [11] 安娅丽, 赵艳萍, 刘宁, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体串联质谱法同时测定土壤中的阿散酸、洛克沙肿及其降解产物[J]. 分析测试学报, 2019, 38(11): 1353-1357.
AN Y L, ZHAO Y P, LIU N, et al. Simultaneous determination of p-arsanilic acid, roxarsone and their degradation products in soils by HPLC-ICP-MS/MS [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2019, 38(11): 1353-1357.
- [12] ZHAO Y, ZHEN Z, WANG Z, et al. Influence of environmental factors on arsenic accumulation and biotransformation using the aquatic plant species Hydrilla verticillata [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 90: 244-252.
- [13] ZHANG J, BARAŁKIEWICZ D, WANG Y Z, et al. Arsenic and arsenic speciation in mushrooms from China: A review [J]. Chemosphere, 2020, 246: 125685.
- [14] 杨慧, 戴守辉, 王富华, 等. 海产品中的砷形态及其毒理代谢研究[J]. 农产品质量与安全, 2017(1): 21-26.
YANG H, DAI S H, WANG F H, et al. Overview on arsenic speciation, its metabolism and toxicity in seafood [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2017(1): 21-26.
- [15] 梅光明, 严国, 常家琪, 等. 浙江沿海海产品无机砷污染调查及食用风险分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(12): 218-223.
MEI G M, YAN G, CHANG J Q, et al. Investigation on inorganic arsenic pollution of seafood in Zhejiang coast and potential dietary health risk assessment [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(12): 218-223.
- [16] 殷庆宝. 食品安全风险分析在食品质量管理中的应用[J]. 现代食品, 2019(12): 125-128.
YIN Q B. Application of food safety risk analysis in food quality management [J]. Modern Food, 2019(12): 125-128.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定: GB 5009.11—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard- Determination of total arsenic and abio-arsenic in food: GB 5009.11—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [18] 葛淼华, 吴小琼, 高薇薇, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用测定海产品中8种砷形态[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(5): 518-522.
GE M H, WU X Q, GAO W W, et al. Determination of eight arsenic species in seafood by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(5): 518-522.
- [19] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard- Maximum levels of contaminants in foods: GB 2762—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [20] EFSA Scientific Committee. Guidance on the use of the margin of exposure (MOE) approach in risk assessment [J]. EFSA Journal, 2012, 10(3): 2579.
- [21] 冯灏. 中国人群膳食中无机砷的污染水平及暴露评估研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016.
FENG H. Study on pollution level and exposure assessment of inorganic arsenic in diets of China population [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016.
- [22] 李卫华, 王雅珍, 刘玉海. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱检测海藻中的砷[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 65-68.
LI W H, WANG Y Z, LIU Y H. Detection of arsenic in algae with HPLC-ICPMS [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2006, 34(4): 65-68.
- [23] 刘永涛. 海带和紫菜中金属元素水平及风险评估研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
LIU Y T. Study on the level and risk assessment of metal elements in kelp and laver [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural

- University, 2016.
- [24] 吴永宁, 赵云峰, 李敬光. 第五次中国总膳食研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 359-362.
- WU Y N, ZHAO Y F, LI J G. The fifth China total diet study [M]. Beijing: Science Press, 2018: 359-362.
- [25] LIAO W, WANG G, LI K M, et al. Change of arsenic speciation in shellfish after cooking and gastrointestinal digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66 (29): 7805-7814.
- [26] ATIAGA O, NUNES L M, OTERO X L. Effect of cooking on arsenic concentration in rice [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(10): 10757-10765.

(上接第1431页)

- 刘弘(上海市疾病预防控制中心)
- 刘长青(河北省疾病预防控制中心)
- 刘成伟(江西省疾病预防控制中心)
- 刘兆平(国家食品安全风险评估中心)
- 刘守钦(济南市疾病预防控制中心)
- 刘烈刚(华中科技大学公共卫生学院)
- 刘爱东(国家食品安全风险评估中心)
- 孙长颢(哈尔滨医科大学)
- 李 宁(国家食品安全风险评估中心)
- 李 黎(中华预防医学会)
- 李凤琴(国家食品安全风险评估中心)
- 李业鹏(国家食品安全风险评估中心)
- 李国梁(陕西科技大学食品与生物工程学院)
- 李静娜(武汉市疾病预防控制中心)
- 杨 方(福州海关技术中心)
- 杨 钧(青海省卫生健康委员会卫生监督所)
- 杨大进(国家食品安全风险评估中心)
- 杨小蓉(四川省疾病预防控制中心)
- 杨杏芬(南方医科大学公共卫生学院)
- 肖 荣(首都医科大学公共卫生学院)
- 吴永宁(国家食品安全风险评估中心)
- 何更生(复旦大学公共卫生学院)
- 何来英(国家食品安全风险评估中心)
- 何洁仪(广州市疾病预防控制中心)
- 姜毓君(东北农业大学食品学院)
- 聂俊雄(常德市疾病预防控制中心)
- 贾旭东(国家食品安全风险评估中心)
- 徐 娇(国家卫生健康委员会食品标准与监测评估司)
- 徐海滨(国家食品安全风险评估中心)
- 高志贤(军事科学院军事医学研究院)
- 郭云昌(国家食品安全风险评估中心)
- 郭丽霞(国家食品安全风险评估中心)
- 唐振柱(广西壮族自治区疾病预防控制中心)
- 黄 薇(深圳市疾病预防控制中心)
- 黄锁义(右江民族医学院药学院)
- 常凤启(河北省疾病预防控制中心)
- 崔生辉(中国食品药品检定研究院)
- 章 宇(浙江大学生物工程与食品学院)
- 章荣华(浙江省疾病预防控制中心)
- 梁进军(湖南省疾病预防控制中心)
- 程树军(广州海关技术中心)
- 傅武胜(福建省疾病预防控制中心)
- 谢剑炜(军事科学院军事医学研究院)
- 赖卫华(南昌大学食品学院)
- 裴晓方(四川大学华西公共卫生学院)
- 廖兴广(河南省疾病预防控制中心)
- 熊丽蓓(上海市疾病预防控制中心)
- 樊永祥(国家食品安全风险评估中心)