

## 研究报告

## 海鱼中5种形态有害元素在不同烹调方式下的加工系数研究

曹佩<sup>1</sup>, 陈子慧<sup>2</sup>, 毛伟峰<sup>1</sup>, 黄芮<sup>2</sup>, 周萍萍<sup>1</sup>, 王萍<sup>2</sup>, 包汇慧<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>

(1. 国家食品安全风险评估中心 中国医学科学院创新单元, 北京 100022;

2. 广东省公共卫生研究院, 广东 广州 511430)

**摘要:**目的 研究我国广东省主要海产鱼类在不同典型烹调加工方式下5种有害元素的加工系数,为提升我国食品安全风险评估结果的精确性提供评估参数。方法 基于广东省2个沿海地区居民常消费的19种海产鱼类,随机采样处理后分为清蒸组、油煎组、烘烤组和1个对照组(未烹调组),检测其总汞、甲基汞、总砷、镉、铅在烹调处理前后浓度的变化,并分别计算每种海鱼中总汞等5种形态有害元素的加工系数。结果 油煎和烘烤处理后海鱼中总汞、甲基汞、总砷、镉的浓度显著高于未烹调组( $P<0.05$ ),而清蒸后海鱼中铅的浓度显著低于未烹调组( $P<0.05$ )。此外不同种类海鱼,相同烹调方式下其有害元素的加工系数存在一定差异,煎和烤的加工方式下海鱼中重金属的加工系数高于清蒸方式。结论 海鱼中总汞、甲基汞、总砷、镉和铅的浓度经过烹调加工后可发生显著变化。风险评估时,应结合评估情形需要,选择合适的加工系数提高风险评估精确度。

**关键词:**加工系数;海鱼;重金属;风险评估

中图分类号:R155

文献标识码:A

文章编号:1004-8456(2022)05-0896-06

DOI:10.13590/j.cjfh.2022.05.006

## Study of cooking coefficient of five toxic metals in marine fish in China

CAO Pei<sup>1</sup>, CHEN Zihui<sup>2</sup>, MAO Weifeng<sup>1</sup>, HUANG Rui<sup>2</sup>, ZHOU Pingping<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>2</sup>,BAO Huihui<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Medical Science Research Unit, China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China; 2. Guangdong Provincial Institute of Public Health, Guangdong Guangzhou 511430, China)

**Abstract: Objective** To provide data basis for improving the accuracy of food safety risk assessment in China, the cooking coefficients of five toxic metals in marine fish was studied. **Methods** Based on the consumption of 19 kinds of marine fish in Guangdong province, samples were divided into steamed, fried, roasted group and a control group (raw fish). The concentrations of the total mercury, methyl mercury, arsenic, cadmium and lead were determined before and after the cooking process, and the cooking coefficients of five toxic metals were calculated. **Results** The concentrations of total mercury, methyl mercury, total arsenic and cadmium in fried and roasted fish were significantly higher than those in control group ( $P<0.05$ ), while the concentrations of lead in steamed fish were significantly lower than those in control group ( $P<0.05$ ). In addition, the cooking coefficients of heavy metals in different kinds of marine fish were different under the same cooking method, and the coefficients of heavy metals in the fried and roasted group were higher than those in the steamed group. **Conclusion** The concentrations of total mercury, methyl mercury, total arsenic, cadmium and lead in marine fish can change significantly after cooking. During risk assessment, appropriate processing factors should be selected to improve the accuracy of risk assessment in combination with the needs of the assessment situation.

**Key words:** Cooking coefficients; marine fish; metals; risk assessment

收稿日期:2022-08-08

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1606500);中国医学科学院创新工程食品安全单元项目(2019-12M-5-024)

作者简介:曹佩 女 博士 研究方向为食品安全风险评估 E-mail:caopei@cfsa.net.cn

陈子慧 女 博士 研究方向为营养与食品卫生 E-mail:chenzh@gdiph.org.cn(共同第一作者)

通信作者:张磊 男 研究员 研究方向为食品安全风险评估 E-mail:zhanglei@cfsa.net.cn

我国水产资源丰富,海产品的产量和需求量倍增,成为我国居民重要的营养与能量来源。近年来,随着沿海工业发展,工业和生活排放导致海洋污染日益严重,尤其是重金属污染较为突出<sup>[1]</sup>。研究显示,水产品是人类膳食暴露重金属的主要食物来源,尤其是汞元素,日本消费者曾因食用受甲基汞污染的鱼类导致水俣病<sup>[2]</sup>。此外,我国沿海神、铅、镉等污染亦较为明显,对人类健康造成风险<sup>[3-5]</sup>。

有研究对我国消费人群通过食用海产品重金属暴露展开风险评估,但在风险评估过程中均未考虑海产品中重金属的加工系数,因此对评估结果可能产生一定的不确定性<sup>[6-8]</sup>。国外研究者曾开展过不同烹调方式对海产品中重金属浓度影响的研究,如 ERSOY 等<sup>[9]</sup>对不同烹饪方式(烧烤、微波加热、煎炸等)下非洲鲶鱼中铅、镉、汞等重金属含量进行研究,结果表明不同烹饪方式对海产品中重金属浓度具有影响。此外,西班牙研究者发现鱼类(沙丁鱼、鳀鱼和金枪鱼)蒸煮后,铅、砷、汞的浓度有明显增加趋势<sup>[10]</sup>。中国居民食物的烹调加工方式与国外存在一定差异,但目前我国在这方面的研究较少,亟需补充这方面的研究数据。

基于广东省常见海鱼,本研究重点开展此类食物中铅、镉、总砷、总汞和甲基汞5种形态有害元素经过不同烹调加工后其加工系数的研究,以期为提升我国食品安全风险评估结果的精确性提供评估参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

选择广州市以供应当地居民为主的大型水产品贸易市场、批发市场等,随机抽取水产贩卖摊点,以广东省居民常见且日常食用较多的海水鱼种类进行采样,样品类别包括海鳗、黑棘鲷、四指马鲛、金线鱼、小带鱼、多鳞鱚、双线舌鲷、真鲷、卵圆鲳鲈、黄鳍鲷、棕点石斑鱼、银鲳鱼共计12种海产鱼类(表1)。每种海鱼采集3份,需来自3个不同摊位,每份海鱼样品重量 $\geq 3$  kg。采样过程严格按照要求操作,样品采集完成后当天及时送回实验室,冷库中(4℃条件下)保存,确保1个月内完成检测。

### 1.2 样品制备

采集的样品进行宰杀,去除鳞片和内脏,冲洗后用纱布擦去表面水分,每份样品分成3组,分别为清蒸组、油煎组、烘烤组,每组样品分成2等份(采用纵向左右对半分切),每份约500 g,分别为对照组和处理组,称重并记录;对照组生样经称重后,取可食部匀浆并装样。

表1 海水鱼样品的基本信息

Table 1 Basic information of sea fish samples

中文学名	拉丁文学名	别名	食性
海鳗	<i>Muraenesoxcinereus</i>	海鳗、麻鱼	肉食性
双线舌鲷	<i>Cynoglossus abbreviatus</i>	龙利鱼、比目鱼	肉食性
真鲷	<i>Pagrus major</i>	红立、红鱼	肉食性
黑棘鲷	<i>Acanthopagrus schlegelii</i>	黑立	杂食性
卵圆鲳鲈	<i>Trachinotus ovatus</i>	金鲳	肉食性
四指马鲛	<i>Eleutheronematetractylum</i>	四指马鲛、马友	肉食性
黄鳍鲷	<i>Acanthopagrus latus</i>	黄立	杂食性
金线鱼	<i>Nemipterus virgatus</i>	金线鱼、红三文	肉食性
棕点石斑鱼	<i>Epinephelus fuscoguttatus</i>	石斑、老虎斑	肉食性
小带鱼	<i>Eupleurogrammus muticus</i>	带鱼	肉食性
银鲳	<i>Pampus argenteus</i>	白仓	肉食性
多鳞鱚	<i>Sillago sihama</i>	沙尖鱼	肉食性

根据广东省居民膳食消费量调查中获得当地居民食用鱼类常见的烹调加工方法,对样品进行烹调处理,包括清蒸、烘烤和油煎。清蒸组样品采用隔水蒸的方式;烘烤则选用家用电烤箱;油煎选用调和油(记录用油量,油不可重复使用),且结束后将鱼放在垫有吸油纸的盘中。所有烹调加工过程均记录样品熟制的实际时间和烹调结束时样品的中心温度。

### 1.3 样品检测

水产样品中总汞含量的测定采用DMA-80直接测汞仪。甲基汞含量的测定是参照《食品安全国家标准食品中总汞及有机汞的测定》(GB 5009.17—2021)要求,采用高效液相色谱-原子荧光结合法(High performance liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry, HPLC-AFS)测定水产样品中甲基汞的含量<sup>[11]</sup>。镉、铅和总砷的测定参照《食品安全国家标准食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016),采用电感耦合等离子体质谱法(Inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)进行检测。水产样品中无机砷含量的测定采用液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用仪<sup>[12]</sup>。

### 1.4 加工系数计算

本研究中加工系数包括两种形式,一种为每一个海鱼样品经烹调加工后有害元素浓度与未烹调前有害元素浓度的比值,根据公式(1)进行计算。

$$PF_1 = \frac{C_d}{C} \quad \text{式(1)}$$

其中: $PF_1$ 表示海鱼样品的加工前后浓度比值, $C_d$ 表示样品烹调处理后有害元素的浓度, $C$ 表示样品烹调处理前有害元素的浓度。

另一种为考虑到水分的影响,以原料质量计的有害元素变化量,即海鱼样品烹调加工后有害元素的质量与烹调加工前有害元素的质量的比值,根据公式(2)进行计算。

$$PF_2 = \frac{M_d \times C_d}{M \times C} \quad \text{式(2)}$$

其中： $PF_2$ 表示海鱼样品的加工前后有害元素质量比值， $M_d$ 表示样品烹调加工后的质量， $C_d$ 表示样品烹调处理后有害元素的浓度， $M$ 表示样品烹调加工前的质量， $C$ 表示样品烹调处理前有害元素的浓度。

根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)全球环境监测系统/食品污染监测与评估规划(Global environmental monitoring system/Food, GEMS/Food)第二次会议上提出的“食品中低水平污染物可信评价”原则对样品中总汞、甲基汞、总砷、铅、镉的未检出值进行处理<sup>[13]</sup>。本研究根据“最坏情况”假设海鱼中总汞、甲基汞、总砷、铅、镉的未检出值按照 LOD 进行统计。

### 1.5 统计学分析

利用 SPSS 20.0 统计软件进行数据分析。采用平均数±标准差形式描述样品中重金属的含量，由

于样品中重金属含量数据不服从正态分布，所以采用 Wilcoxon 秩和检验比较各种烹调处理前后样品中有害元素的含量变化， $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 不同烹调加工方式对海鱼样品中主要有害元素浓度的影响

经过不同烹调方式(煮、煎和烤)，19种海鱼中主要有害元素含量见表2。由表2可见，海鱼中总汞经蒸、煎和烤三种烹调处理后其浓度与对照组相比均显著升高( $P < 0.05$ )；海鱼中甲基汞、总砷和镉经煎和烤处理后其浓度显著高于对照组( $P < 0.05$ )；海鱼中铅经蒸制后其含量显著高于对照组( $P < 0.05$ )。三种烹调加工方式中，油煎和烧烤处理后海鱼中除了铅以外其他有害元素的浓度均显著增高(图1)。

表2 烹调前后海鱼中主要有害元素浓度分析(μg/kg)

Table 2 Concentration analysis of main harmful elements in sea fish before and after cooking (μg/kg)

有害元素	样本量	清蒸		油煎		烘烤	
		对照组	处理组	对照组	处理组	对照组	处理组
总汞	35	64±60	71.6±62.7*	63.3±60.7	78.3±71.3*	55.6±46.1	76.7±64.2*
甲基汞	35	63.5±59.2	70.2±61.9	61.5±58.8	76±66.7*	57.8±44.3	77.6±63.1*
总砷	35	2 545.4±3 467.4	2 515±3 637.3	2 390.9±2 934.5	2 961.7±3 506.5*	2 312.5±2 846.3	2 807.1±3 734.9*
铅	35	66.7±136.2	30.2±78.2*	49.4±100.3	32.1±68.9	31.1±58.2	56.7±117.2
镉	35	7.8±13.7	9.3±15.4	5.0±9.1	9.2±12*	4.4±6.4	10.2±12.5*

注：\*表示  $P < 0.05$ ，差异显著

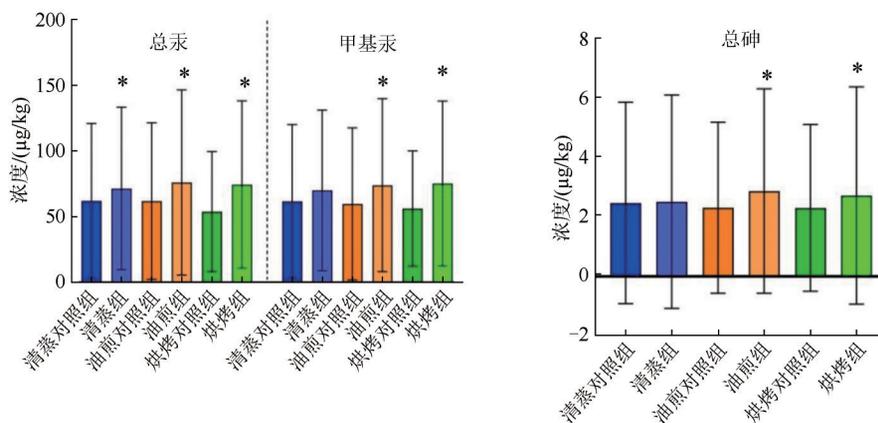


图1 烹调加工前后海鱼中总汞、甲基汞、总砷浓度变化

Figure 1 Changes of total mercury, methylmercury and total arsenic concentrations in marine fish before and after cooking

### 2.2 三种烹调方式下不同海鱼中主要有害元素加工系数分析

根据烹调前后海鱼样品中主要有害元素浓度以及经样品质量校正后的加工系数计算公式，分析得到每一种海鱼样品中总汞等5种有害元素经不同的烹调加工后两种形式的加工系数(表3和表4)。不同种类海鱼在相同烹调方式下，有害元素的加工系数均存在一定差异。大部分海鱼样品烹调前后

铅和镉元素的含量低于检出限，其中小部分种类海鱼样品烹调加工后铅、镉的浓度升高，导致其加工系数较高。总体来看，煎和烤的加工方式下海鱼中有害元素的加工系数高于蒸制方式。

## 3 讨论

近年来，国内外开展了大量食品中化学污染物的风险评估研究，其中大多数风险评估采用的食品

表3 三种烹调方式下不同种类海鱼中主要有害元素的加工系数<sup>1</sup>(%)

Table 3 Processing coefficient of main harmful elements in different kinds of marine fish under three cooking methods<sup>1</sup>(%)

海鱼种类	总汞			甲基汞			总砷			镉			铅		
	蒸	煎	烤	蒸	煎	烤	蒸	煎	烤	蒸	煎	烤	蒸	煎	烤
海鳗	1.1, 1.0-1.2	1.4, 1.3-1.4	1.3, 1.1-1.6	1.1, 1.0-1.2	1.4, 1.3-1.4	1.3, 1.1-1.6	1.0, 0.5-1.5	1.2, 1.2-1.2	1.3, 1.1-1.4	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	0.9, 0.9-1.0	1.0, 1.0-1.0	0.9, 0.7-1.0
黑棘鲷	0.8, 0.8-0.9	1.2, 1.2-1.2	1.0, 0.9-1.1	0.9, 0.8-0.9	1.2, 1.2-1.2	1.0, 0.9-1.1	1.5, 1.1-1.9	1.7, 1.6-1.7	1.1, 0.8-1.4	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.4, 1.4-1.4	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0
四指马鲛	1.1, 1.0-1.2	1.2, 0.7-1.6	1.3, 1.2-1.4	1.1, 1.1-1.2	1.1, 0.7-1.6	1.3, 1.2-1.4	1.0, 0.8-1.2	1.0, 0.8-1.1	1.2, 1.1-1.4	1.0, 1.0-1.0	2.4, 1.1-5.2	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	0.8, 0.5-1.0
金线鱼	1.2, 1.1-1.3	1.2, 1.1-1.3	1.5, 1.4-1.5	1.2, 1.1-1.3	1.2, 1.0-1.3	1.6, 1.4-1.8	1.0, 0.8-1.1	1.1, 1.0-1.2	3.0, 1.1-6.7	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	2.9, 1.0-8.5	1.0, 1.0-1.0
小带鱼	1.2, 0.4-2.3	1.0, 0.6-1.2	2.0, 1.1-3.3	1.1, 1.0-2.3	1.0, 0.6-1.2	1.9, 1.1-3.3	0.9, 0.5-1.1	1.5, 1.4-1.6	1.1, 0.8-1.3	0.5, 0.3-1.0	5.4, 0.8-9.7	3.2, 1.0-6.9	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0
多鳞鱧	1.1, 0.8-1.5	1.1, 1.0-1.3	1.4, 1.1-1.7	1.0, 0.8-1.4	1.3, 0.9-1.6	1.4, 1.1-1.7	0.8, 0.5-1.2	1.4, 1.0-1.8	1.2, 0.8-1.4	0.6, 0.4-0.7	1.4, 0.8-1.9	1.3, 1.1-1.7	0.9, 1.0-1.5	1.3, 1.0-2.0	1.0, 0.7-1.5
双线舌鲷	1.2, 1.1-1.5	1.1, 0.8-1.3	1.4, 1.1-1.7	1.6, 1.0-1.9	1.7, 1.2-1.9	1.2, 1.0-1.4	1.4, 0.8-1.8	1.3, 1.0-1.6	1.0, 0.8-1.2	2.7, 1.0-7.0	1.0, 1.0-1.0	7.5, 5.1-9.0	0.6, 0.5-1.0	1.0, 1.0-1.0	0.8, 1.0-1.0
真鲷	1.1, 1.1-1.2	1.0, 1.4-1.5	1.2, 1.0-1.3	1.1, 0.9-1.6	0.6, 0.6-1.1	1.0, 0.7-1.4	1.0, 0.8-1.2	0.9, 1.0-1.5	1.0, 0.8-1.3	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.8, 1.0-2.8	1.0, 1.0-1.0	0.8, 0.7-1.0
卵圆鲳	1.1, 1.0-1.2	1.6, 1.5-1.7	0.9, 1.1-1.4	1.4, 1.2-1.5	1.3, 0.7-2.1	0.7, 0.8-1.3	1.1, 1.0-1.3	1.6, 1.3-1.9	0.5, 0.5-1.1	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0
黄鳍鲷	1.1, 1.0-1.2	1.4, 1.2-1.8	1.5, 1.0-2.0	1.2, 0.6-2.3	1.4, 0.9-2.0	1.4, 0.9-2.0	1.0, 1.0-1.1	1.7, 1.2-2.6	1.3, 1.1-1.5	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0
棕点石斑鱼	1.3, 1.2-1.4	1.4, 1.2-1.6	1.2, 1.1-1.3	1.0, 0.5-1.7	2.1, 1.5-2.7	1.4, 1.0-1.6	1.1, 0.9-1.3	1.0, 0.8-1.6	1.3, 0.8-1.6	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0	1.0, 1.0-1.0
银鲳鱼	1.4, 1.2-1.5	1.8, 1.6-2.0	1.3, 0.4-2.0	1.7, 1.0-2.2	1.6, 1.4-1.8	1.4, 0.6-1.8	1.2, 0.9-1.4	1.7, 1.3-2.0	1.1, 1.0-1.2	5.3, 1.4-8.2	13.7, 12.8-13.7	9.6, 5.9-15.3	1.0, 1.0-1.0	1.1, 1.0-1.2	3.1, 1.0-4.6
平均	1.1, 0.8-1.4	1.3, 1.0-1.8	1.3, 0.9-2.0	1.2, 0.9-1.7	1.3, 0.6-2.1	1.3, 0.7-1.9	1.1, 0.8-1.5	1.3, 0.9-1.7	1.3, 0.5-3.0	1.4, 0.5-5.3	2.8, 0.7-13.7	2.7, 0.7-9.6	1.0, 0.6-1.8	1.1, 0.7-2.9	1.1, 0.8-3.1

注:加工系数<sup>1</sup>即均值和加工系数<sup>1</sup>的范围

表4 三种烹调方式下不同种类海鱼中主要有害元素的加工系数<sup>2</sup>(%)

Table 4 Processing coefficient of main harmful elements in different kinds of marine fish under three cooking methods<sup>2</sup>(%)

海鱼种类	总汞			甲基汞			总砷			镉			铅		
	蒸	煎	烤	蒸	煎	烤	蒸	煎	烤	蒸	煎	烤	蒸	煎	烤
海鳗	1.0, 0.9-1.0	1.2, 1.1-1.3	1.2, 1.0-1.3	1.0, 0.9-1.0	1.2, 1.1-1.3	1.2, 1.0-1.3	1.1, 0.9-1.4	1.1, 1.0-1.1	1.1, 1.0-1.3	0.9, 0.8-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.8-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.8-0.9	0.8, 0.6-0.9
黑棘鲷	0.8, 0.8-0.8	1.1, 1.1-1.1	1.0, 0.8-1.1	0.8, 0.8-0.8	1.1, 1.0-1.1	1.0, 0.8-1.1	1.4, 1.0-1.9	1.5, 1.5-1.6	1.0, 0.8-1.3	0.9, 0.9-1.0	0.9, 0.9-1.0	0.9, 0.9-1.0	1.4, 1.4-1.4	0.9, 0.9-1.0	0.9, 0.9-1.0
四指马鲛	1.0, 0.9-1.1	1.1, 0.7-1.4	1.2, 1.1-1.3	1.0, 1.0-1.1	1.0, 0.7-1.4	1.2, 1.1-1.3	0.9, 0.8-1.1	0.9, 0.8-1.0	1.1, 1.0-1.3	0.9, 0.9-0.9	2.2, 0.9-4.6	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.8, 0.5-0.9
金线鱼	1.1, 1.0-1.2	1.1, 1.0-1.2	1.4, 1.3-1.4	1.1, 1.0-1.2	1.1, 0.9-1.1	1.5, 1.3-1.6	0.9, 0.7-1.0	1.0, 1.0-1.1	1.1, 1.0-1.2	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	3.2, 0.9-7.9	0.9, 0.9-0.9
小带鱼	1.1, 0.4-1.9	0.9, 0.5-1.2	1.7, 1.1-2.8	1.4, 0.8-1.9	0.9, 0.5-1.2	1.7, 1.0-2.8	0.9, 1.0-0.9	1.3, 1.3-1.4	1.0, 0.7-1.2	0.4, 0.2-0.7	4.8, 0.7-8.4	4.0, 2.1-6.0	0.9, 0.9-1.0	0.9, 0.8-1.0	0.9, 0.8-0.9
多鳞鱧	0.9, 0.8-1.3	0.9, 0.8-1.0	1.2, 0.9-1.4	0.9, 0.6-1.2	1.0, 0.7-1.3	1.2, 0.9-1.4	0.7, 0.4-0.9	1.1, 0.8-1.4	0.9, 0.7-1.2	0.5, 0.3-0.6	1.1, 0.7-1.6	1.1, 0.9-1.5	1.0, 0.7-1.3	1.4, 1.3-1.6	0.8, 0.5-1.3
双线舌鲷	1.1, 0.9-1.3	1.0, 0.7-1.0	1.2, 1.0-1.5	1.4, 1.1-1.7	1.5, 1.1-1.7	1.1, 0.9-1.2	1.2, 1.6-1.0	1.2, 0.9-1.4	0.9, 0.7-1.1	2.4, 0.2-6.2	0.9, 0.9-0.9	6.6, 4.5-7.9	0.5, 0.2-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9
真鲷	1.0, 0.9-1.0	1.3, 1.2-1.3	1.0, 0.9-1.2	1.0, 0.8-1.4	0.7, 0.5-0.9	0.8, 0.6-1.1	0.9, 0.8-1.0	1.1, 0.9-1.3	0.9, 0.7-1.1	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	1.6, 0.9-2.3	0.9, 0.9-0.9	0.7, 0.6-0.8
卵圆鲳	1.0, 0.9-1.1	1.5, 1.4-1.6	1.2, 1.2-1.3	1.3, 1.1-1.4	1.2, 0.6-2.0	0.9, 0.7-1.2	1.1, 0.9-1.2	1.5, 1.2-1.7	0.7, 0.5-1.0	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9
黄鳍鲷	0.9, 0.8-1.1	1.3, 1.0-1.6	1.3, 0.9-1.6	1.1, 0.6-2.0	1.2, 0.8-1.9	1.2, 0.8-1.6	0.9, 0.8-1.0	1.5, 0.9-2.4	1.2, 0.8-1.4	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.8-0.9	0.9, 0.8-0.9	0.8, 0.8-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9
棕点石斑鱼	1.2, 1.1-1.2	1.3, 1.1-1.3	1.1, 1.0-1.2	0.9, 0.5-1.5	1.8, 1.3-2.4	1.2, 0.9-1.4	1.0, 0.8-1.1	1.2, 0.8-1.7	1.2, 0.8-1.4	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9	0.9, 0.9-0.9
银鲳鱼	1.2, 1.0-1.3	1.4, 1.2-1.6	1.5, 1.5-1.5	1.4, 0.8-1.7	1.3, 1.2-1.5	1.1, 0.5-1.3	1.0, 0.8-1.1	1.4, 1.1-1.8	0.9, 0.8-1.1	4.3, 1.2-6.0	11.3, 9.4-12.3	7.9, 5.3-12.7	0.8, 0.7-0.8	0.6, 0.9-0.9	2.4, 0.9-3.4
平均	1.0, 0.8-1.2	1.2, 0.9-1.5	1.2, 1.0-1.7	1.1, 0.8-1.4	1.2, 0.7-1.8	1.1, 0.8-1.7	1.0, 0.9-1.4	1.2, 0.9-1.5	1.1, 0.9-1.2	1.2, 0.5-4.3	2.4, 0.9-11.3	2.2, 0.9-7.9	0.9, 0.5-1.6	1.2, 0.9-3.2	1.0, 0.7-2.4

注:加工系数<sup>2</sup>即均值和加工系数<sup>2</sup>的范围

中污染物含量数据主要来源于未经烹调加工生的食物,未考虑食品中化学污染物在烹调前后浓度

的变化,可能给结果带来一定的高估或低估;此外,在实际开展风险评估中,食物消费量调查中包括未

经烹调加工的生的食物,同时也有经烹调加工后的熟的食物,而食物中水分的变化也会对结果带来不确定性。为解决该不确定性,比较准确的方法是采用总膳食研究或双份饭的方法,但总膳食研究仅能反应某个国家或地区的平均暴露水平,而双份饭研究工作量大,费时费力。为此,还可以采用食品污染物加工系数的方法,通过检测食物烹调前后污染物浓度的变化,建立反映其受加工因素影响的在一定范围内通用的校正系数,可进一步提高风险评估的精确性,是一种成本-收益比较好的方法。本研究对19种广东沿海地区常见的海产鱼类经过传统的烹调加工方式下总汞含量等5种主要的有害元素浓度的变化进行分析,获得了海产鱼类在不同烹调方式下总汞等有害元素的加工系数,为后续开展海鱼中有害元素精确性评估提供了数据基础。

国外曾开展过不同烹调方式下海产鱼类中有害元素浓度的影响研究(表5)<sup>[9-10,14-16]</sup>。研究显示,

不同种类海鱼在蒸、煎炸、烤等烹调方式下有害元素的浓度变化存在一定差异,其中经过油煎、烧烤处理后海鱼中有害元素的浓度显著高于未经烹调加工的海鱼,且油煎处理后有害元素的浓度要高于其他烹调处理方式。研究发现在油煎过程中,食物发生水分流失和油的吸收,而水分流失速度要高于油的吸收,水分流失导致食物中有害元素发生“集中效应”,从而导致有害元素的浓度增加<sup>[16]</sup>。在本研究中,油煎和烤制处理的海鱼其总汞、甲基汞、总砷、镉的浓度显著性升高;铅的浓度在清蒸处理后显著性降低,而油煎和烧烤后未有显著性变化,其原因可能与检测方法、食物成分和结构改变等因素相关<sup>[17]</sup>。此外,对于总汞和甲基汞在高温时可能存在蒸发导致一定损失,而本研究中总汞和甲基汞的加工系数2虽然已经考虑了加工前后原料质量的变化,但是结果均大于1,考虑可能存在烹调过程中带入以及检测方法等因素的影响。

表5 不同烹调方式下海鱼中有害元素浓度影响研究

Table 5 Effects of different cooking methods on the concentrations of harmful elements in Marine fish

海鱼类别	有害重金属	烹调方式	改变	参考文献
大口黑鲈	总汞	油炸	烹调后总汞浓度升高,最高升高75%	BURGER等 <sup>[15]</sup>
非洲鲶鱼	总砷、镉、铬、铅	烧烤、油炸、微波炉、烘烤	总砷、铅的浓度在烧烤、油炸等处理后与未烹调前无差异,铬的浓度经烤制和微波处理后显著性降低	ERSOY等 <sup>[9]</sup>
海鲈鱼	铅、镉、铬	烘烤、烧烤、微波炉、油炸	微波和烘烤方式使样品中铅浓度显著降低;油炸和微波样品中砷浓度显著升高	ERSOY等 <sup>[14]</sup>
沙丁鱼、鳕鱼、金枪鱼	总砷、镉、总汞、铅	炸、烤、煮	烹调处理后总砷、总汞、铅的浓度显著性升高,镉的浓度接近检出限	PERELLÓ等 <sup>[10]</sup>
凤尾鱼、鳕鱼、沙丁鱼、鲈鱼、胡瓜鱼、鲷鱼	镉、总汞、铬、铅	平底锅煎、烤制	煎制、烤制后镉等重金属浓度升高,且煎制>烤制>未烹调的食物	KALOGEROPOULOS等 <sup>[16]</sup>

研究显示,鱼的大小与油炸、烧烤等过程中的油吸收和水分损失呈负相关,因此体型越小的鱼类水分损失越多,导致其有害元素浓度升高<sup>[16]</sup>。本研究中,不同种类海鱼其烹调后有害元素的加工系数存在差异,其原因可能与鱼的大小有关。此外,由于未经烹调处理的海鱼样品中镉和铅的检出率较低,经煎、烤处理后,其部分样品中镉、铅的浓度显著性升高,导致其加工系数较高。本研究中提供了两种加工系数,加工系数1适用于暴露评估(消费量数据为经过烹调加工后食物的消费量)时对未经烹调加工的生的食物中污染物浓度进行校正;加工系数2考虑了水分的变化对原料质量的影响,适用于暴露评估(消费量数据为未经烹调加工食物的消费量)时对食物中污染物暴露量进行校正。在进行风险评估时,应结合实际情况,同时考虑鱼的种类与大小、烹调习惯及方式等因素,选择合适的加工系数估计风险。

采用加工系数对消费者通过膳食途径污染物的暴露量进行校正,优化评估方法、提高评估结果

准确性,进而以此为依据制定更为科学合理的风险管理政策。我国目前在加工系数方面仍需要积累研究数据,本研究仅获得了我国局部区域部分鱼种的5种形态常见有害元素的加工系数数据,下一步将继续开展其他食品种类中化学污染物的加工系数研究,为实现更为精确的评估提供数据支持。

## 参考文献

- [1] 程家丽, 马彦宁, 刘婷婷, 等. 中国部分海产品重金属污染特征及健康风险评价[J]. 卫生研究, 2017, 46(1): 148-154.  
CHENG J L, MA Y N, LIU T T, et al. Accumulation and health risks of heavy metals in the seafood from China [J]. Journal of Hygiene Research, 2017, 46(1): 148-154.
- [2] 齐自元, 曹欢, 胡钰梅, 等. 海产品与淡水产品中重金属的差异性及其风险评价[J]. 水产学报, 2022, 46(7): 1246-1256.  
QI Z Y, CAO H, HU Y M, et al. Differences and risk assessment of heavy metals in seafood and freshwater products [J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(7): 1246-1256.
- [3] 张珂, 王朝晖, 冯杰, 等. 胶州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 分析测试学报, 2011, 30(12): 1406-1411.  
ZHANG K, WANG Z H, FENG J, et al. Distribution and

- pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2011, 30(12): 1406-1411.
- [4] 刘芳文, 颜文, 苗莉, 等. 湛江港海域海水和表层沉积物重金属分布特征及其污染评价[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(2): 74-82. LIU F W, YAN W, MIAO L, et al. Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in the seawater and surface sediments from the Zhanjiang harbor [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(2): 74-82.
- [5] 吕利云, 董树刚, 刘阳, 等. 南黄海近岸海域表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2013(4): 101-110. LV L Y, DONG S G, LIU Y, et al. Distributions and pollution assessments of heavy metals in surface sediments in offshore area of south Yellow Sea [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(4): 101-110.
- [6] 高磊, 刘宝林, 吕林阳, 等. 海南省市售海产品中重金属/类金属含量分析及人体健康风险评估[J]. *安徽农学通报*, 2022, 28(4): 18-21. GAO L, LIU B L, LV L Y, et al. Heavy metals/metalloids of concentrations and human health risk assessment of commercially available seafoods in Hainan province [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2022, 28(4): 18-21.
- [7] 王慧, 毛伟峰, 蒋定国, 等. 中国居民水产品中四种常见重金属暴露评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2019, 31(5): 470-475. WANG H, MAO W F, JIANG D G, et al. Risk assessment of specific heavy metals exposure to aquatic products in China [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2019, 31(5): 470-475.
- [8] 高志杰, 汪婵娜, 姚浔平, 等. 海产品中重金属铅、汞、镉、铬对人体健康的潜在风险评估[J]. *中国卫生检验杂志*, 2014, 24(7): 1019-1021, 1025. GAO Z J, WANG L N, YAO X P, et al. Potential health risk of lead, mercury, cadmium and chromium in seafoods [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2014, 24(7): 1019-1021, 1025.
- [9] ERSOY B. Effects of cooking methods on the heavy metal concentrations of the African catfish (*Clarias gariepinus*) [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2011, 35(2): 351-356.
- [10] PERELLÓ G, MARTÍ-CID R, LLOBET J M, et al. Effects of various cooking processes on the concentrations of arsenic, cadmium, mercury, and lead in foods [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(23): 11262-11269.
- [11] 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 食品中总汞及有机汞的测定: GB 5009.17—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standards-Determination of total mercury and organic-mercury in foods: GB 5009.17—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [12] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standards-食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [13] GEMS/Food-EUROS. Second workshop on "Reliable evaluation of low-level contamination of food" [R]. Kulmbach: Federal Republic of Germany, 1995.
- [14] ERSOY B, YANAR Y, KÜÇÜKGÜLMEZ A, et al. Effects of four cooking methods on the heavy metal concentrations of sea bass fillets (*Dicentrarchus labrax* Linne, 1785) [J]. *Food Chemistry*, 2006, 99(4): 748-751.
- [15] BURGER J, DIXON C, BORING S, et al. Effect of deep-frying fish on risk from mercury [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2003, 66(9): 817-828.
- [16] KALOGEROPOULOS N, KARAVOLTSOS S, SAKELLARI A, et al. Heavy metals in raw, fried and grilled Mediterranean finfish and shellfish [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(10): 3702-3708.
- [17] DOMINGO J L. Influence of cooking processes on the concentrations of toxic metals and various organic environmental pollutants in food: A review of the published literature [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010, 51(1): 29-37.