

# 加工方式对两种贝类中 8 种重金属元素 生物可及性的影响

张梅超\*, 冯立霞, 王楠

(威海市食品药品检验检测研究院, 威海 264200)

**摘要: 目的** 分析水煮和烘烤两种加工方式对两种贝类元素中 8 种金属元素生物可及性的影响。**方法** 采用体外模拟消化实验, 利用电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)分析牡蛎(*Crassostrea gigas*)和扇贝(*Azumapecten farreri*)体内 8 种元素(铁、砷、镉、铜、铁、锌、锰、汞)的生物可及性和含量的变化。**结果** 两种贝类元素含量的趋势大体一致, 从高到低依次为锌>铁>铜>镉>砷>铅>汞。两种贝类中生物可及性最高的是牡蛎中的砷元素, 为 98.4%。生物可及性最低的是扇贝中的铁元素, 为 3.4%。经过不同的加工方式处理后, 能显著提高两种贝类锰元素的生物可及性及显著降低牡蛎中铜、砷、铅元素的生物可及性。加热处理后扇贝中砷和镉元素的生物可及性增加。相较于蒸煮的加热方式, 烘烤的加工方式对贝类元素生物可及性的影响更大。通过相关性分析可以看出, 贝类元素生物可及性不仅与元素种类、加工方式相关, 也与其他元素浓度相关。**结论** 水煮和烘烤两种加工方式对贝类中 8 种重金属元素浓度和生物可及性影响较大。

**关键词:** 加工方式; 贝类; 元素; 生物可及性; 体外模拟消化

## Effects of processing methods on bioaccessibility of 8 kinds of heavy metals in 2 kinds of shellfish

ZHANG Mei-Chao\*, FENG Li-Xia, WANG Nan

(Weihai Institute for Food and Drug Control, Weihai 264200, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate the effects of cooking and baking on the bioaccessibility of 8 kinds of heavy metals in 2 kinds of shellfish. **Methods** The bioaccessibility and content of 8 kinds of mental elements (Pb, As, Cd, Cu, Fe, Zn, Mn and Hg) in *Crassostrea gigas* and *Azumapecten farreri* was analyzed by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) using *in vitro* simulated digestion experiment. **Results** The content of 8 kinds of mental elements in 2 kinds of shellfish generally decreased in the following order: Zn>Fe>Cu>Cd>As>Pb>Hg. The bioavailability of As in *Crassostrea gigas* was the highest of the 2 kinds of shellfish at 98.4% and the lowest was 3.4% of Fe in *Azumapecten farreri*. After different processing methods, the bioaccessibility of Mn in 2 kinds of shellfish was significantly improved, and the bioaccessibility of Cu, As and Pb in *Crassostrea gigas* was significantly reduced. The bioaccessibility of As and Cd in *Azumapecten farreri* increased after heating treatment. Compared with the heating method of cooking, the processing method of baking had a greater impact on the biological accessibility of shellfish elements. According to the correlation analysis, the bioaccessibility of shellfish elements was related not only to

\*通信作者: 张梅超, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 965361047@qq.com

\*Corresponding author: ZHANG Mei-Chao, Master, Engineer, Weihai Institute for Food and Drug Control, Chuangxin Road, Gaoxinjishu District, Weihai 264200, China. E-mail: 965361047@qq.com

element types and processing methods, but also to the concentration of other elements. **Conclusion** The 2 kinds of processing methods of cooking and baking has a great influence on the contents and bioaccessibility of 8 kinds of heavy metals in shellfish.

**KEY WORDS:** processing methods; shellfish; elements; bioaccessibility; *in vitro* simulated digestion

## 0 引言

贝类富含丰富的优质蛋白质、微量元素和不饱和脂肪酸等营养物质<sup>[1]</sup>, 味道鲜美, 是我国居民日常食用的海产品之一。我国是贝类消费大国, 也是养殖大国。2020 年我国海洋贝类养殖产量达 1480 万 t, 占全球总量 83.67%<sup>[2-3]</sup>。然而, 随着工业化的发展, 海水污染等情况日益加重, 贝类通过生物过滤作用对水体中浮游生物及颗粒有机物质进行吸附过滤时, 容易将海洋水体中的重金属等物质富集在体内, 最终通过生物链被人体消化吸收, 损害人类身体健康<sup>[4-5]</sup>。翟毓秀等<sup>[6]</sup>指出我国贝类中重金属、有机污染物、贝类毒素以及致病性有害微生物是主要的安全隐患, 需要有针对性进行监控和监管。近年来国内外有不少学者对贝类的重金属污染及食用安全性评价做出研究。例如杜瑞雪等<sup>[7]</sup>对山东沿岸经济贝类重金属含量进行分析时, 发现其体内的铬、铜含量超标且超标率分别是 100%和 25%。罗海军等<sup>[8]</sup>对菲律宾蛤仔进行铅、镉等重金属含量分析, 并对其进行安全性评价, 结果显示, 样品中无机砷超标率为 6%~10%之间, 污染指数为 0.71。TAPIA 等<sup>[9]</sup>发现, 3 种贝类中的铅含量明显高于联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)的限量值(2.0 mg/kg), 长期食用会对人体健康造成潜在伤害。

贝类重金属的风险研究如果仅限于重金属总量的分析, 可能会放大重金属对人体的危害, 不能全面地反映重金属毒性信息。生物可及性能够评价重金属在胃肠环境中可以溶出的比例, 相较于检测重金属总量能够更全面地评价基质中污染物能被人体有效吸收的相对量, 也是重金属污染物最大经口生物有效性的指示<sup>[10]</sup>。评价重金属的生物可及性主要利用体外模拟消化实验进行, 通过模拟人唾液、胃液、肠液和胆汁的化学成分、pH 并结合各阶段的消化时间和消化温度等参数来模拟人体消化的过程<sup>[11]</sup>, 这种实验方式较细胞实验来说更经济快捷, 是一种可重复测定食品中污染物生物可及性的有用工具<sup>[12]</sup>。近年来多位国内外学者采用体外模拟消化实验对金属元素的生物可及性进行了研究。LIAO 等<sup>[13]</sup>利用体外模拟实验分析了贝类中不同形态砷元素的生物可及性; CALATAYUD 等<sup>[14]</sup>利用体外模拟消化研究了贝类和鱼类中汞和硒元素的生物可及性; CAI 等<sup>[15]</sup>利用体外模拟实验研究了 3 种贝类中镉、铬、铜的生物可及性。目前的研究主要集中于未加工状态下的贝类重金属生物可及性的分析, 而对于加工烹饪方式对贝类重金属生物

可及性的影响鲜有研究, 且目前多项研究表明不同的加热处理方式会使元素的形态、浓度和生物可及性发生变化<sup>[16-20]</sup>。因此, 食品的加工处理方式对重金属生物可及性产生的影响, 在重金属的风险研究中需要作为重要因素进行研究。

因此, 本研究通过体外模拟消化实验, 以山东半岛产量较高且居民消费量较大的牡蛎(*Crassostrea gigas*)和扇贝(*Azumapecten farreri*)为原料, 探讨水煮和烘烤两种加工方式对两种贝类中铁、砷、镉、铜、铁、锌、锰、汞 8 种重金属含量和生物可及性的影响, 研究结果对评估其食用安全性和营养价值有重要意义, 同时也为重金属超标的不合格样品的日常市场监管提供新思路, 为贝类重金属的风险评价提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜太平洋牡蛎和栉孔扇贝均购自山东威海乳山某养殖区域。

淀粉酶、黏蛋白、胃蛋白酶、脂肪酶、胰液素、胆盐、牛血清蛋白、葡萄糖醛酸、盐酸葡萄糖胺、尿素、尿酸、葡萄糖(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司); 扇贝标准物质(GBW10024, 中国计量科学研究院); 硝酸(优级纯, 德国默克公司); 内标混合溶液(10 mg/L, 美国安捷伦公司); 多元素混合标准溶液(100 mg/L, 国家标准物质中心); 盐酸、硫酸钠、氯化钾、氯化钠、氢氧化钠、碳酸氢钠、磷酸二氢钾、磷酸二氢钠、氯化镁(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

AF-52 高效液相色谱串联原子荧光光谱仪(北京普析通用仪器有限责任公司); Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)(美国安捷伦公司); Mars6 微波消解仪(美国 CEM 公司); SQPPQUINTIX224-1 电子分析天平(精度 0.0001 g)、H<sub>2</sub>Opro-VF-T-TOC 超纯水机、Centrisart G-16C 离心机(德国赛多利斯集团); T25 均质机(德国艾卡公司); IS-RDS3C 恒温振荡器(美国精骐有限公司); BPG-9030AH 高温烤箱(上海环竞试验设备厂)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 原材料处理

将采购的扇贝和牡蛎加冰运回后, 清洗外壳后, 平均

分成 3 份,一份作为加工前样品,另两份按照居民常用的食用方式进行加工:(1)蒸煮,将扇贝和牡蛎放入蒸锅中,水沸后加热 5 min 后取出;(2)烘烤,将牡蛎和扇贝放入烤箱中,230℃烘烤 10 min 后取出。将上述处理过的 3 份样品去壳,放入均质机中打浆备用。

### 1.3.2 体外消化模拟实验

贝类重金属的生物可及性主要利用体外模拟消化液的方式进行。根据 HE 等<sup>[21]</sup>方法,通过 3 个步骤来模拟食物在人类唾液、胃液、肠液、胆汁中消化的过程。首先,称取不同处理的样品 4.5 g,放入锥形瓶中,加入 6 mL 模拟唾液,37℃恒温振荡 5 min。加入 12 mL 模拟胃液,37℃恒温振荡 2 h。最后加入 12 mL 模拟肠液和 6 mL 模拟胆汁,继续消化 2 h。消化结束后,2800×g 离心 5 min 取上清液,过滤后待上机分析。

### 1.3.3 重金属含量的检测

按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中规定的方法,称取 0.5~0.8 g 的样品于微波消解罐中,加入 7 mL 硝酸,加盖放入微波消解仪中。按照选定的消解程序进行微波消解,消解结束后取出,打开瓶盖置于赶酸仪中赶酸,待黄色烟雾消失后用超纯水定容。用电感耦合等离子体质谱仪测量消化液中铁、砷、镉、铜、铁、锌、锰、汞 8 种重金属含量。同时按照 GB 5009.11—2014《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》和 GB 5009.17—2021《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》的方法利用液相色谱串联原子荧光光谱仪测定样品中无机砷和甲基汞的含量。同时分别做标准物质(扇贝粉)质控实验和试剂空白实验。

### 1.3.4 数据处理

结果用 Microsoft Excel 2010 进行处理,数据采用平均值±标准偏差的形式表示。显著性和相关性分析采用 SPSS 13.0 进行分析, $P<0.05$  为差异性显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 两种贝类中重金属含量分析

通过检测扇贝粉标准物质中各元素的含量可以看出,扇贝粉标准物质的检测值皆在标示值的误差范围内,符合 GB/T 27404—2008《实验室质量控制规范 食品理化检测》的要求。未加工牡蛎中锰、铜、锌的含量显著高于扇贝中的含量( $P<0.05$ ),未加工扇贝中的铁、汞、砷、镉、铅的含量则显著高于牡蛎( $P<0.05$ )。说明相对于牡蛎,扇贝对铁、汞、砷、镉、铅这些元素的富集作用较强。另外,根据 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》和 NY 5073—2006《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》的要求,铅小于等于 1.5 mg/kg,镉小于等于 2.0 mg/kg,铜小于等于 50 mg/kg,无机砷小于等于 0.5 mg/kg,甲基汞小于等于 0.5 mg/kg(水产动物总汞和总砷超标时再测定甲基汞和无机砷),由表 1 可以看出,牡蛎中各元素均在标准限量范围内,而扇贝中镉的含量达到 3.28 mg/kg,超过标准中的最大允许含量。两种贝类中总砷的含量超出限量值(0.5 mg/kg),但是经过进一步检测无机砷,发现无机砷皆未检出。虽然扇贝和牡蛎各元素含量不同,但是重金属含量的趋势大体一致,从高到低依次为锌>铁>铜>镉>砷>铅>汞。这与俞佳伟等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。

表 1 2 种贝类重金属含量及标准物质检测值(mg/kg, n=3)  
Table 1 Heavy metal content in 2 kinds of marine shellfish and standards (mg/kg, n=3)

元素名称	牡蛎			扇贝			扇贝粉检测值	扇贝粉标示值
	未加工	蒸煮	烘烤	未加工	蒸煮	烘烤		
锰	4.12±0.06 <sup>CX</sup>	7.72±0.04 <sup>AX</sup>	5.71±0.02 <sup>BX</sup>	3.48±0.06 <sup>CY</sup>	3.95±0.06 <sup>AY</sup>	4.39±0.06 <sup>BY</sup>	18.3	19.2±1.2
铁	26.3±0.04 <sup>CX</sup>	53.8±0.06 <sup>AX</sup>	47.5±0.08 <sup>BX</sup>	40.5±0.05 <sup>CY</sup>	38.5±0.10 <sup>AY</sup>	40.1±0.09 <sup>CY</sup>	37.4	41±5
汞	0.00357±0.001 <sup>BX</sup>	0.00821±0.002 <sup>AX</sup>	0.00853±0.003 <sup>AX</sup>	0.0207±0.001 <sup>BY</sup>	0.0201±0.001 <sup>BY</sup>	0.0254±0.002 <sup>BY</sup>	0.0381	0.04±0.007
铜	25.4±0.06 <sup>CX</sup>	56.8±0.08 <sup>AX</sup>	47.3±0.09 <sup>BX</sup>	3.58±0.02 <sup>CY</sup>	3.67±0.04 <sup>BY</sup>	3.99±0.02 <sup>AY</sup>	1.20	1.34±0.18
锌	82.7±0.04 <sup>CX</sup>	148±0.05 <sup>AX</sup>	124±0.03 <sup>BX</sup>	46.4±0.10 <sup>CY</sup>	52.1±0.06 <sup>BY</sup>	65.9±0.06 <sup>AY</sup>	73.5	75±3
砷	0.468±0.01 <sup>CX</sup>	1.03±0.04 <sup>BX</sup>	0.871±0.01 <sup>AX</sup>	1.33±0.01 <sup>BY</sup>	1.14±0.01 <sup>CY</sup>	1.42±0.01 <sup>AY</sup>	3.2	3.6±0.6
镉	0.686±0.007 <sup>BX</sup>	1.39±0.032 <sup>AX</sup>	1.36±0.015 <sup>AX</sup>	3.28±0.008 <sup>AY</sup>	2.73±0.004 <sup>CY</sup>	3.04±0.012 <sup>BY</sup>	1.03	1.06±0.10
铅	0.0536±0.001 <sup>BX</sup>	0.0815±0.002 <sup>AX</sup>	0.0836±0.001 <sup>AX</sup>	0.108±0.005 <sup>BY</sup>	0.101±0.005 <sup>BY</sup>	0.145±0.001 <sup>AY</sup>	0.11	0.12
无机砷	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	/	/

注: N.A 表示低于方法检出限; / 表示标准物质中没有无机砷; 相同物种不同烹饪方式的存在显著性差异用 A~C 表示, 不同物种相同烹饪方式间存在显著性差异用 X~Z 表示。 $P<0.05$  为差异性显著, 下同。

## 2.2 不同加工方式对两种贝类重金属含量的影响

牡蛎和扇贝经过不同加工处理后各个重金属元素含量的变化情况如表 1 所示。经过蒸煮加热, 牡蛎中各元素含量皆有显著增加( $P<0.05$ ), 增加幅度为 52%~129%之间。其中铜含量增加最明显, 达到 124%。铅含量增加最少, 为 52%。牡蛎经过高温烘烤后, 各元素含量也有显著增加( $P<0.05$ ), 但是锰、铁、铜、锌、砷 5 种元素含量相对于蒸煮的加工方式变化较小, 增加幅度为 38%~98%之间。扇贝经过蒸煮加热后, 锰、汞、铅等元素含量变化不显著( $P>0.05$ ), 铁、砷、镉等元素含量分别下降了 4.9%、14.3%、16.8%。锌含量增加了 12.3%。烘烤后的扇贝中铁、汞变化不显著( $P>0.05$ ), 锰、铜、锌、砷、铅分别增加了 26.1%、15.9%、42.1%、6.8%和 34.2%。

通过上述分析可以发现, 不同加工方式对不同金属元素的影响趋势不同, 不同种类的贝类其元素含量变化也不一样。这可能和加工温度、加工时间、元素形态和元素浓度相关。与加工前元素含量相比, 不管是蒸煮还是烘烤的加热方式, 两种贝类中的元素含量皆有提高, 而不是随着水分的流失而减少, 分析原因可能由于加热过程中水分蒸发, 一些挥发性物质损失和蛋白质、脂类在加热过程中流失, 造成干物质相对减少, 从而使得金属元素含量上升<sup>[23]</sup>。相对于蒸煮的加工模式, 两种贝类经过高温烘烤后的元素含量降低, 溶出率较高。可能由于金属元素通常与蛋白相结合, 而烘烤加热这种高温烹饪方式容易造成金属元素与蛋白质分解。PERELLÓ 等<sup>[24]</sup>研究加热处理对贻贝中重金属含量的影响时也发现同样的现象。

## 2.3 不同加工方式对两种贝类重金属生物可及性的影响

两种贝类经过蒸煮和烘烤后, 分别测定其未加工状态和加工后的生物可及性, 结果如表 2 所示, 未加工的两种贝类元素的生物可及性从 3.4%到 98.4%不等。其中生物

可及性最高的是牡蛎中的砷元素, 为 98.4%。生物可及性最低的是扇贝中的铁元素, 为 3.4%。两种贝类中各个元素的生物可及性除了锌和铅元素, 牡蛎中各元素的生物可及性皆显著高于扇贝体内的元素( $P<0.05$ )。对于牡蛎来说, 生物可及性最高的是砷元素, 最低的是锌元素。而扇贝中生物可及性最高的是铅元素, 最低的是铁元素。铁和锌元素相对于其他元素在两种贝类中生物可及性都是比较低的。HE 等<sup>[21]</sup>在研究两种鱼类的生物可及性时, 也得出相同的结论。烘烤和蒸煮两种加工方式能显著提高两种贝类锰元素的生物可及性, 提高率在 1.7%~62.2%之间。但是能降低牡蛎中铜、砷、铅元素的生物可及性, 下降率分别为 7.7%~18.8%、2.6%~13.8%、4.9%~6.5%。对于扇贝来说, 加热处理后会增加砷和镉元素的生物可及性, 而对其他元素则无显著性影响。这与牡蛎的规律不同。

不同加工方式对贝类不同元素的生物可及性的影响不同。这是由于不同的加热方式, 加速了蛋白质的分解, 使得组织中水分和可溶性成分损失, 从而影响元素的生物可及性。AMIARD 等<sup>[25]</sup>在研究贝类金属元素生物可及性时发现, 烹饪会使镉、铜和锌的生物可及性减少。MAULVAULT 等<sup>[26]</sup>研究了不同烹饪方式对带鱼和螃蟹中汞和镉的生物可及性的影响, 结果表明, 烤、蒸和炸 3 种烹饪方式使食物中汞和镉的生物可及性降低。本研究中, 两种烹饪方式会使大部分元素的生物可及性下降。分析原因可能一方面烹饪处理会使贝类肌肉组织中的蛋白质变性, 使得组织变得更加坚硬和紧缩。另一方面, 加热也会导致二硫键结合蛋白质的生成, 使得蛋白质更加难以消化<sup>[27-28]</sup>。通过对表 2 的分析也可以看出, 相对于蒸煮的加热方式, 烘烤对各个元素的生物可及性影响更显著。可能由于相较于蒸煮, 烘烤的烹饪模式下温度更高, 使得组织中水分流失的更多, 这种更剧烈的加热条件也会导致紧密卷曲的肽链展开形成大的不溶性聚合物<sup>[29]</sup>。

表 2 贝类中生物可及性分析(% ,  $n=3$ )  
Table 2 Analysis of bioaccessibility in shellfish (% ,  $n=3$ )

元素	牡蛎			扇贝		
	未加工	蒸煮	烘烤	未加工	蒸煮	烘烤
锰	71.2±8 <sup>AX</sup>	72.4±7 <sup>BX</sup>	72.6±5 <sup>BX</sup>	41.0±3 <sup>BY</sup>	66.5±5 <sup>AX</sup>	70.5±3 <sup>AX</sup>
铁	57.3±4 <sup>BX</sup>	52.5±3 <sup>BX</sup>	65.3±4 <sup>AX</sup>	3.4±0.5 <sup>AY</sup>	4.8±0.5 <sup>AY</sup>	3.7±0.3 <sup>AY</sup>
汞	63.3±3 <sup>BX</sup>	53.4±4 <sup>BX</sup>	49.7±2 <sup>AX</sup>	50.5±6 <sup>AY</sup>	54.2±6 <sup>AX</sup>	61.4±8 <sup>AY</sup>
铜	90.3±7 <sup>CX</sup>	83.3±2 <sup>BX</sup>	73.3±2 <sup>AX</sup>	58.4±5 <sup>AY</sup>	38.4±4 <sup>BY</sup>	35.4±6 <sup>BY</sup>
锌	20.4±2.2 <sup>AX</sup>	17.3±2.7 <sup>BX</sup>	17.9±1.3 <sup>BX</sup>	18.0±1.6 <sup>AX</sup>	24.3±1.3 <sup>AY</sup>	31.1±1.6 <sup>AY</sup>
砷	98.4±3 <sup>AX</sup>	95.8±1 <sup>BX</sup>	84.8±2 <sup>CX</sup>	49.4±6 <sup>BY</sup>	67.8±5 <sup>AY</sup>	63.7±5 <sup>ABY</sup>
镉	32.0±3 <sup>AX</sup>	24.3±3 <sup>BX</sup>	18.1±4 <sup>CX</sup>	16.3±3 <sup>BY</sup>	23.8±4 <sup>ABX</sup>	23.4±8 <sup>AX</sup>
铅	80.4±4 <sup>AX</sup>	75.2±3 <sup>BX</sup>	76.5±3 <sup>BX</sup>	77.3±5 <sup>AX</sup>	70.1±4 <sup>AX</sup>	71.8±4 <sup>AX</sup>

## 2.4 不同元素浓度和生物可及性相关性分析

扇贝中不同元素浓度和生物可及性之间的相关性分析如表 3 所示,铜的生物可及性与铁的浓度之间存在显著正相关( $P<0.01$ )。铁的生物可及性和铁的浓度之间存在显著负相关性( $P<0.05$ )。

牡蛎中不同元素浓度和生物可及性之间的相关性分析如表 4 所示。牡蛎中锰的生物可及性和汞的浓度、锌的生物可及性和锰的浓度之间存在显著正相关性( $P<0.01$ ),锰的生物可及性与镉的浓度存在显著负相关性( $P<0.01$ ),砷的生物可及性和汞的浓度、铜的生物可及性和汞的浓度之间存在显著负相关( $P<0.05$ )。铜的生物可及性和镉的浓度、砷的生物可及性与镉的浓度之间存在显著正相关性( $P<0.05$ )。目前关于贝类中元素浓度与生物可及性之间的相关性研究较少,宋佳芳等<sup>[23]</sup>研究加工方式对牡蛎生物可及性影响时发现,锌的生物可及性与铜和铅的浓度存在显著相关性( $P<0.01$ )。GUNGOR 等<sup>[30]</sup>研究发现红鲷鱼砷和铜的生物可及性与总元素浓度呈正相关性。通过上述分析可

以得出,元素生物可及性不仅与元素种类、基质、加工方式相关,也与其他元素浓度相关。

## 3 讨论与结论

本研究通过利用电感耦合等离子体质谱仪分析牡蛎和扇贝组织中元素含量发现,不同种类的贝类对不同元素的吸附能力不同,其中牡蛎中锰、铜、锌的含量高于扇贝中的含量。两种贝类中虽然砷含量较高,但均未检出无机砷。扇贝和牡蛎各元素含量虽然有差别,但是重金属含量的趋势大体一致,从高到低依次为锌>铁>铜>镉>砷>铅>汞。两种贝类经过蒸煮和烘烤后,与加工前元素含量相比,不管是蒸煮还是烘烤的加热方式,两种贝类中的多数元素含量皆有提高。但是扇贝中铁、砷、镉等元素含量则有所下降。采用体外模拟消化实验评价蒸煮和烘烤两种加工方式对牡蛎和扇贝组织中 8 种元素生物可及性的影响,结果发现,加热处理能显著提高两种贝类锰元素的生物可及性,但是能显著降低牡蛎中铜、砷、铅元素的生物可及性。其

表 3 扇贝中生物可及性与浓度相关性分析( $n=3$ )  
Table 3 Correlation analysis of bioaccessibility and concentration in *Azumapecten farreri* ( $n=3$ )

指标	生物可及性								
	锰	铁	汞	铜	锌	砷	镉	铅	
总浓度	锰	0.930	0.226	0.910	-0.162	0.999*	0.758	0.853	0.975
	铁	-0.510	-0.998*	-0.554	1.000**	-0.115	-0.765	-0.651	-0.377
	汞	0.519	-0.410	0.474	0.469	0.822	0.209	0.364	0.640
	铜	0.756	-0.110	0.722	0.175	0.957	0.499	0.633	0.845
	锌	0.807	-0.029	0.775	0.094	0.978	0.568	0.693	0.886
	砷	-0.057	-0.854	-0.108	0.887	0.355	-0.382	-0.228	0.092
	镉	-0.754	-0.969	-0.786	0.951	-0.420	-0.928	-0.855	-0.647
	铅	0.478	-0.452	0.432	0.510	0.795	0.163	0.320	0.603

注: \*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,下同。

表 4 牡蛎中生物可及性与浓度相关性分析( $n=3$ )  
Table 4 Correlation analysis of bioaccessibility and concentration in *Crassostrea gigas* ( $n=3$ )

指标	生物可及性								
	锰	铁	汞	铜	锌	砷	镉	铅	
总浓度	锰	0.041	-0.935	0.335	0.040	1.000**	-0.010	-0.472	-0.404
	铁	0.663	-0.500	-0.336	-0.601	0.780	-0.640	0.192	-0.891
	汞	1.000**	0.321	-0.930	-0.997*	0.045	-1.000*	0.864	-0.929
	铜	0.521	-0.644	-0.165	-0.451	0.878	-0.495	0.016	-0.797
	锌	0.021	-0.942	0.354	0.060	1.000*	0.010	-0.490	-0.385
	砷	0.396	-0.745	-0.025	-0.321	0.937	-0.368	-0.125	-0.705
	镉	-1.000**	-0.324	0.930	0.997*	-0.042	1.000*	-0.865	0.928
	铅	-0.957	-0.027	0.779	0.930	-0.338	0.947	-0.677	0.997

他元素则无显著性变化。对于扇贝来说, 加热处理后会增加砷和镉元素的生物可及性, 而对其他元素则无显著性影响。这与牡蛎的规律不同。相较于蒸煮的加热方式, 烘烤的加工方式对贝类元素生物可及性的影响更大。通过元素浓度和生物可及性相关性分析, 得出贝类元素生物可及性不仅与元素种类、载体、加工方式相关, 也与其他元素浓度相关。下一步, 可以结合中国居民日常烹饪水产品的习惯, 研究不同调味料对元素生物可及性的影响。同时结合生物质量指数和靶标危害系数等指标<sup>[31]</sup>对贝类的不同加工方式的食用风险进行评估, 从而更深入的评价加工方式对贝类的安全性影响。

### 参考文献

- [1] 张硕, 高世科, 张虎, 等. 海州湾海洋牧场拖网渔获物营养级分析[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(4): 132–138.  
ZHANG S, GAO SK, ZHANG H, *et al.* Time-scale variation and trophic level analysis of stab [J]. J Guangdong Ocean Univ, 2020, 40(4): 132–138.
- [2] 姜朝军. 我国贝类加工产业存在的主要问题与发展对策[J]. 渔业信息与战略, 2012, 27(2): 87–93.  
JIANG CJ. Major problems and solutions of the shellfish procession in China [J]. Fish Inform Strat, 2012, 27(2): 87–93.
- [3] 白志毅, 温鹏超, 袁立, 等. 我国淡水贝类种质资源现状与保护利用[J]. 水产学报, 2022, 46(1): 149–157.  
BAI ZY, WEN PC, YUAN L, *et al.* Germplasm resources situation and protection and utilization of freshwater molluscs in China [J]. J Fish China, 2022, 46(1): 149–157.
- [4] 阙华勇, 张国范. 我国贝类产业技术的现状与发展趋势[J]. 海洋科学集刊, 2016, 11(51): 69–76.  
QUE HY, ZHANG GF. Present situation and development trend of shellfish industry technology in China [J]. Stud Mar Sin, 2016, 11(51): 69–76.
- [5] 隋茜茜, 余金橙, 朱金艳, 等. 秦皇岛海域食用贝类重金属污染情况分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 196–200.  
SUI XX, YU JC, ZHU JY, *et al.* Analysis on heavy metal pollution of edible shellfish in Qinhuangdao sea area [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(10): 196–200.
- [6] 翟毓秀, 郭萌萌, 江艳华, 等. 贝类产品质量安全风险分析[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(4): 1–25.  
ZHAI YX, GUO MM, JIANG YH, *et al.* Analysis on the quality and safety risks of shellfish products [J]. Chin Fish Qual Stand, 2020, 10(4): 1–25.
- [7] 杜瑞雪, 范仲学, 魏爱丽, 等. 山东沿岸经济贝类体内重金属含量分析[J]. 山东农业科学, 2009, (8): 58–63.  
DU RX, FAN ZX, WEI AIL, *et al.* Content analysis of heavy metal in economic shell fish from Shandong coast [J]. Shandong Agric Sci, 2009, (8): 58–63.
- [8] 罗海军, 吴益春, 宋洪强, 等. 菲律宾蛤仔中铅、镉、汞、无机砷的含量分析及食用安全性评价[J]. 食品科学, 2015, 36(4): 184–192.  
LUO HJ, WU YC, SONG HQ, *et al.* Analysis and safety evaluation of lead, cadmium, mercury and inorganic arsenic in *Ruditapes philippinarum* [J]. Food Sci, 2015, 36(4): 184–192.
- [9] TAPIA J, BERTRAN C, ARAYA C, *et al.* Study of the copper, chromium and lead content in *Mugil cephalus* and *Eleginops maclovinus* obtained in the mouths of the Maule and Mataquito rivers [J]. J Chill Chem Soc, 2009, 54(8): 36–46.
- [10] LIU Y, LI Y, KE Y, *et al.* Processing of four different cooking methods of *Oudemansiella radicata*: Effects on *in vitro* bioaccessibility of nutrients and antioxidant activity [J]. Food Chem, 2021, 337(8): 128007.
- [11] HAO J, HE Y, HU X, *et al.* Bioaccessibility evaluation of pharmaceuticals in market fish with *in vitro* simulated digestion [J]. J Hazard Mater, 2021, 411(1): 125039–125048.
- [12] CHITCHUMROONCHOKCHAI C, SCHWARTZ SJ, FAILLA ML. *et al.* Assessment of lutein bioavailability from meals and a supplement using simulated digestion and Caco-2 human intestinal cells [J]. J Nutr, 2004, 8(45): 134–147.
- [13] LIAO W, WANG G, LI K, *et al.* Change of arsenic speciation in shellfish after cooking and gastrointestinal digestion [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(29): 7805–7814.
- [14] CALATAYUD M, DEVESA V, VIRSEDA JR, *et al.* Mercury and selenium in fish and shellfish: Occurrence, bioaccessibility and uptake by Caco-2 cells [J]. Food Chem Toxicol, 2012, 50(8): 2696–2702.
- [15] CAI Y, ZHOU Y, WU XY, *et al.* Situation of heavy metal pollution and food risk assessment of 3 kinds of marine shellfish [J]. J Nucl Agric Sci, 2016, 30(6): 1126–1134.
- [16] 赵艳芳, 尚德荣, 康绪明, 等. 基于体外全仿生消化模型分析海带和紫菜中微量元素的生物可给性[J]. 中国食品学报, 2021, (2): 289–298.  
ZHAO YF, SHANG DR, KANG XM, *et al.* Bioaccessibility of trace metals in *Laminaria japonica* and *Porphyra yezoensis* using *in vitro* digestion model [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, (2): 289–298.
- [17] 李九九, 赵成仕, 汪光军, 等. 九华黄精 9 蒸 9 晒加工过程中重金属含量的变化及安全性[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(19): 6862–6866.  
LI JJ, ZHAO CS, WANG GJ, *et al.* Changes and safety of heavy metals content in *Polygonatum cyrtoneuma* Hua in Jiuhua mountain during nine times steamed and sun-bathed processing [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(19): 6862–6866.
- [18] MOHAPATEA D, PATELAS, KAR A, *et al.* Effect of different processing conditions on essential minerals and heavy metal composition of sorghum grain [J]. J Food Process Pres, 2020, 1(45): 14909–14917.
- [19] ABU-ALMAALY RA. Effect of cooking method on the content of heavy metals in rice available in local market [J]. Plant Arch, 2020, 20(2): 2976–2981.
- [20] DEVESA V, MARTÍNEZ A, SÚÑER MA, *et al.* Effect of cooking temperatures on chemical changes in species of organic arsenic in seafood [J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(5): 2272–2276.

- [21] HE M, KE CH, WANG WX. Effects of cooking and subcellular distribution on the bioaccessibility of trace elements in two marine fish species [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(6): 3517–3523.
- [22] 俞佳伟, 孙华明, 陆菁菁, 等. 水煮加工对 3 种海产贝类中重金属元素形态的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 162–166.  
YU JW, SUN HM, LU JJ, *et al*. Effects of boiling on metal speciation in three marine shellfish [J]. *Food Sci*, 2016, 37(20): 162–166.
- [23] 宋佳芳, 柯可, 李高平, 等. 2 种加工方式对牡蛎中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 元素生物利用度影响[J]. *食品工业*, 2019, (3): 100–103.  
SONG JF, KE K, LI GP, *et al*. Effect of 2 kinds of cooking methods on bioaccessibility of Pb, Cd, Cu and Zn in oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. *Food Ind*, 2019, (3): 100–103.
- [24] PERELLÓ G, MARTÍ-CID R, LLOBET JM, *et al*. Effects of various cooking processes on the concentrations of arsenic, cadmium, mercury, and lead in foods [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(23): 11262–11269.
- [25] AMIARD JC, AMIARD-TRIQUET C, CHARBONNIER L, *et al*. Bioaccessibility of essential and non-essential metals in commercial shellfish from western Europe and Asia [J]. *Food Chem Toxicol*, 2008, 46(6): 2010–2022.
- [26] MAULVAULT AL, MACHADO R, AFONSO C, *et al*. Bioaccessibility of Hg, Cd and As in cooked black scabbard fish and edible crab [J]. *Food Chem Toxicol*, 2011, 49(11): 2808–2815.
- [27] KULP KS, FORTSON SL, KNIZE MG, *et al*. An *in vitro* model system to predict the bioaccessibility of heterocyclic amines from a cooked meat matrix [J]. *Food Chem Toxicol*, 2003, 41(12): 1701–1710.
- [28] DUODU KG, NUNES A, DELGADILLO I, *et al*. Effect of grain structure and cooking on sorghum and maize *in vitro* protein digestibility [J]. *J Cereal Sci*, 2002, 35(2): 161–174.
- [29] 王雅卉, 邢霁云, 徐婧婷, 等. 高温热处理对大豆蛋白消化利用效果的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(15): 92–99.  
WANG YH, XING QY, XU JT, *et al*. Effect of high-temperature heat treatment on digestibility of soybean protein [J]. *Food Sci*, 2019, 40(15): 92–99.
- [30] GUNGOR A, KARA D. Investigation of seasonal and cooking effects on the bioaccessibility of elements in most consumed fish in turkey [J]. *Turk J Fish Aquat Sci*, 2020, 20(5): 105–119.
- [31] 刘冰, 王怡, 朱艳杰, 等. 膳食摄入水产品中重金属的风险评估[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(7): 267–275.  
LIU B, WANG Y, ZHU YJ, *et al*. Risk assessment about the diary intake of heavy metals in aquatic products [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(7): 267–275.

(责任编辑: 黄周梅 张晓寒)

## 作者简介



张梅超, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。  
E-mail: 965361047@qq.com